ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

SOLDABILIDAD Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN (FRW) Y LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW) EN LOS POLÍMEROS POLIAMIDA PA-66 Y POLIETILENO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

PAUCAR PEDRAZA JERSON PATRICIO
jerson.paucar@epn.edu.ec

SUQUILLO LEMA ALEXANDER DAVID
alexander.suquillo@epn.edu.ec

DIRECTOR:
ING. ESPINOSA CHAUVIN DIEGO MARCELO
diego.espinosa@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **PAUCAR JERSON** y **SUQUILLO ALEXANDER** bajo mi supervisión.

_____

Ing. Diego Espinosa

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **JERSON PATRICIO PAUCAR PEDRAZA Y ALEXANDER DAVID SUQUILLO LEMA**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

_____

Jerson Patricio Paucar Pedraza

_____

Alexander David Suquillo Lema

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado especialmente a mis padres Segundo Paucar y María Pedraza, quienes con su amor incondicional y su gran apoyo como pilares de nuestra gran familia, hoy me permiten cosechar un logro más a su lado, a mi hermana Katherine por su carisma y apoyo durante todo este tiempo, a mis hermanos Andrés por demostrar que siempre se puede sobresalir cuando se tiene un gran talento y a Luis sin duda él es una muestra clara de optimismo y sacrificio, un ejemplo de hermano y amigo, a mi tía María Paucar por apoyarme siempre y sin duda a mi amigo del alma quien se convirtió en mi motor para alcanzar este logro mi mascota Mho y a todos mis familiares que siempre me han apoyado.

Jerson

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ayudarme a escoger el camino correcto con sabiduría y por crear un lazo de unión familiar que con el tiempo nos ha ayudado a ser mejores personas.

A toda mi familia por crear un vínculo de unión y compromiso entre todos, gracias por el apoyo y motivación para hoy alcanzar un logro más de los muchos que faltan.

A la Escuela Politécnica Nacional, a los laboratorios e ingenieros por los conocimientos transmitidos en las aulas y por inculcarnos ideales y valores que nos serán de mucha ayuda tanto en la vida personal como profesional.

Al ingeniero Diego Espinosa, director de tesis, por su ayuda, paciencia y conocimiento en el área de soldadura, los cuales fueron de mucha ayuda para la realización de este estudio.

Al ingeniero Velasteguí del laboratorio de Proceso de Producción Mecánica por ayudarnos con sus conocimientos en el área de soldadura.

A los laboratorios de Ensayos no Destructivos, de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros, al laboratorio de Procesos de Producción Mecánica y a los talleres externos que nos facilitaron el uso de sus equipos, muchas gracias.

A David, un gran amigo y persona, por su esfuerzo y dedicación para realizar este trabajo, su aporte fue fundamental para sobresalir a los problemas que se nos presentaron en la realización de este estudio.

A Mario un gran amigo y ejemplo de superación, empeño y nobleza, gracias por los ánimos para sobrellevar este trabajo, siempre seremos recíprocos con tu amistad. Éxitos en la finalización de tu trabajo.

A Ricardo, Alexander, Dennis, Álvaro, Cristian, Israel, Gabo, Juan, Raquel, Santiago y todos con los que compartimos grandes momentos de amistad dentro y fuera de la Universidad.

Jerson

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre por su gran esfuerzo, educación y amor de toda su vida la cual me ayudó a conseguir mi meta.

A mis hermanos Patricia y Santiago que a pesar de las dificultades estuvieron siempre apoyándome y motivándome toda mi etapa universitaria.

Y a todos mis amigos que de una u otra manera me ayudaron compartiendo momentos de estudio.

David

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por tener a mi madre con vida que trabajó muy duro para sacar la familia adelante dando lo mejor de sí siempre, ya que sin su gran apoyo económico y moral nada de esto hubiese sido posible.

A mi hermana Patricia de igual manera gracias por tu cariño y apoyo incondicional cuando más la necesité a pesar de las pequeñas peleas que tuvimos.

A mi hermano Santiago a pesar que estas fuera del país siempre estuviste presto a brindarme tú ayuda y motivándome con tu carácter fuerte y diciéndome que nunca hay que rendirse a pesar de las dificultades.

A mi familia gracias de todo corazón ustedes fueron los pilares de mi vida y siempre les voy a estar agradecido.

A mi amigo Fabián quien estuvo presto a escucharme cuando tuve problemas. También a Jerson que a pesar de los problemas siempre mantuvimos la amistad.

David

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN..... i
DECLARACIÓN ii
DEDICATORIA.....iii
AGRADECIMIENTOS iv
DEDICATORIA..... v
AGRADECIMIENTO..... vi
ÍNDICE vii
ÍNDICE DE FIGURAS..... x
ÍNDICE DE TABLAS.....xii
Objetivo general..... 1
Objetivos específicos..... 1
1. INTRODUCCIÓN..... 2
1.1. Antecedentes..... 2
1.2. Revisión Teórica..... 3
1.2.1. Clasificación de la soldadura por fricción..... 3
1.2.2. Soldadura por fricción (FRW) 3
1.2.3. Etapas del proceso de soldadura por fricción directa e inercia 4
1.2.4. Máquinas de soldadura por fricción (FRW)..... 5
1.2.4.1. Máquina de soldadura por fricción de accionamiento directo..... 5
1.2.4.2. Máquina de soldadura por fricción de inercia..... 6
1.2.5. Aplicaciones de la soldadura por fricción..... 7
1.2.6. Soldadura por fricción- agitación (FSW) 8
1.2.7. Máquinas de soldadora por fricción-agitación (FSW)..... 9
1.2.8. Aplicaciones para soldadura por fricción- agitación (FSW) 11
1.3. Soldadura de polímeros..... 12
1.3.1. Soldadura a gas caliente (Hot-Gas Welding) 12
1.3.2. Soldadura por Fusión (Fusion Welding)..... 13
1.3.3. Soldadura por fricción (Friction Welding) 13
1.3.4. Soldadura por alta frecuencia (High-Frecuency Welding) 13
1.3.5. Soldadura ultrasónica (Ultrasonic Welding) 13
1.4. Tipos de herramientas rotatorias para la soldadura por fricción-agitación (FSW) 14
1.4.1. Geometría de la herramienta con hombro estacionario 15
1.4.2. Avance y distancia de recorrido de la herramienta..... 16
1.5. Definición de polímeros 17
1.5.1. Polímeros termoplásticos..... 17
1.5.1.1. Polietileno (PE)..... 17

1.5.1.2. Poliamida PA-66 18
1.5.2. Polímeros termoestables 19
1.5.3. Características de los polímeros 20
1.5.3.1. Peso molecular de los polímeros 20
2. METODOLOGÍA 21
2.1. Caracterización de los materiales 21
2.2. Diseño de la herramienta rotatoria 23
2.2.1. Aspectos considerados en el diseño de la herramienta 23
2.2.2. Material 23
2.2.3. Diámetro del vástago 25
2.2.4. Selección del diámetro del hombro y del pin 25
2.2.5. Longitud del pin 26
2.2.6. Características del hombro y del pin 26
2.2.7. Hombro 26
2.2.7.1. Pin 27
2.3. Elaboración de las probetas 28
2.3.1. Probetas para la soldadura por fricción (FRW) 28
2.3.2. Probetas para la soldadura por fricción-agitación (FSW) 29
2.4. Parámetros principales para la soldadura por fricción 31
2.4.1. Preparación de la máquina de soldadura por fricción 31
2.5. Parámetros principales en la soldadura por fricción-agitación 33
2.5.1. Preparación de la máquina de soldadura por fricción-agitación 34
2.6. Construcción de la herramienta 35
2.7. Procedimiento de la soldadura por fricción 36
2.7.1. Probetas para soldadura por fricción 36
2.7.2. Ubicación de las probetas en la máquina de soldadura por fricción 36
2.8. Pruebas preliminares 36
2.8.1. Soldadura por fricción Poliamida PA-66 37
2.8.2. Soldadura por fricción del polietileno 40
2.9. Procedimiento de la soldadura por fricción-agitación 44
2.9.1. Ubicación de las probetas en la máquina de soldadura por fricción-agitación 44
2.9.2. Pruebas preliminares 44
2.9.3. Resultados finales de la soldadura por fricción-agitación 49
2.10. Ensayos 51
2.10.1. Ensayos no destructivos 51
2.11. Ensayos destructivos 54
2.11.1. Ensayo de tracción 54

3. RESULTADOS 57
3.1. RESULTADO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN 57
3.2. Resultados de los ensayos preliminares de la soldadura por fricción-agitación (FSW) 58
3.2.1. Polietileno de alta densidad 58
3.2.2. Poliamida PA-66 59
3.3. Resultados de los ensayos finales de la soldadura por fricción-agitación FSW 60
3.3.1. Polietileno de alta densidad 60
3.3.2. Poliamida PA-66 61
3.4. Comparación entre las soldaduras por fricción (FRW) y fricción-agitación (FSW) 62
4. CONCLUSIONES 68
Referencias Bibliográficas 71
Anexos 74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Descripción del proceso de soldadura por fricción. 3
Figura 1.2. Diagrama de las fases de la soldadura por fricción directa. 4
Figura 1.3.Diagrama de fases de la soldadura por fricción por inercia. 5
Figura 1.4. Máquina de soldadura por fricción de accionamiento directo. 6
Figura 1.5. Soldadora de fricción de inercia típica. 6
Figura 1.6. Distintas aplicaciones de soldadura por fricción. 7
Figura 1.7. Ilustración de la soldadura FSW. 8
Figura 1.8. Máquina herramienta (fresadora universal) 9
Figura 1.9. Diseño de una máquina de soldadura por fricción-agitación para trayectorias rectas. 10
Figura 1.10. Diseños de una máquina de soldadura por fricción-agitación para trayectorias complejas. 10
Figura 1.11. Ilustración de la soldadura a gas caliente. 12
Figura 1.12. Soldadura por contacto ultrasónico. 14
Figura 1.13. Geometría de la herramienta. 16
Figura 1.14. Estructura molecular del polietileno. a) PEBD b) PELBD c) PEAD. 17
Figura 1.15. Resistencia al impacto vs. viscosidad de fundido. 20
Figura 2.16. Identificación.-La muestra Varilla gruesa tiene las bandas de absorción características de una poliamida 3300, 1629 y 1530 cm^{-1}, por el punto de fusión el material es una Poliamida PA- 66. 22
Figura 2.17. Identificación.-La muestra Varilla delgada tiene las bandas de absorción características de una polietileno 2920, 1470 y 730-720 cm-1, por el punto de fusión el material corresponde a un Polietileno de alta densidad (PEAD) o a un Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular. 23
Figura 2.18. Recomendaciones de secuencia para el tratamiento térmico del acero HSS S630. 24
Figura 2.19. Diámetros de vástagos que pueden ser usados en la fresadora. 25
Figura 2.20. Formas y características del hombro 27
Figura 2.21. Formas y características del pin. 28
Figura 2.22. Elaboración de las probetas para la soldadura por fricción. 29
Figura 2.23. Proceso de pulido de las probetas. 29
Figura 2.24. Nivelación de la entenalla para la elaboración de las probetas, con la ayuda de un reloj comparador. 30
Figura 2.25. Refrentado horizontal de las probetas. 30
Figura 2.26. Refrentado vertical de las probetas. 31
Figura 2.27. Instrucciones de uso para la máquina de soldadura por fricción. 32

Figura 2.28. Regulación de la máquina de soldadura por fricción a 2500 rpm. 32
Figura 2.29. Manómetro y bomba hidráulica. 33
Figura 2.30. Selección de avance de la fresadora mm/min. 34
Figura 2.31. Proceso de elaboración de la herramienta con hombro estacionario. 36
Figura 2.32. Velocidad vs. Tiempo (Poliamida PA-66). 38
Figura 2.33. Velocidad vs. P_calentamiento (Poliamida PA-66). 39
Figura 2.34. Velocidad vs. P_forja (Poliamida PA-66). 39
Figura 2.35. Encogimiento vs. Tiempo (Poliamida PA-66). 40
Figura 2.36. Velocidad vs. Tiempo (Polietileno). 41
Figura 2.37. Velocidad vs. P_calentamiento (Polietileno). 42
Figura 2.38. Velocidad vs. P_forja (Polietileno). 43
Figura 2.39. Encogimiento vs. Tiempo (Polietileno). 43
Figura 2.40. Colocación de las probetas en la máquina fresadora. 44
Figura 2.41. Limpieza de las superficies. 52
Figura 2.42. Aplicación del CLEANER. 52
Figura 2.43. Aplicación de la tinta fluorescente. 53
Figura 2.44. Aplicación del chorro de agua. 53
Figura 2.45. Visualización de las discontinuidades en amarillo fluorescente para el polietileno. 54
Figura 2.46. Visualización de las discontinuidades en verde fluorescente para la Poliamida PA-66. 54
Figura 2.47. Máquina universal de ensayos mecánicos. 55
Figura 2.48. Probetas ensayadas mediante ensayo de tracción. 55
Figura 3.49. Resistencia a la tracción Poliamida PA-66. 63
Figura 3.50. Resistencia a la tracción Polietileno de alta densidad. 64
Figura 3.51. Resistencia a la tracción en el material base según la norma ASTM D638-14. 65
Figura 3.52. Resistencia a la tracción en la soldadura FSW. 66
Figura 3.53. Resistencia a la tracción soldadura FRW. 66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Presiones de calentamiento y forja de algunos materiales. 7
Tabla 1.2. Valores obtenidos experimentalmente por diferentes investigadores al soldar distintos materiales mediante soldadura por fricción- agitación (FSW). 11
Tabla 1.3. Tipos de perfiles de pines. 15
Tabla 1.4. Avance y distancia de recorrido de la herramienta. 16
Tabla 1.5. Características mecánicas del polietileno. 18
Tabla 1.6. Características mecánicas de la poliamida PA-66. 19
Tabla 2.7. Tabla de temperaturas de ablandamiento para los polímeros: polietileno de alta densidad y poliamida PA-66. 22
Tabla 2.8. Características de acuerdo con la norma DIN. 24
Tabla 2.9. Composición química del acero SAE 4340. 24
Tabla 2.10. Propiedades mecánicas del acero SAE 4340. 24
Tabla 2.11. Composición química del acero HSS S630. 25
Tabla 2.12. Diámetros del hombro y pin aproximados. 25
Tabla 2.13. Longitud del pin para diferentes espesores. 26
Tabla 2.14. Diseño y fabricación de las herramientas. 35
Tabla 2.15. Tabla de los resultados obtenidos de los ensayos previos. 37
Tabla 2.16. Tabla de datos de la soldadura en la Poliamida PA-66. 37
Tabla 2.17. Tabla de datos de velocidad vs. tiempo. 38
Tabla 2.18. Tabla de datos velocidad vs. Presión de calentamiento. 38
Tabla 2.19. Tabla de datos rpm vs. Presión de forja. 39
Tabla 2.20. Tabla de datos encogimiento de las probetas soldadas. 40
Tabla 2.21. Tabla de datos de la soldadura del Polietileno. 41
Tabla 2.22. Tabla de datos de velocidad vs. tiempo. 41
Tabla 2.23. Tabla de datos velocidad vs. Presión de calentamiento. 42
Tabla 2.24. Tabla de datos velocidad vs. Presión de forja. 42
Tabla 2.25. Tabla de datos encogimiento de las probetas soldadas. 43
Tabla 2.26. Pruebas preliminares para la soldadura del Polietileno. 45
Tabla 2.27. Pruebas preliminares para la soldadura de la poliamida PA-66. 47
Tabla 2.28. Resultados de las soldaduras finales para el Polietileno. 49
Tabla 2.29. Resultados de las soldaduras finales para la Poliamida PA-66. 50
Tabla 2.30. Resultados del ensayo de tracción a las probetas rectangulares. 56
Tabla 2.31. Resultados del ensayo de tracción a las probetas circulares. 56
Tabla 3.32. Comparación de carga máxima y resistencia a la tracción entre los procesos FRW Y FSW. 63

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió, analizó y comparó el comportamiento de las soldaduras realizadas mediante los procesos de soldadura por fricción y soldadura por fricción agitación en el polietileno de alta densidad y poliamida PA-66. La selección de parámetros y herramientas se realizó de acuerdo a pruebas experimentales, que ayudarán a definir bajo que condiciones se puede realizar la soldadura en estos polímeros. El proceso de soldadura por fricción agitación fue el que mayor inconvenientes presentó, debido a la dificultad de definir correctamente la geometría de la herramienta y las revoluciones de giro de la fresadora, pues en el caso de los dos polímeros al soldarlos a revoluciones menores a 1200 rpm no llegan a un punto de fusión, y si sobrepasamos las 1800 rpm en el caso de la poliamida PA-66, esta empieza a fragilizarse en su cordón de soldadura. El polietileno necesita un mayor tiempo de contacto entre las superficies para aumentar la temperatura del polímero y la herramienta conjuntamente, se optó por realizar avances manuales con la fresadora para soldar la poliamida y el polietileno de alta densidad. Para determinar las propiedades mecánicas de las probetas se realizaron ensayos de tracción, inspección visual, tintas penetrantes y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). Al conocer los resultados se escogieron las mejores muestras para realizar la comparación entre estos dos procesos.

Palabras clave: Poliamida PA-66, Polietileno, soldadura, parámetros, herramienta, fricción, rpm.

ABSTRACT

In the present work, the behavior of the welds made by friction welding and friction stir welding processes in high density polyethylene and PA-66 polyamide was studied and analyzed. The selection of parameters and tools was performed according to experimental tests, which helped to define under what conditions the welding can be carried out in these polymers. The welding process by friction stirring was the one that presented the greatest inconvenience, due to the difficulty of correctly defining the geometry of the tool and the revolutions of rotation of the milling machine, since in the case of the two polymers weld at revolutions lower than 1200 rpm does not reach a melting point, and if it exceeds 1800 rpm in the case of PA-66 polyamide it starts to become brittle in its weld seam. Polyethylene instead needs a longer contact time between the surfaces to increase its temperature and the temperature of tool, so it was chosen to weld the polyamide and high density polyethylene by making manual advances with the milling machine. In order determine the mechanical properties of the specimens, tensile tests, visual inspection, penetrating inks and Differential Scanning Calorimetry (DSC) were performed. When the results, were obtained, the best samples were chosen to make the comparison between these two processes.

Keywords: Polyamide PA-66, Polyethylene, welding, parameters, tool, rpm, friction.

“SOLDABILIDAD Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN (FRW) Y LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW) EN LOS POLIMEROS POLIAMIDA PA-66 Y POLIETILENO”

Objetivo general

Realizar un análisis comparativo entre la soldadura FRW y la soldadura FSW para los polímeros poliamida PA-66 y polietileno.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir la herramienta con hombro estacionario para la soldadura por fricción-agitación, en base a las geometrías recomendadas en la bibliografía para la soldadura de polímeros.
- Fabricar las probetas en base a la norma ASTM-D638-14 para el ensayo de tracción.
- Establecer variables de: velocidad, presión, tiempo de calentamiento de la junta y geometría de la herramienta rotatoria.
- Comparar los valores obtenidos por los dos métodos de soldadura.
- Análisis de las gráficas y resultados obtenidos de los ensayos destructivos y no destructivos aplicados a las probetas obtenidas en cada método utilizado.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En la actualidad está fuera de toda duda la importancia del uso de los polímeros dentro de la industria nacional e internacional, ya que estos tipos de materiales aportan con propiedades y características, difíciles de alcanzar usando materiales metálicos, se adaptan a diversas necesidades y tienen una alta resistencia contra agentes químicos.

Los procesos de soldadura por fricción (FRW) y soldadura por fricción – agitación (FSW) que se mencionan en esta investigación, han sido escasamente difundidos e implementados en la industria nacional, por lo cual se busca realizar un análisis de estas soldaduras en polímeros, pues este tipo de material no cuenta con propiedades que faciliten su soldadura como ocurre en el caso de los metales.

Debido al creciente desarrollo en la industria de los polímeros y sus aplicaciones en los diversos campos de la industria, y los métodos convencionales no muy eficientes para su fusión, llevan a investigar y analizar los nuevos métodos de soldadura para polímeros que se están desarrollando actualmente. Durante mucho tiempo el método más usado para la unión de polímeros, ha sido mediante la adición de compuestos químicos en las juntas a ser unidas, sin embargo, este proceso requiere de un material de diferentes características a las de los materiales base, lo cual implica propiedades mecánicas y químicas diferentes a las deseadas.

Por esta razón, es necesario realizar estudios de los nuevos métodos de soldadura para polímeros con el fin de optimizar los procesos y aumentar la fiabilidad en cuanto a su unión, para posteriormente ser difundidos y aplicados dentro del sector industrial nacional.

1.2. Revisión Teórica

1.2.1. Clasificación de la soldadura por fricción

La soldadura por fricción posee dos métodos de aplicación dependiendo del tipo de juntas que se requiera unir, se puede lograr con una fresadora para juntas planas o láminas de gran extensión, o con un torno convencional para juntas con una sección transversal redonda como tuberías (SIEGERT, 2008).

1.2.2. Soldadura por fricción (FRW)

La soldadura por fricción es un método de soldadura que aprovecha el calor generado por la fricción mecánica entre dos piezas en movimiento. El principio de funcionamiento consiste en que la pieza de revolución gira en un movimiento de rotación fijo o variable alrededor de su eje longitudinal y se asienta sobre la otra pieza. Cuando la cantidad de calor producido por rozamiento es suficiente para llevar a las piezas a la temperatura de soldadura, se detiene bruscamente el movimiento y se ejerce un empuje, el cual produce la soldadura.

Una de las ventajas de la soldadura por fricción es que es un proceso limpio, es decir, no genera gases ni residuos que pueden resultar relativamente perjudiciales al entrar en contacto con el medio ambiente, y por lo tanto perjudican la salud humana (Mariano, 2013).

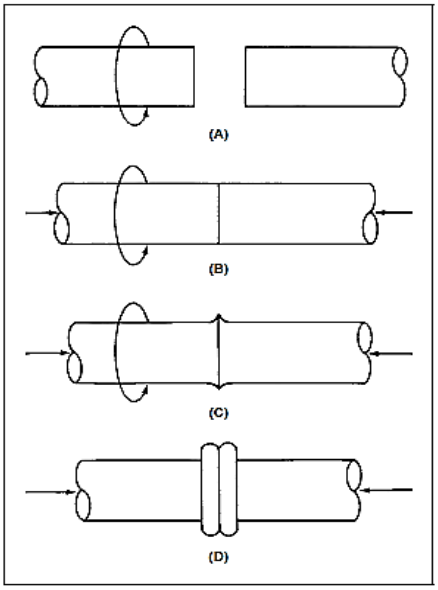


Figura 1.1. Descripción del proceso de soldadura por fricción.

(Fuente: Mariano, 2013)

En la figura 1.1, se puede observar la secuencia que sigue el proceso de soldadura por fricción, el cual se interpreta de la siguiente manera:

a) El sustrato rotatorio adquiere velocidad adecuada.
b) El sustrato giratorio avanza y se pone en contacto con el sustrato fijo con carga axial.
c) La presión de contacto rotatoria se mantiene durante un tiempo especificado.
d) La rotación se detiene y la presión se mantiene o aumenta durante un tiempo especificado para producir la soldadura.

1.2.3. Etapas del proceso de soldadura por fricción directa e inercia

Las soldaduras confiables de alta integridad se producen una vez que los parámetros de trabajo se han establecido adecuadamente.

En la figura 1.2 se presenta la relación entre estas variables del proceso de unión por fricción directa, como son la velocidad de rotación en las fases de fricción y forja, la presión axial empleada como una función del tiempo para la soldadura.

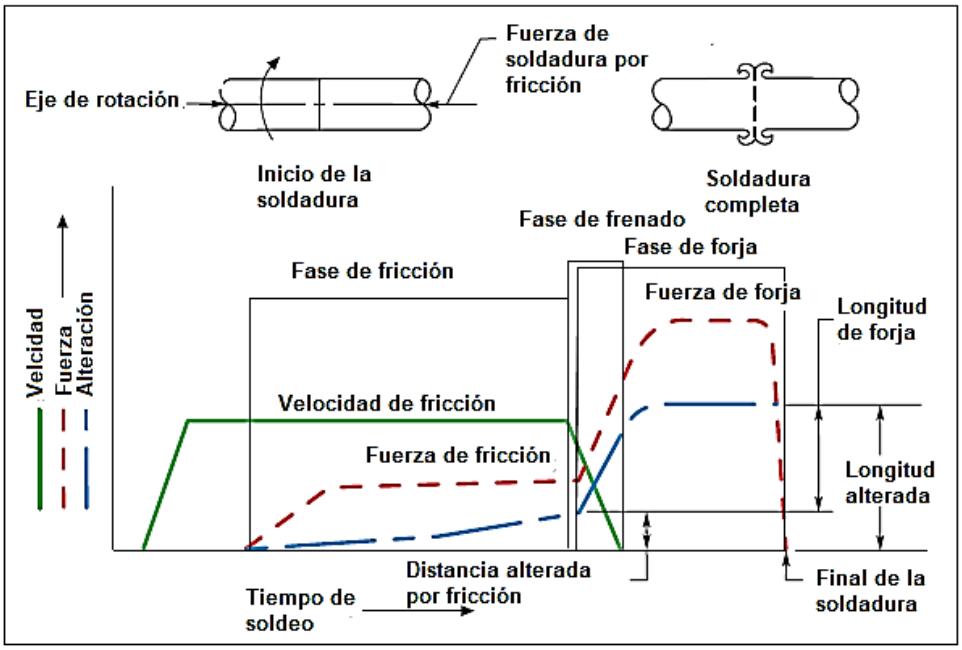


Figura 1.2. Diagrama de las fases de la soldadura por fricción directa.

(Fuente: Society, Welding Handbook, 2007)

La fase de forja implica la aplicación de una mayor presión entre las piezas a soldar, esta se produce en algún punto de la etapa de parada, ya sea mientras el husillo desacelera o cuando se detenga. En el primer caso se producirá una fuerza de torsión aplicada a la soldadura, mientras que el segundo caso, no existe fuerza de torsión, y la forja es afectada únicamente por la fuerza axial aplicada en el proceso.

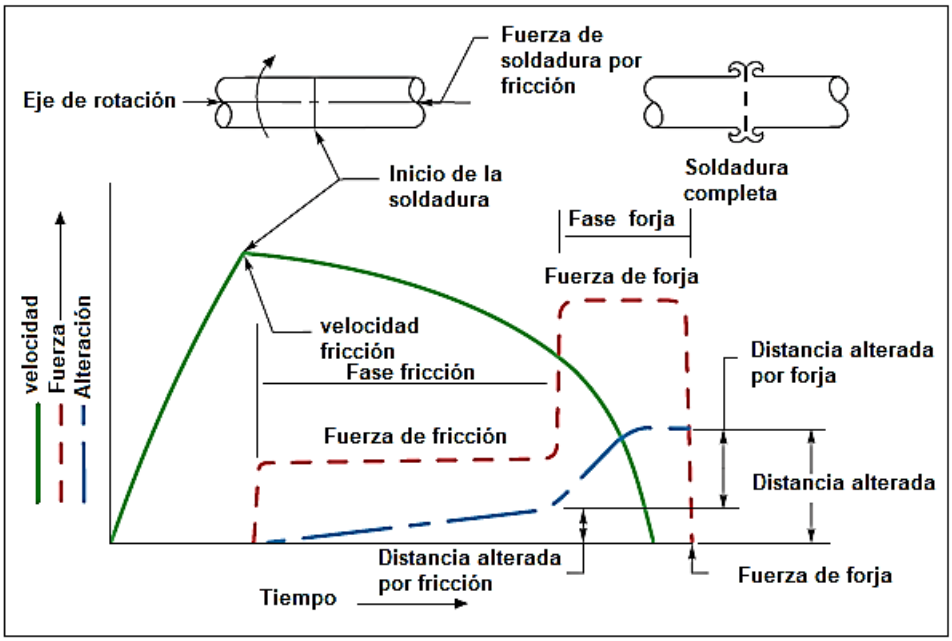


Figura 1.3.Diagrama de fases de la soldadura por fricción por inercia.

(Fuente: Society, Welding Handbook, 2007)

En la figura 1.3 se ilustra el proceso de unión por inercia, donde la soldadura tiene lugar típicamente en dos etapas: la fricción y la forja, sin embargo, se puede omitir la fase de forja, trabajando solo con una presión constante.

La principal diferencia entre los métodos de transmisión directa y de inercia es la velocidad de fricción .En la soldadura por inercia, la velocidad de fricción disminuye continuamente durante la etapa de fricción, mientras que en la directa la velocidad de fricción permanece constante (Society, Welding Handbook, 2007).

1.2.4. Máquinas de soldadura por fricción (FRW)

1.2.4.1. Máquina de soldadura por fricción de accionamiento directo

Las máquinas de soldadura por fricción directa son semejantes a los tornos (ver figura 1.4), en el cual se pueden ir ajustando las siguientes variables para controlar la calidad de la soldadura:

- Velocidad rotacional.
- Presión de calentamiento.
- Presión de forjado.
- Temperatura.
- Duración del calentamiento.

Figura 1.4. Máquina de soldadura por fricción de accionamiento directo.

(Fuente:Society, Welding Handbook, 2007)

1.2.4.2. Máquina de soldadura por fricción de inercia

En la mayoría de las aplicaciones, las máquinas de soldadura por fricción de inercia usan un solo empuje axial para producir el calor y la presión de forja. La presión de forjado, se aplica cerca del fin del ciclo por una configuración de velocidad previamente seleccionada (ver figura 1.5).

Figura 1.5. Soldadora de fricción de inercia típica.

(Fuente: Society, Welding Handbook, 2007)

1.2.5. Aplicaciones de la soldadura por fricción

Los mecanismos soldados por fricción se encuentran en todas las áreas de la ingeniería, entre ellas están la industria aeroespacial, agrícola, automotriz, marina y petrolera (A.M.Strauss, 2014).

Área aeroespacial: estructuras en el fuselaje, Blisks (discos utilizados en turbinas), etc.
Área automotriz: ejes de dirección, engranajes de transmisión, válvulas de cilindros, etc.
Área petrolífera: barras de perforación para pozos (drill rods), tubos API (drill pipes), etc.
Área eléctrica: terminales eléctricos de aluminio-cobre.

Figura 1.6. Distintas aplicaciones de soldadura por fricción.

(Fuente: SIEGERT, 2008)

Para lograr la unión de diversos materiales es primordial tener presiones adecuadas con el fin de lograr una soldadura de calidad. En la tabla 1.1 se encuentran tanto la presión de calentamiento y de forja que se recomienda utilizar.

Tabla 1.1. Presiones de calentamiento y forja de algunos materiales.

Material	Presión de calentamiento[MPa]	Presión de forja[MPa]
Aluminio 6061	10.34	20.68
Acero inoxidable	76.00	181.13
Aluminio 2014	48.00	192.21
Magnesio	61.29	152.98
Níquel	76.00	177.21

(Fuente: Arguello, 1987)

1.2.6. Soldadura por fricción- agitación (FSW)

La soldadura por fricción y agitación (FSW) es una técnica de unión de estado sólido que se ha expandido rápidamente desde su desarrollo en 1991 y ha encontrado aplicaciones en una amplia variedad de industrias, incluyendo aeroespacial, automotriz, ferroviario y marítimo. El proceso FSW exhibe un número de ventajas atractivas en comparación con otros procesos de soldadura, tal vez el más significativo de los cuales es la capacidad para soldar aleaciones que son difíciles o imposibles de soldar usando técnicas de soldadura por fusión. El proceso FSW tiene lugar en la fase sólida, a temperaturas por debajo del punto de fusión del material, y como un resultado no experimenta problemas relacionados con la resolidificación, como la formación de segundas fases, porosidad, fragilización, y agrietamiento. Además, la temperatura más baja del proceso permite unir con menor distorsión y menores tensiones residuales. FSW es también un proceso de eficiencia energética que no requiere material de relleno y, en la mayoría de los casos, no requiere el uso de un gas de protección. Igualmente, el proceso carece de humos, arco eléctrico, salpicaduras y contaminación asociado con la mayoría de las técnicas de soldadura por fusión; por estas y muchas otras razones, FSW se ha convertido en una unión atractiva proceso para muchos fabricantes (A.M.Strauss, 2014).

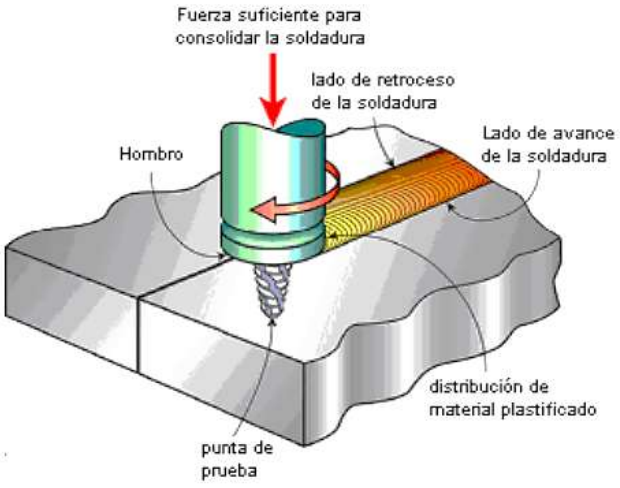


Figura 1.7. Ilustración de la soldadura FSW.

(Fuente: SIEGERT, 2008)

1.2.7. Máquinas de soldadora por fricción-agitación (FSW)

Los cordones de soldadura por fricción-agitación se realizan típicamente en equipos similares a máquinas herramientas. La soldadura de secciones delgadas donde no se necesita fuerzas tan grandes a menudo se realiza en máquinas herramientas como se observa en la figura 1.8. Las máquinas de soldadura por fricción-agitación típicamente deben tener precisión de posicionamiento mientras opera bajo altas cargas (Society, Welding Handbook, 2007).

Los equipos de soldadura por fricción-agitación modernos, como todos los demás equipos industriales, están disponibles con una gama de capacidades cinemáticas. El diseño de los equipos puede abarcar desde una máquina que realice soldaduras simples en una sola trayectoria y con ángulos de inclinación ajustables manualmente hasta máquinas con 5 grados o más de libertad para soldar trayectorias complejas (ver figuras 1.9 y 1.10).

Figura 1.8. Máquina herramienta (fresadora universal)

(Fuente Propia, 2018)

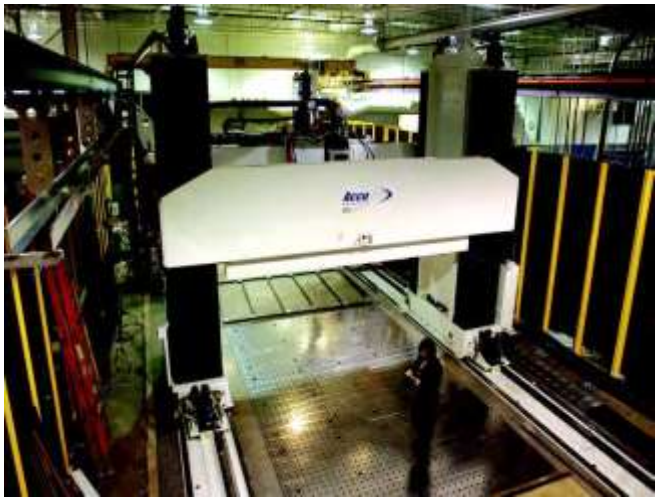


Figura 1.9. Diseño de una máquina de soldadura por fricción-agitación para trayectorias rectas.

(Fuente: Society, Welding Handbook, 2007)

El equipo capaz de soldar trayectorias complejas está equipado con dispositivos tridimensionales para mantener las piezas de trabajo adecuadamente restringidas. La complejidad de la pieza de trabajo se refleja en las herramientas. Si se utiliza una herramienta de bobina para soldadura FSW, se elimina la necesidad de una placa de respaldo, pero la herramienta aún tiene que forzar a las piezas de trabajo a separarse y distorsionarse bajo carga (Society, Welding Handbook, 2007).

Figura 1.10. Diseños de una máquina de soldadura por fricción-agitación para trayectorias complejas.

(Fuente: Society, Welding Handbook, 2007)

1.2.8. Aplicaciones para soldadura por fricción- agitación (FSW)

En este proceso se están desarrollando aplicaciones para soldadura de aleaciones de aluminio que son difíciles de soldar en procesos donde se involucra la fusión del material base. Además se puede soldar superficies largas de materiales poliméricos de una sola pasada en espesores delgados hasta 6 mm.

En la tabla 1.2 se encuentran los parámetros utilizados para soldar algunos materiales y las dimensiones de la herramienta utilizada en cada caso.

Tabla 1.2. Valores obtenidos experimentalmente por diferentes investigadores al soldar distintos materiales mediante soldadura por fricción-agitación (FSW).

Material	Herramienta roscada utilizada	Espesor de la placa[mm]	Velocidad [rpm]	Avance $\left[\frac{\mathbf{mm}}{\mathbf{min}}\right]$	Resistencia a la tracción [MPa]
AA1050 Aluminio	M 5 X0.80 Longitud de 3 mm	3.20	710	40.00	35.00
				60.00	40.00
				90.00	40.00
				120.00	45.00
			1000	40.00	50.00
				60.00	55.00
				90.00	60.00
				120.00	65.00
			1400	40.00	65.00
				60.00	70.00
				90.00	80.00
				120.00	105.00
PE 100 Polietileno de alta densidad	M6X1 izquierda Longitud de 10.50 mm	9.50	600	11.74	4.42
			1000	22.75	12.00
			2000	40.08	19.60
			3000	97.14	2.85
Polipropileno	M6X1 Longitud de 5.40 mm	6.00	800	63.50	4.60
				46.50	6.80
				33.80	11.70

(Fuente: Oliveros, 2017)

1.3. Soldadura de polímeros

A menudo es necesario unir dos o más componentes de plástico para obtener una configuración deseada o para reparar una pieza rota. Para algunos termoplásticos es aplicable la soldadura con disolventes. En el proceso se usa solventes, que disuelven el plástico para proporcionar un enclavamiento molecular y luego evaporarse. Normalmente requiere juntas ajustadas (Handbook, 2007).

El método más común para unir plásticos es usando calor con o sin presión. Diversos procesos de soldadura térmica están disponibles. Esos procesos se describen a continuación:

1.3.1. Soldadura a gas caliente (Hot-Gas Welding)

La soldadura a gas caliente, tiene un parecido superficial a la soldadura de metales con llama oxiacetilénica, es particularmente útil para unir láminas termoplásticas en la fabricación de elementos de plantas químicas, como tanques y conductos. Las hojas a unir se limpian, se biselan y se colocan una al lado de la otra para que los bordes biselados formen un canal en forma de V, la punta de una varilla de relleno (del mismo plástico) se coloca en el canal, y tanto en el área adyacente de las hojas se clienta con una corriente de gas a (200-400°C) dirigida desde una boquilla de gas caliente calentada eléctricamente, que funde los plásticos, la ilustración de este método se puede observar en la figura 1.11.

Los plásticos luego fusionan y unen las dos hojas. El gas caliente puede ser aire en soldadura de PVC, pero para polietileno debe usarse un gas inerte como nitrógeno para evitar la oxidación de los plásticos durante la soldadura (Handbook, 2007).

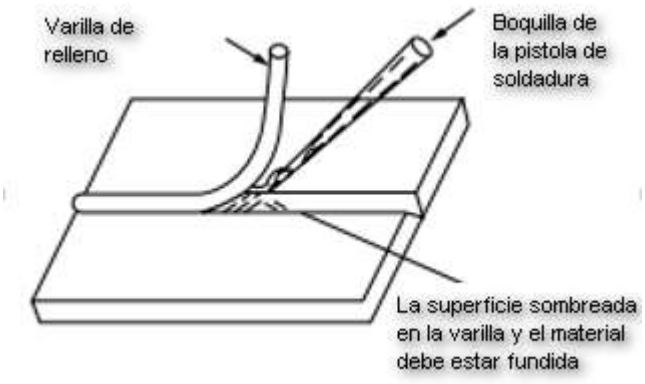


Figura 1.11. Ilustración de la soldadura a gas caliente.

(Fuente: Manas & Roy, 2007)

1.3.2. Soldadura por Fusión (Fusion Welding)

La soldadura por fusión o por herramienta caliente se lleva a cabo con una placa calefactora calentada eléctricamente o una herramienta calentada, generalmente de metal que se utiliza para unir las dos herramientas de plástico a la temperatura requerida. El proceso de polifusión para unir tubos de plástico por medio de acoplamientos moldeados por inyección es un ejemplo de este tipo de soldadura. La herramienta debe estar cromada para evitar que el plástico se pegue a sus superficies (Handbook, 2007).

1.3.3. Soldadura por fricción (Friction Welding)

En la fricción o soldadura por rotación de los termoplásticos, una de las dos piezas a unir se fija en el mandril de un torno modificado y se gira a alta velocidad mientras que la otra se sostiene contra ella hasta que el calor de fricción hace que fluya el polímero. El porta brocas se detienen y las dos piezas se dejan enfriar bajo presión. El proceso está limitado a objetos que tienen una configuración circular. Ejemplos típicos son perillas de colores, hemisferios moldeados y mitades de botellas moldeadas por inyección (Handbook, 2007).

1.3.4. Soldadura por alta frecuencia (High-Frecuency Welding)

La soldadura dieléctrica o de alta frecuencia se puede usar para unir aquellos termoplásticos que tienen altas características de perdida dieléctrica incluyendo acetato de celulosa, ABS y PVC. Obviamente, el polietileno, el polipropileno y el poliestireno no se pueden soldar por este método. El dispositivo utilizado para la soldadura de alta frecuencia es esencialmente un transmisor de radio operado a frecuencias entre 27 y 40 MHz. La energía obtenida del transmisor se dirige a los electrodos del aparato de soldadura. El campo de alta frecuencia hace que las moléculas en el plástico vibren y se froten entre sí muy rápido, lo que genera un calor de fricción suficiente para derretir las interfaces y producir una soldadura (Handbook, 2007).

1.3.5. Soldadura ultrasónica (Ultrasonic Welding)

En la soldadura ultrasónica, las moléculas del plástico que va a soldar quedan suficientemente alteradas por la aplicación de energía mecánica de frecuencia ultra-elevada para crear calor por fricción, lo que hace que los plásticos se fundan y se unan rápida y firmemente.

La maquinaria para soldadura ultrasónica consiste en un dispositivo electrónico que genera energía a 20/50 $kHz.seg^{-1}$ y un transductor para convertir la energía eléctrica en

energía mecánica. En el método de soldadura por contacto que se puede observar en la figura 1.12, la fuerza ultrasónica del transductor se transmite a los objetos (para ser soldada) a través de una herramienta o cuerno, generalmente de titanio. La amplitud del movimiento del claxon es de 0.013-0.13 [mm], dependiendo del diseño. El método se usa generalmente para soldar termoplásticos finos o menos rígidos, tales como películas o láminas de polietileno, PVC plastificado y otros que tienen baja rigidez (Handbook, 2007).

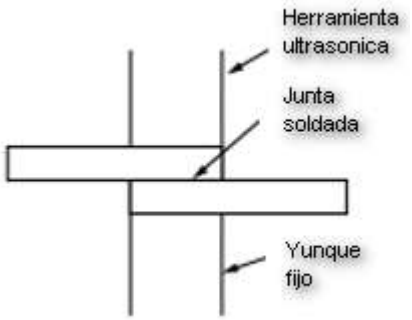


Figura 1.12. Soldadura por contacto ultrasónico.

(Fuente: Handbook, 2007)

1.4. Tipos de herramientas rotatorias para la soldadura por fricción-agitación (FSW)

Para el diseño de la herramienta rotatoria K. Lenin y K. Panneerselvam tomaron en cuenta las propiedades mecánicas del material, geometría de la herramienta, avance y velocidad de corte. Todos estos factores fueron esenciales al momento de elegir la herramienta ya que de esto depende una buena unión de las placas. Además, investigaron el efecto de la fuerza de la herramienta y los defectos en la unión durante FSW de placas de polipropileno, debido a que el polipropileno es un polímero termoplástico semicristalino utilizado en una amplia variedad de aplicaciones como: equipos de laboratorio, componentes automotrices, películas transparentes, etc. (K.Lenin & K.Pannerselvam, Septiembre 2012).

Las pruebas experimentales las realizaron a una velocidades entre 1500 a 2500 rpm. En la tabla 1.3 se muestran los diferentes tipos de pines usados por los investigadores:

Tabla 1.3. Tipos de perfiles de pines.

Tipos de perfiles de pines					
Cilíndrico recto	Cilíndrico cónico	Cuadrado	Triangular	Cilíndrico roscado	Cuadrado con ranuras

(Fuente: K.Lenin & K.Pannerselvam, Septiembre 2012)

Mediante el estudio realizado observaron que el pin que mejor se adaptó a las condiciones de trabajo para el polipropileno fue el cilíndrico roscado con un diámetro del pin de 6 mm, un diámetro del hombro de 18.7 mm y una longitud del pin de 5.4 mm para una placa de 6 mm de espesor, elaborada en acero 4140 y templada en aceite para una dureza de 57 RC. El pin cilíndrico comparado con los otros tipos de pines produjo mayor fuerza lineal, además de un buen ablandamiento del material para lograr una soldadura adecuada entre placas.

1.4.1. Geometría de la herramienta con hombro estacionario

La geometría de la herramienta es fundamental ya que juega un papel muy importante en el flujo del material y además, rige la velocidad de desplazamiento a la que se debe generar el proceso de soldadura.

La herramienta está compuesta por el hombro, un pin y el vástago como se indica en la figura 1.13, la cual tiene dos funciones principales:

a) Calentamiento localizado en la zona de soldadura.
b) Flujo del material.

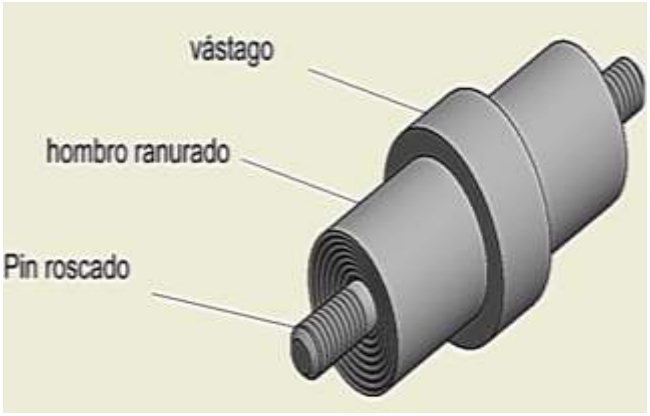


Figura 1.13. Geometría de la herramienta.

(Fuente: Fuente propia, 2018)

En la etapa de sumergida de la herramienta, el calentamiento resulta primordialmente de la fricción entre el pin y la pieza de trabajo, algunos calentamientos resultan de la deformación del material; la herramienta se sumerge hasta que el hombro toca la pieza de trabajo. La fricción entre el hombro y la pieza resulta ser el mayor elemento de generación de calor, el tamaño relativo del pin y del hombro es importante; las otras características de diseño no son tan críticas (Oliveros, 2017).

1.4.2. Avance y distancia de recorrido de la herramienta

En la tabla 1.4, se muestran distintos valores de velocidad de avance y la longitud recomendada del cordón de soldadura para cada tipo de pin.

Tabla 1.4. Avance y distancia de recorrido de la herramienta.

	Nivel 1	**Nivel 2**	**Nivel 3**	**Nivel 4**	**Nivel 5**	**Nivel 6**
Perfil del pin	Cilíndrico roscado	Cuadrado con ranuras	Cuadrado	Triangular	Cilíndrico recto	Cilíndrico cónico
Avance [mm/min]	15	30	45	60	60	60
Distancia de recorrido[mm]	50	100	150	200	200	200

(Fuente: K.Lenin & K.Pannerselvam, Septiembre 2012)

1.5. Definición de polímeros

Los polímeros son clasificados según su respuesta mecánica frente a temperaturas elevadas. Dentro de esta clasificación se han definido dos subdivisiones: los polímeros termoplásticos y termoestables.

1.5.1. Polímeros termoplásticos

Se ablandan al calentarse, en ciertas ocasiones se funden, y al contrario al enfriarse se endurecen. Normalmente se fabrican con aplicación simultánea de calor y de presión. A medida que el calor aumenta los enlaces moleculares se debilita esto facilita el movimiento relativo de las cadenas adyacentes al aplicar un esfuerzo. La degradación irreversible se produce cuando la temperatura de un termoplástico fundido se eleva hasta el punto de que las vibraciones moleculares son tan violentas que pueden romper los enlaces covalentes. Los termoplásticos son relativamente blandos y dúctiles. La mayoría de los polímeros lineales y los que tienen estructuras ramificadas con cadenas flexibles son termoplásticos (William D. Callister, 2007).

1.5.1.1. Polietileno (PE)

El PE es un polímero termoplástico semicristalino, sinterizado a partir de etileno (CH_2 =CH_2) como monómero principal. Es de cadena flexible y tiene una regularidad estructural relativamente alta, el cual es el resultado de ser un polímero semicristalino. Tiene una alta resistencia química, no reacciona fácilmente con los ácidos, bases o sales. Existen varios tipos de PE según su distribución molecular (ver figura 1.14), los cuales se clasifican según la densidad típica que presentan, propiedad que resulta ser proporcional a la cristalinidad del PE. Tenemos el polietileno de baja densidad (PEBD), polietileno lineal de baja densidad (PELBD) y el polietileno de alta densidad (PEAD) (Santaella, 2012).

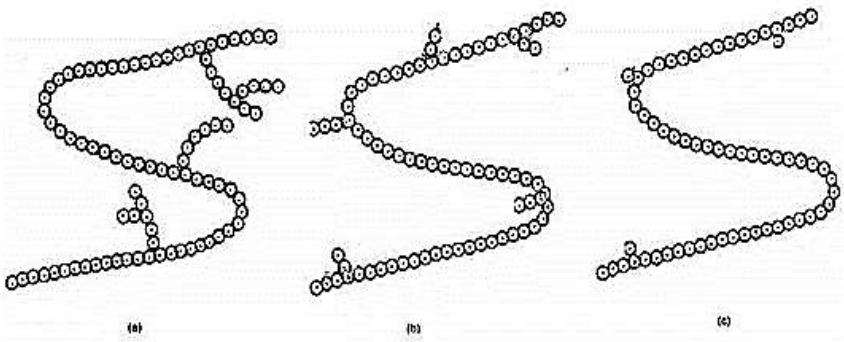


Figura 1.14. Estructura molecular del polietileno. a) PEBD b) PELBD c) PEAD.

(Fuente: Santaella, 2012)

El polietileno de alto peso molecular es un plástico que no absorbe humedad, tiene una gran resistencia química y un bajo coeficiente de rozamiento, lo cual le hace un material apto para el contacto con alimentos. La diferencia ente las estructuras moleculares del polietileno, radica en su peso molecular, el cual proporciona una mayor resistencia y mejor mecanización. El material ha sido comprobado según los requisitos de USP clase VI y es fisiológicamente inofensivo.

En la tabla 1.5, se mencionan las propiedades mecánicas más relevantes del polietileno, así como, algunos de los métodos de prueba estandarizados, los mismos que proporcionan parámetros para diferenciar el polietileno de alto peso molecular de sus otras variedades de polietileno.

Tabla 1.5. Características mecánicas del polietileno.

Características mecánicas	Método/Prueba (DIN/ASTM)	Valor	Unidad
Densidad	53479	0.95	g/cm^3
Resistencia a la tracción	53455	28	g/cm^3
Resistencia a la rotura por alargamiento	53455	800	%
Módulo de elasticidad a la tracción	53457	900	MPa
Dureza Shore D	53505	65	
Resistencia al impacto	53453	s.r.	kJ/m^2
Coeficiente de fricción	-	0.20	-

(Fuente: Sanmetal, 2017)

1.5.1.2. Poliamida PA-66

La poliamida PA-66 es un polímero semicristalino de ingeniería ampliamente utilizado, caracterizado por una excelente combinación de propiedades tales como: fácil procesamiento, buena resistencia a la tensión y resistencia a los solventes. Sin embargo, se vuelve bastante frágil cuando se seca y absorbe agua fácilmente, lo que deteriora sus propiedades mecánicas y estabilidad dimensional (Besco, Lorenzetti, Roso, & Modesti, 2011).

En la tabla 1.6, se mencionan algunas de las propiedades mecánicas de la poliamida PA-66, así como, los métodos de prueba que se encuentran regulados para este tipo de material y en general los polímeros.

Tabla 1.6. Características mecánicas de la poliamida PA-66.

Características mecánicas	Método/Prueba (DIN/ASTM)	Seco	Húmedo	Unidad
Densidad	53479	1.14	-	g/cm^3
Elongación en punto de fluencia	53455	90.00	70	MPa
Resistencia al desgarre	53455	-	-	MPa
Resistencia a la rotura por alargamiento	53455	40.00	150	%
Módulo de elasticidad a la tracción	53455	3300.00	2000	MPa
Módulo de elasticidad a la flexión	53455	-	-	MPa
Dureza Brinell	53456	170.00	100	MPa
Resistencia al impacto	53453			kJ/m^2
Resistencia a la fluencia tras 1000 h. de carga estática	-	55.00	-	MPa
Resistencia al alargamiento, por 1% tras 1000 horas.	-	8.00	-	MPa
Coeficiente de fricción contra acero endurecido y afilado p=0.05 N/mm^2,v=0.6m/s	-	0.35-0.42	-	-
Desgaste por fricción, en las mismas condiciones	-	0.90	-	m/km

(Fuente: Sanmetal, 2017)

1.5.2. Polímeros termoestables

Se endurecen al calentarse y no se ablandan al incrementar la temperatura. Al iniciar el tratamiento térmico se origina entrecruzamientos covalente entre cadenas moleculares contiguas. Estos enlaces dificultan los movimientos de vibración y de rotación de las cadenas a elevadas temperaturas. Solo el calentamiento a temperaturas excesivamente altas causa rotura de estos enlaces entrecruzados y por ende degradación del polímero.

Los polímeros termoestables generalmente son más duros, más resistentes y más frágiles que los termoplásticos y tienen mejor estabilidad dimensional. La mayoría de los polímeros entrecruzados y reticulados, como el caucho vulcanizado, los epoxis y las resinas fenólicas son termoestables (William D. Callister, 2007).

1.5.3. Características de los polímeros

Las propiedades del polímero como la resistencia a la tracción, la resistencia al impacto y la viscosidad del fundido con el peso molecular se indica en la figura 1.15. Las propiedades de resistencia aumentan rápidamente a medida que aumenta la longitud de la cadena y luego se nivela, pero la viscosidad del fundido continúa aumentando rápidamente. Los polímeros con pesos moleculares muy altos tienen propiedades mecánicas superiores, pero son difíciles de procesar y fabricar debido a sus altas viscosidades de fusión.

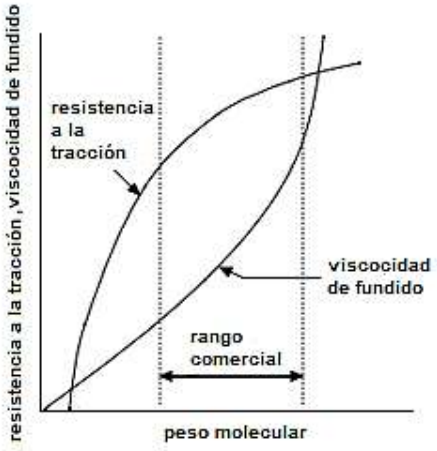


Figura 1.15. Resistencia al impacto vs. viscosidad de fundido.

(Fuente: Handbook, 2007)

1.5.3.1. Peso molecular de los polímeros

En compuestos químicos ordinarios tales como sacarosa, todas las moléculas son del mismo tamaño y, por lo tanto, tienen pesos moleculares idénticos (M). Se dice que tales compuestos son monodispersos. Por el contrario, la mayoría de los polímeros son polidispersos. Por lo tanto, un polímero no contiene moléculas del mismo tamaño y, por lo tanto, no tiene un solo peso molecular. De hecho, un polímero contiene una gran cantidad de moléculas, algunas grandes, otras pequeñas. Por lo tanto, existe una variación en el tamaño y peso molecular, conocido como distribución de peso molecular (MWD), en cada sistema polimérico, y esta MWD determina en cierta medida el comportamiento general de los polímeros. Dado que un polímero consiste en moléculas de diferentes tamaños y pesos, es necesario calcular un peso molecular promedio o un grado promedio de polimerización. Los pesos moleculares comúnmente usados en la caracterización de un polímero polidisperso son el promedio en número, el promedio ponderado y el promedio de viscosidad (Handbook, 2007).

2. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe en orden cronológico todas las actividades realizadas en este estudio, las cuales se detallan brevemente a continuación:

- Caracterización de los materiales, el cual se lo realizó en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros de la Escuela Politécnica Nacional, para determinar la autenticidad de los polímeros a ser usados.
- Diseño y construcción de la herramienta con hombro estacionario para la soldadura por fricción-agitación (FSW), para lo cual se consideraron geometrías que faciliten el proceso de soldadura, de acuerdo a la bibliografía.
- Elaboración de las probetas rectangulares y circulares necesarias para este estudio, las cuales se realizaron mediante procesos de arranque de viruta.
- Determinación de los parámetros de soldadura para que los cordones obtenidos en cada uno de los procesos cumplan con los requerimientos necesarios para ser evaluados mediante los ensayos propuestos, esto se lo realizó en base a la experimentación previa.
- Preparación de las máquinas de soldadura por fricción (FRW) y fricción-agitación (FSW).

Se realizaron pruebas experimentales y soldaduras finales, los datos que se obtuvieron de cada soldadura se tabularon para realizar la comparación de los procesos de soldadura FSW y FRW. Para determinar el método más factible de soldadura en estos polímeros se realizó el análisis de resultados que se obtuvieron de los ensayos no destructivos y ensayos destructivos realizados a las probetas.

2.1. Caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales se realizó en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP), perteneciente a la Escuela Politécnica Nacional y confirmó que son los materiales empleados dentro de este estudio. El informe completo se encuentra en el ANEXO I.

En las figuras 2.16 y 2.17, se identifican las temperaturas de transición vítrea, ablandamiento y fusión para la poliamida PA-66 y el polietileno de alto peso molecular.

Temperatura de transición vítrea: es la temperatura en donde se determina el estado de las zonas amorfas. Cuando el polímero es enfriado por debajo de esta temperatura en las zonas amorfas se vuelve rígidas y quebradizas y al incrementar su temperatura hasta T_g o por encima, se vuelven cada vez más blandas (Pineda, 2009).

Temperatura de ablandamiento: es la temperatura de utilización de los polímeros y las zonas amorfas, al estar por encima de T_g, se encuentran en movimiento permitiendo la transformación de la energía cinética en energía calorífica, que se incrementa debido a los esfuerzos cortante originados (energía mecánica). Este incremento de energía ayuda a que se origine la fusión parcial de los cristales, originando el fenómeno de ablandamiento (Pineda, 2009).

Las normas ASTM D1525 y la ISO 306 son las que tabulan las temperaturas de ablandamiento Vicat para plásticos.

Temperatura de fusión: ocurre cuando las cadenas poliméricas abandonan sus estructuras cristalinas y se transforman en un líquido desordenado disminuyendo la viscosidad y al enfriarse haciendo frágiles y quebradizas (Pineda, 2009).

Tabla 2.7. Tabla de temperaturas de ablandamiento para los polímeros: polietileno de alta densidad y poliamida PA-66.

Temperatura / Material	Polietileno de alta densidad	Poliamida PA-66
Temperatura de transición vítrea T_g[°C]	-90	57
Temperatura de ablandamiento [°C]	120.50 - 130	198.33 - 252.22
Temperatura de fusión T_m[°C]	142.50	258.60

(Fuente: Propia, 2018)

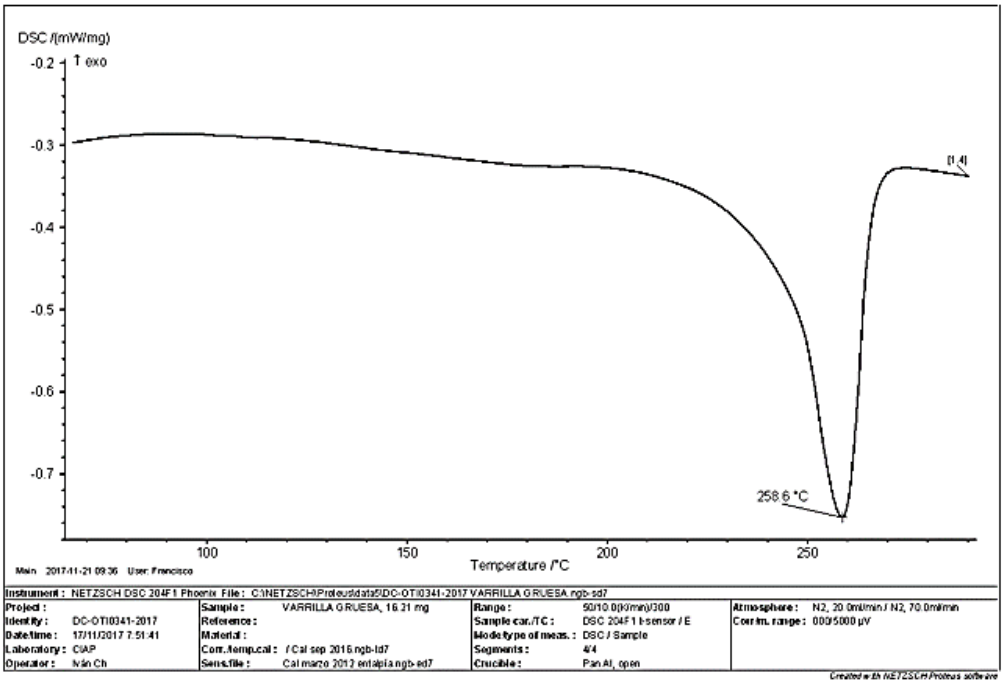


Figura 2.16. La muestra Varilla gruesa tiene las bandas de absorción características de una poliamida 3300, 1629 y 1530 cm^{-1}, por el punto de fusión el material es una Poliamida PA- 66.

(Fuente: CIAP-EPN)

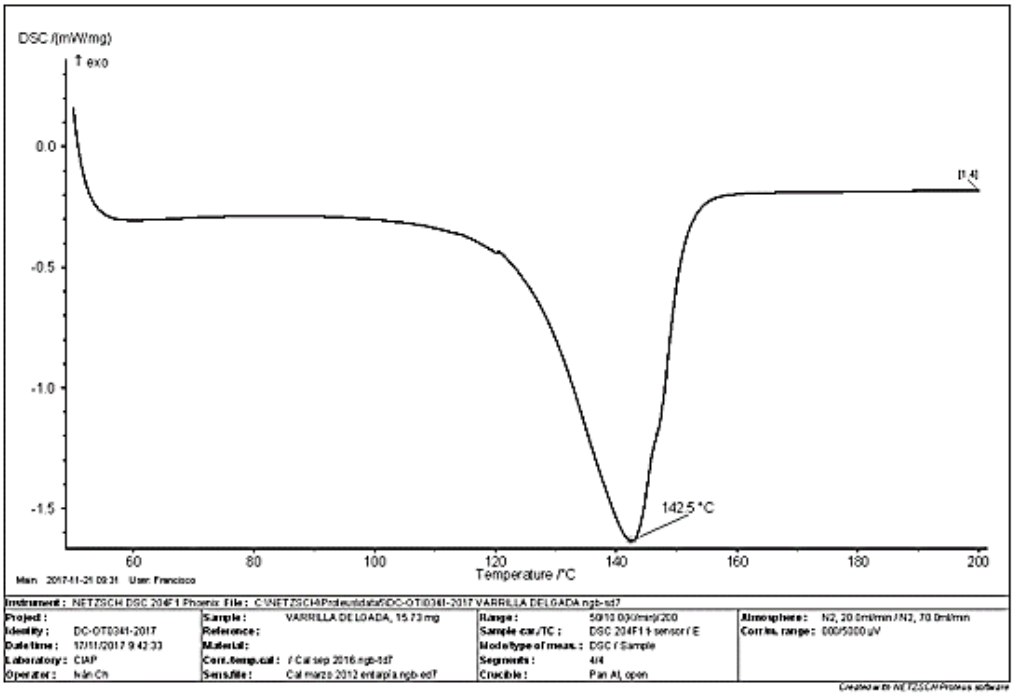


Figura 2.17. Identificación.-La muestra Varilla delgada tiene las bandas de absorción características de una polietileno 2920, 1470 y 730-720 cm-1, por el punto de fusión el material corresponde a un Polietileno de alta densidad (PEAD) o a un Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular.

(Fuente: CIAP-EPN)

2.2. Diseño de la herramienta rotatoria

2.2.1. Aspectos considerados en el diseño de la herramienta

Para el diseño de la herramienta rotatoria se consideró como aspectos fundamentales los siguientes: material, diámetro del vástago, diámetro del hombro, diámetro del pin, longitud del pin.

2.2.2. Material

Para diseñar la herramienta es muy importante conocer el material del cual se va a construir. En nuestro estudio se eligió un acero de herramientas SAE 4340 bonificado por su dureza, posibilidad de realizar un tratamiento térmico, maquinable y de bajo costo. En la tabla 2.8 de acuerdo con la norma DIN 17200 rep. SEW 550 el acero tiene las siguientes características:

Tabla 2.8. Características de acuerdo con la norma DIN.

AISI/SAE	4340
DIN	34CrNiMo6
Dureza de suministro	270-330HB

(Fuente: Importcom, 2015)

Tabla 2.9. Composición química del acero SAE 4340.

Composición química %								
AISI/SAE 4340	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Ni**	**Cr**	**Mo**
	0.35-0.40	0.20-0.35	0.60-0.80	0.04	0.04	1.65-2	0.70-0.90	0.20-0.30

(Fuente: Importcom, 2015)

Tabla 2.10. Propiedades mecánicas del acero SAE 4340.

Propiedades mecánicas	
Resistencia a la tracción	90-110 $\frac{kg}{mm^2}$
Esfuerzo de cedencia	70 $\frac{kg}{mm^2}$
Elongación	min 12 %
Reducción de área	min 45 %
Resistencia al impacto	aproximadamente 20 J
Dureza de suministro	270-330 HB

(Fuente: Importcom, 2015)

Posteriormente en base a la experimentación se optó por cambiar el tipo de material para la soldadura del polietileno a un acero rápido HSS S630 de dureza de aproximadamente 62 Rockwell C (HRC), los cuales son más conocidos como aceros de alta velocidad por sus siglas en inglés High Speed Steel. Para la fabricación de este tipo de acero se realizan una serie secuencial de tratamientos térmicos los cuales se detallan en la figura 2.18.

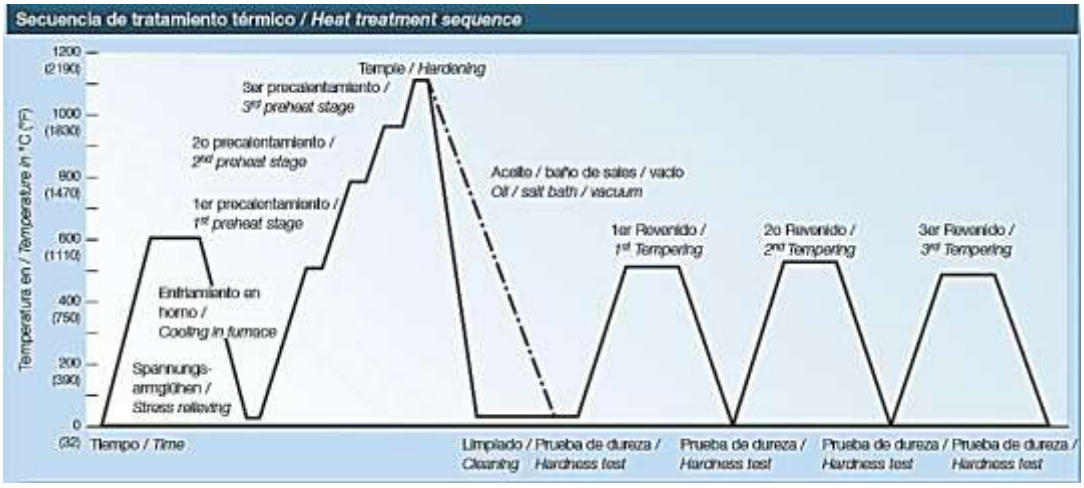


Figura 2.18. Recomendaciones de secuencia para el tratamiento térmico del acero HSS S630.

(Fuente: BÖHLER, 2015)

Tabla 2.11. Composición química del acero HSS S630.

Composición química %						
Elementos	**C**	**Al**	**Cr**	**Mo**	**V**	**W**
ACERO HSS S630	0.95	0.50	4.00	4.00	2.00	4.00

(Fuente: ERASTEEL, 2016)

2.2.3. Diámetro del vástago

El diámetro del vástago depende de la boquilla de sujeción en el cual se coloca la herramienta. Los diámetros más utilizados son de 5/16", ¼", 3/16", 1/8", ½", 5/8", ¾" y 1".La figura 2.19, permite observar los diferentes diámetros de vástagos con los que cuenta la fresadora.

Figura 2.19. Diámetros de vástagos que pueden ser usados en la fresadora.

(Fuente: Propia, 2018)

2.2.4. Selección del diámetro del hombro y del pin

El diámetro del hombro comúnmente a nivel industrial es 2.5 a 3 veces el espesor de las placas a soldar y el diámetro del pin corresponde aproximadamente a 1/3 del diámetro del hombro. La tabla 2.12 corresponde a las medidas aproximadas para seleccionar los diámetros del hombro y del pin:

Tabla 2.12. Diámetros del hombro y pin aproximados.

Espesor de la placa e_{pla} [mm]	**Diámetro del hombro** D_h [mm]		**Diámetro del pin** D_{pin} [mm]		**Relación hombro-pin**	
	2.5 veces e_{pla}	3 veces e_{pla}	$\frac{1}{3} D_h$		$\frac{D_h}{D_{pin}}$	
10	25	30	8	10	3.13:1	3:1
6	15	18	5	6	3:1	3:1
4	10	12	3	4	3.3:1	3:1

(Fuente: Gutiérrez, 2016)

Para la realización del trabajo experimental la tabla 2.12 recomienda que, para una placa de 10 mm el diámetro del hombro debe ser de 25 mm y el diámetro del pin de 8 mm, pero debido a las características del material y el espesor de la placa estos valores pueden ir cambiando.

2.2.5. Longitud del pin

La longitud del pin corresponde aproximadamente al espesor de las placas a soldar. Para una mejor soldadura la longitud debe ser 0.2 mm menor que el espesor de las placas.

En la siguiente tabla 2.13 está especificado la longitud del pin para tres diferentes espesores.

Tabla 2.13. Longitud del pin para diferentes espesores.

Espesor de la placa e_{pla} [mm]	**Longitud del pin** L_{pin}[mm]
10	9.80
6	5.80
4	3.80

(Fuente: Gutiérrez, 2016)

La tabla 2.13 sugiere que, para una placa de 10 mm de espesor se elija una longitud del pin de 9.8 mm, esta longitud se la ha establecido en estudios previos, sin embargo, dependerá de las características y espesor del material.

2.2.6. Características del hombro y del pin

2.2.7. Hombro

El hombro de la herramienta está diseñado de acuerdo a las características del material y a los experimentos realizados en diferentes materiales, su función es calentar por medio de la fricción la superficie de la placa, y producir una especie de forja necesaria para la soldadura y ayudar a que el material plastificado siga una misma trayectoria (Gutiérrez, 2016).

Concavidad

Hombro cóncavo: Produce buena calidad de soldadura, el diseño es sencillo para maquinar.

Hombro convexo: No produce buenos resultados debido a que el material se aparta del paso del pin y también es necesario acoplar otra herramienta, además cumple con dos funciones.

- La primera función es realizar el confinamiento o acumulamiento del volumen del material calentado.
- La segunda función es agitar y mover el material. (Oliveros, 2017)

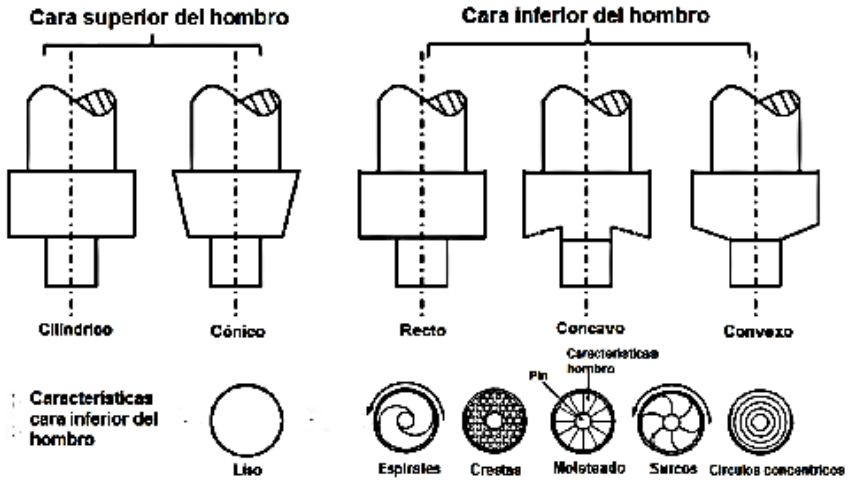


Figura 2.20. Formas y características del hombro

(Fuente: Gutiérrez, 2016)

2.2.7.1. Pin

El diseño del pin sirve para distribuir y mover el material fundido de las piezas en contacto de un lado para el otro, además produce la deformación y calor por fricción en los bordes de la placa a soldar (Gutiérrez, 2016). El diseño de un pin cilíndrico con rosca permitirá aumentar la velocidad de desplazamiento de la herramienta mediante el avance de la fresadora y cumple con dos funciones principales:

- Facilita el flujo de material plastificado.
- Genera aumento de calor por la fricción.

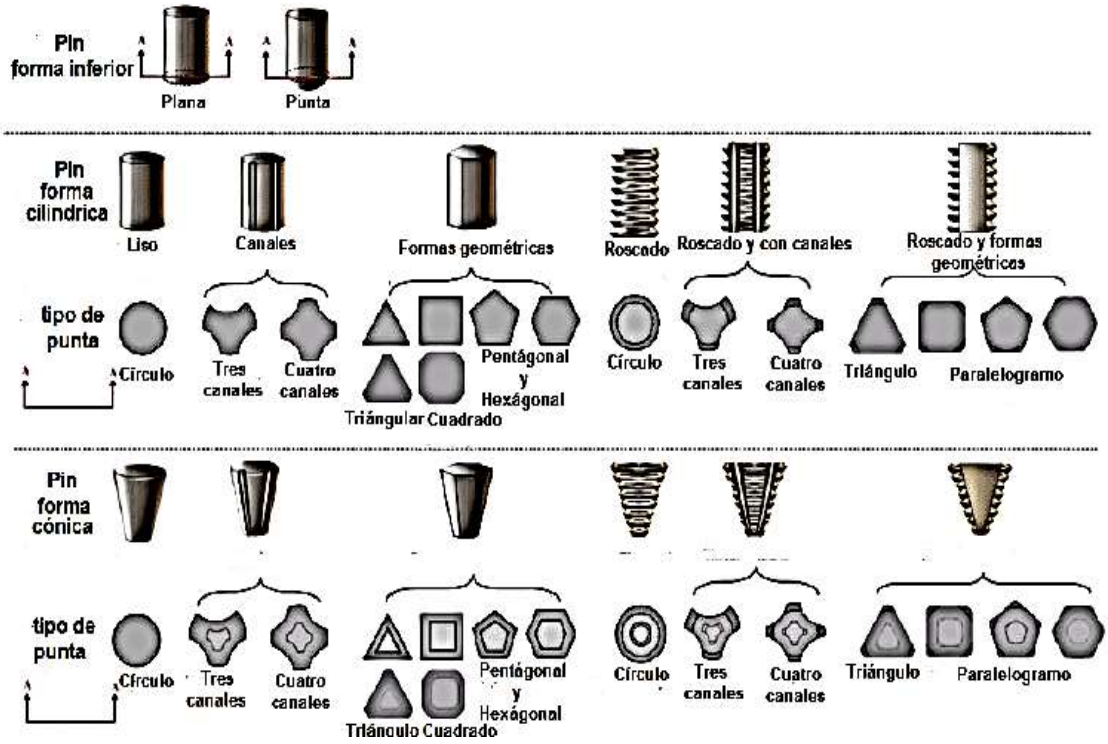


Figura 2.21. Formas y características del pin.

(Fuente: Gutiérrez, 2016)

2.3. Elaboración de las probetas

2.3.1. Probetas para la soldadura por fricción (FRW)

La elaboración de las probetas se realizó en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica, utilizando: el torno, entenalla, lijas número 400 y 200. Según las dimensiones especificadas por el constructor de la máquina de soldadura por fricción, para lo cual en un inicio se realizaron probetas de 85 [mm] de longitud y con tres diámetros para posteriormente seleccionar el diámetro adecuado para evaluar las dos soldaduras. Las probetas finales tienen una longitud de 80 [mm] de longitud, debido a la facilidad que presentan de extraer las probetas soldadas de la máquina. En las figuras 2.22 y 2.23, se pueden observar el procedimiento para la elaboración de las probetas.

Figura 2.22. Elaboración de las probetas para la soldadura por fricción.

(Fuente Propia, 2018)

Figura 2.23. Proceso de pulido de las probetas.

(Fuente Propia, 2018)

2.3.2. Probetas para la soldadura por fricción-agitación (FSW)

La elaboración de las probetas para la soldadura por fricción-agitación se realizó en el taller Tecno-Industrial, en la fresadora para lo cual se muestra el procedimiento de nivelación en la figura 2.24, paso previo a realizarse el refrentado para cada una de las probetas.

Figura 2.24. Nivelación de la entenalla para la elaboración de las probetas, con la ayuda de un reloj comparador.

(Fuente Propia, 2018)

Se realizó el refrentado horizontal en paquetes de cuatro placas sujetas a la entenalla y con una cuchilla direccionada por la fresadora previamente alineada y nivelada. Las placas fueron refrentadas con un avance automático de 20 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$. El resultado final se puede observar en la figura 2.25.

Figura 2.25. Refrentado horizontal de las probetas.

(Fuente Propia, 2018)

Posterior al refrentado longitudinal de las caras se realizó el refrentado vertical de las probetas, las cuales se sujetaron en la entenalla en paquetes de 3, obteniendo de esta forma un correcto acople de las probetas en la entenalla. Para terminar la fabricación de las probetas se realizó el desbaste con una broca direccionada por la fresadora, como se puede observar en la figura 2.26.

Figura 2.26. Refrentado vertical de las probetas.

(Fuente Propia, 2018)

2.4. Parámetros principales para la soldadura por fricción

En la soldadura por fricción los parámetros principales son los siguientes: diámetro del material, velocidad de rotación, encogimiento axial, presión y tiempo los cuales irán variando de acuerdo con el material a utilizarse.

2.4.1. Preparación de la máquina de soldadura por fricción

La máquina se encuentra dentro de las instalaciones del Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Es una máquina que permite realizar soldadura por fricción, para lo cual, se puede variar algunos parámetros como presión de forja y calentamiento, la medición del encogimiento se lo realiza de forma manual con un calibrador y el tiempo de calentamiento es tomado mediante un reloj o cronómetro que no es parte del equipo.

Antes de proceder a realizar la soldadura se debe verificar el estado de la máquina, así como el correcto funcionamiento de cada uno de sus componentes. Además, se debe leer las instrucciones de uso de la máquina de soldadura por fricción que se encuentran a un costado de la máquina. Las cuales las podemos observar en la figura 2.27.

Figura 2.27. Instrucciones de uso para la máquina de soldadura por fricción.

(Fuente Propia, 2018)

Posteriormente se procede a seleccionar las revoluciones de entre las tres disponibles, 2500, 4200 y 4900 rpm. La máquina cuenta con una cuarta revolución que es a 3100 rpm, pero debido a que en su polea se encuentra el perno de sujeción hacia el eje de la máquina esta no puede ser usada. En el caso de la figura 2.28, la máquina se encuentra trabajando a 2500 rpm. Hay que también poner énfasis en realizar una revisión previa del manómetro usado para medir la presión el cual se lo puede visualizar en la figura 2.29, la bomba hidráulica no debe presentar fugas. Una vez haya sido verificado cada uno de los parámetros citados anteriormente se procede a colocar las probetas en los mandriles de la máquina, para proceder a realizar la soldadura.

Figura 2.28. Regulación de la máquina de soldadura por fricción a 2500 rpm.

(Fuente Propia, 2018)

Figura 2.29. Manómetro y bomba hidráulica.

(Fuente Propia, 2018)

La parte estructural está conformada por dos mandriles, de los cuales uno se mantiene fijo y el otro es rotatorio, el funcionamiento consiste en aplicar una fuerza sobre la bomba hidráulica, la cual, ejercerá una presión sobre el mandril fijo y este se acercara paulatinamente hacia el mandril giratorio ejerciendo una presión y por lo tanto un calentamiento mediante el contacto por fricción entre las probetas. El tiempo de contacto debe provocar que los materiales lleguen a un punto de plasticidad para que estos al aplicar presión puedan ser soldados.

Se debe tomar muy en cuenta el frenado de la máquina y la escala de apreciación del manómetro, la cual es de 62.50 kgf/cm2. La presión de forja deber ser aplicada secuencialmente según el material de las probetas y la velocidad (rpm) con la que se está trabajando en la máquina.

2.5. Parámetros principales en la soldadura por fricción-agitación

En la soldadura por fricción-agitación los parámetros principales de soldeo son los siguientes: velocidad en rpm, diámetro de la rosca en mm, tiempo de soldeo en min, longitud soldada en mm, avance $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$.

2.5.1. Preparación de la máquina de soldadura por fricción-agitación

Para este caso especial se utilizó una fresadora universal semiautomática que se encuentra en un taller Tecno-Industrial de la ciudad de Quito. La fresadora universal semiautomática provee el movimiento de rotación a la herramienta rotatoria mediante su eje motriz, además, posee movimientos principales de trabajo los cuales son: movimiento de corte para la rotación de la herramienta, movimiento de avance para el desplazamiento de la pieza y el movimiento de profundidad de pasada para el desplazamiento vertical de pieza. Los mandos de la fresadora cumplen una función específica al momento de ser accionados, produciéndose el movimiento de los mecanismos o partes de la máquina. Se debe escoger tanto la velocidad (rpm), como el avance $\left[\frac{\text{mm}}{\text{min}}\right]$ mediante el mando selector de avances (figura 2.30), para realizar el proceso de soldadura de manera semiautomática.

Figura 2.30. Selección de avance de la fresadora mm/min.

(Fuente Propia, 2018)

La soldadura en el caso de FSW se produce como resultado del calor producido por la fricción y batido del material en estado pastoso generado por la herramienta rotatoria.

Para la correcta utilización de la fresadora universal se debe verificar que todos los sistemas con los que cuenta estén funcionando correctamente con la finalidad que el proceso de soldadura se realice sin ningún inconveniente. La máquina cuenta con velocidades que van desde 600 rpm hasta 3000 rpm las cuales se seleccionan de acuerdo con el material a utilizar.

2.6. Construcción de la herramienta

Previamente seleccionadas las dimensiones recomendadas en este estudio, se procedió a realizar el diseño en Inventor, con el objetivo de obtener los planos para la fabricación de las herramientas destinadas a usarse en el proceso de soldadura por fricción-agitación (ver ANEXO VII). En la tabla 2.14, se puede observar el diseño previo y las herramientas finales.

Tabla 2.14. Diseño y fabricación de las herramientas.

Diseño y fabricación de las herramientas	
Herramienta roscado M6 paso 1	**Herramienta roscada M8 paso 1**

(Fuente Propia, 2018)

La elaboración de la herramienta con hombro estacionario, se realizó en un taller metalmecánico, a través del uso del torno de precisión, fresadora y demás herramientas necesarias. En la figura 2.31, se puede observar una de las etapas de torneado de la herramienta con hombro estacionario.

Figura 2.31. Proceso de elaboración de la herramienta con hombro estacionario.

(Fuente Propia, 2018)

2.7. Procedimiento de la soldadura por fricción

2.7.1. Probetas para soldadura por fricción

Para preparación de las probetas se tomó en cuenta las limitaciones geométricas de la máquina y su diseño. “Se ha proyectado el diseño y construcción de un tipo de máquina que tenga la posibilidad de soldar probetas de acero de hasta 10 mm de diámetro y una longitud recomendada de 8 cm”. (Arguello, 1987)

2.7.2. Ubicación de las probetas en la máquina de soldadura por fricción

Para la correcta colocación de las probetas en la máquina de soldar se deben considerar los parámetros de diseño de ésta; se recomienda no dejar más de 10 mm de longitud libre de cada probeta. (Arguello, 1987). Una vez posicionadas las probetas se ejecuta la soldadura colocando las probetas en las mordazas y ajustándolas adecuadamente.

2.8. Pruebas preliminares

Las primeras pruebas se realizaron con probetas de 14 mm de diámetro, obteniendo buenos resultados en la soldadura, pero presentando complicaciones al momento de retirarlas de la máquina, razón por lo cual se decidió disminuir el diámetro de las probetas. A continuación, se tabulan en la tabla 2.15, los resultados obtenidos de los primeros ensayos.

Tabla 2.15. Tabla de los resultados obtenidos de los ensayos previos.

VELOCIDAD Vs. TIEMPO PROBETAS 14 mm DE DIÁMETRO								
N°	Velocidad [rpm]	F_prec [kg]	F_forja [kg]	P_calentamiento		P_forja		Tiempo_calent [s]
				psi	MPa	psi	MPa	
1	2500	125.00	437.50	1777.88	12.25	6222.56	42.88	8
2	2500	62.50	375.00	888.94	6.12	5333.63	36.75	10
3	2500	62.50	1500.00	888.94	6.12	21334.50	147.00	12
4	4200	62.50	1562.50	888.94	6.12	22223.44	153.13	8
5	4200	125.00	1500.00	1777.88	12.25	21334.50	147.00	10
6	4200	125.00	2500.00	1777.88	12.25	35557.50	245.00	12
7	4900	125.00	1375.00	1777.88	12.25	19556.63	134.75	8
8	4900	62.50	875.00	888.94	6.12	12445.13	85.75	10
9	4900	62.50	1437.50	888.94	6.12	20445.56	140.88	12

(Fuente Propia, 2018)

2.8.1. Soldadura por fricción Poliamida PA-66

La soladura por fricción de la poliamida PA-66 se realizó con las diferentes velocidades (rpm) con las que cuenta la máquina de soldadura por fricción del Laboratorio de Soldadura de la EPN. Para las pruebas iniciales se pudo observar que se produjo una buena unión entre las probetas, debido a que el calor generado por la fricción fue suficiente para conseguir su unión. Sin embargo por las condiciones de uso de la máquina de soldadura por fricción (FRW), se optó por utilizar probetas de: 10 mm de diámetro y 80 mm de longitud. A continuación, se tabulan en la tabla 2.16 los resultados obtenidos en los ensayos finales.

Tabla 2.16. Tabla de datos de la soldadura en la Poliamida PA-66.

VELOCIDAD Vs. TIEMPO PROBETAS 10 mm DE DIÁMETRO								
N°	Velocidad [rpm]	F_prec [kg]	F_forja [kg]	P_calentamiento		P_forja		Tiempo_calent [s]
				psi	MPa	psi	MPa	
1	2500	62.50	312.50	888.93	6.12	4444.69	30.62	8
2	2500	62.50	375.00	888.93	6.12	5333.63	36.75	10
3	2500	125.00	500.00	1777.87	12.25	7111.50	49	12
4	4200	125.00	1500.00	1777.87	12.25	21334.50	147	8
5	4200	125.00	1312.50	1777.87	12.25	18667.69	128.62	10
6	4200	125.00	562.50	1777.87	12.25	8000.44	55.12	8
7	4900	62.50	375.00	888.93	6.12	5333.63	36.75	8
8	4900	62.50	375.00	888.93	6.12	5333.63	36.75	10
9	4900	62.50	500.00	888.93	6.12	7111.50	49	8

(Fuente Propia, 2018)

De los datos obtenidos y los parámetros que intervienen en la soldadura se obtienen las siguientes figuras que se utilizaron para evaluar los resultados.

Tabla 2.17. Tabla de datos de velocidad vs. tiempo.

VELOCIDAD [rpm]	T_calent [s]
2500	8
2500	10
2500	12
4200	8
4200	10
4200	8
4900	8
4900	10
4900	8

(Fuente Propia, 2018)

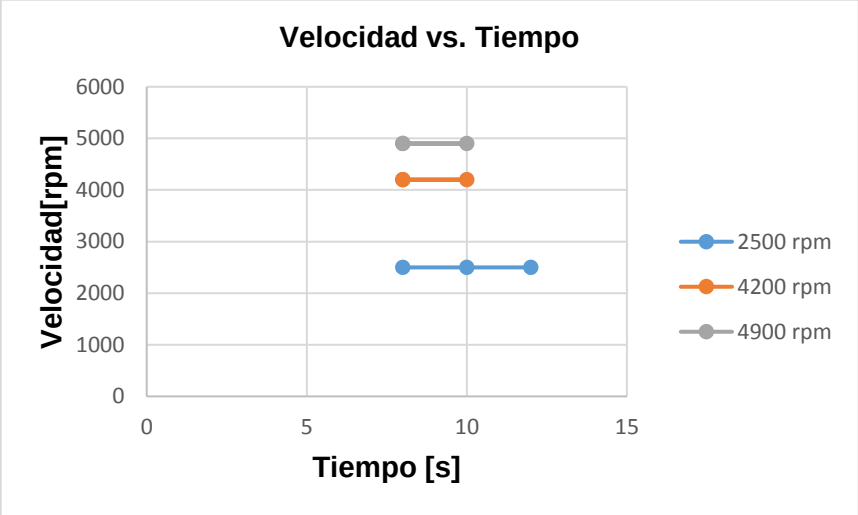


Figura 2.32. Velocidad vs. Tiempo (Poliamida PA-66).

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.18. Tabla de datos velocidad vs. Presión de calentamiento.

VELOCIDAD [rpm]	F_prec [kg]	P_calentamiento	
		psi	MPa
2500	62.50	888.93	6.12
2500	62.50	888.93	6.12
2500	125.00	1777.87	12.25
4200	125.00	1777.87	12.25
4200	125.00	1777.87	12.25
4200	125.00	1777.87	12.25
4900	62.50	888.93	6.12
4900	62.50	888.93	6.12
4900	62.50	888.93	6.12

(Fuente Propia, 2018)

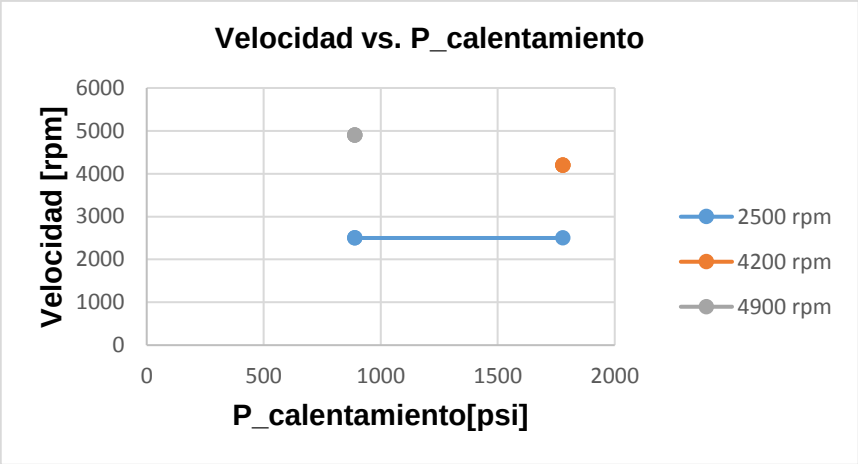


Figura 2.33. Velocidad vs. P_calentamiento (Poliamida PA-66).

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.19. Tabla de datos rpm vs. Presión de forja.

VELOCIDAD [rpm]	F_forja [kg]	P_forja	
		psi	MPa
2500	312.50	4444.69	30.62
2500	375.00	5333.63	36.75
2500	500.00	7111.50	49.00
4200	1500.00	21334.50	147.00
4200	1312.50	18667.69	128.62
4200	562.50	8000.44	55.12
4900	375.00	5333.63	36.75
4900	375.00	5333.63	36.75
4900	500.00	7111.50	49.00

(Fuente Propia, 2018)

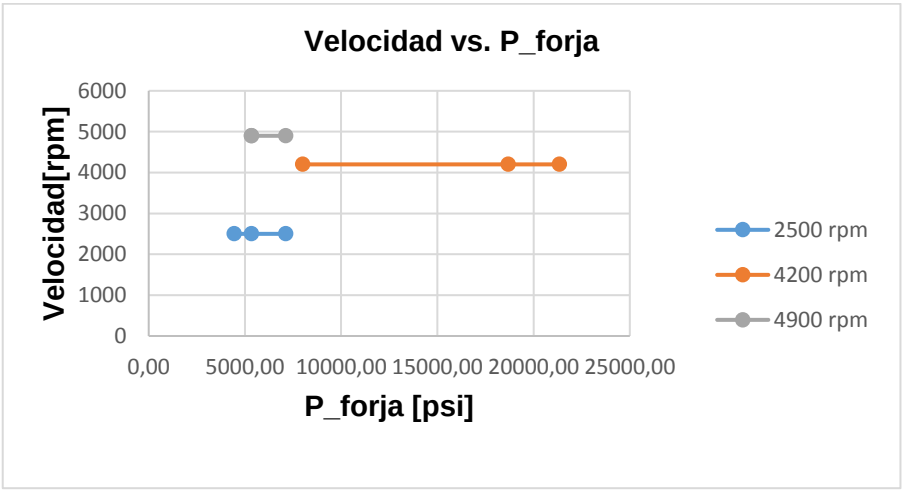


Figura 2.34. Velocidad vs. P_forja (Poliamida PA-66).

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.20. Tabla de datos encogimiento de las probetas soldadas.

Longitud inicial	Longitud final	Encogimiento
[mm]	[mm]	[mm]
160	156	4
160	155	5
160	153	7
160	152	8
160	155	5
160	156	4
160	155	5
160	152	8
160	157	3

(Fuente Propia, 2018)

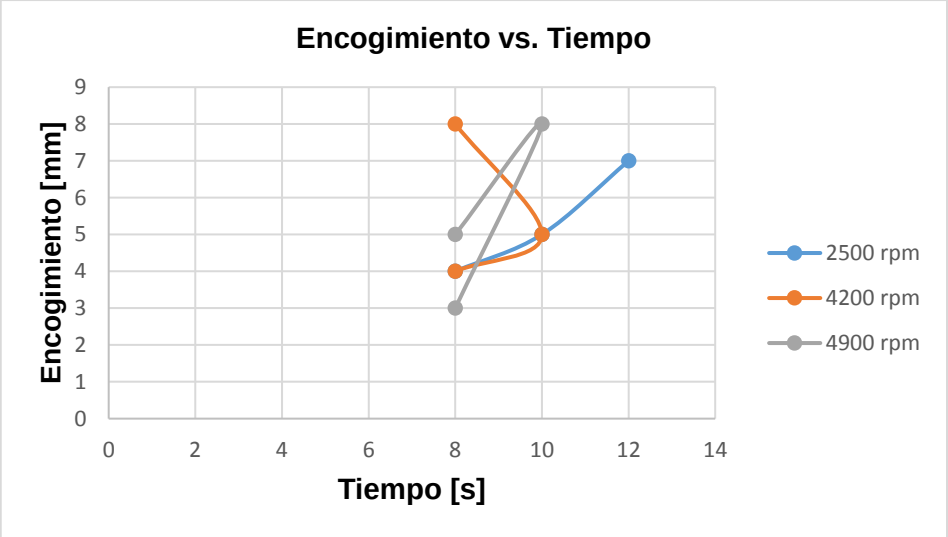


Figura 2.35. Encogimiento vs. Tiempo (Poliamida PA-66).

(Fuente Propia, 2018)

2.8.2. Soldadura por fricción del polietileno

La soladura por fricción del polietileno se realizó con las tres velocidades (rpm) que cuenta la máquina de soldadura por fricción del Laboratorio de Soldadura de la EPN, sin embargo en base a las pruebas iniciales se pudo observar que a 2500 revoluciones no se produce una soldadura entre las probetas, ya que la fricción que se genera no es la suficiente para alcanzar una temperatura de plastificación que permita realizar la soldadura, un caso similar ocurre a 4200 rpm, pues la fricción desprende material evitando que alcance de esta forma una temperatura para realizar la forja. Por lo antes descrito, se procedió a realizar la soldadura a 4900 rpm, velocidad (rpm) que permitió

obtener una soldadura en los ensayos previos. Las probetas finales se tabulan en la tabla 2.21.

Tabla 2.21. Tabla de datos de la soldadura del Polietileno.

VELOCIDAD Vs. TIEMPO probetas 10 mm de diámetro								
N°	VELOCIDAD [rpm]	F_prec [kg]	F_forja [kg]	P_calentamiento		P_forja		Tiempo_calent [s]
				psi	MPa	psi	MPa	
1	4900	62.50	187.50	888.94	6.12	2666.81	18.38	21
2	4900	62.50	125.00	888.94	6.12	1777.88	12.25	23
3	4900	62.50	62.50	888.94	6.12	888.94	6.13	26
4	4900	62.50	187.50	888.94	6.12	2666.81	18.38	17
5	4900	62.50	62.50	888.94	6.12	888.94	6.13	18
6	4900	62.50	125.00	888.94	6.12	1777.88	12.25	10

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.22. Tabla de datos de velocidad vs. tiempo.

VELOCIDAD [rpm]	Tiempo_calent [s]
4900	21
4900	23
4900	26
4900	17
4900	18
4900	10

(Fuente Propia, 2018)

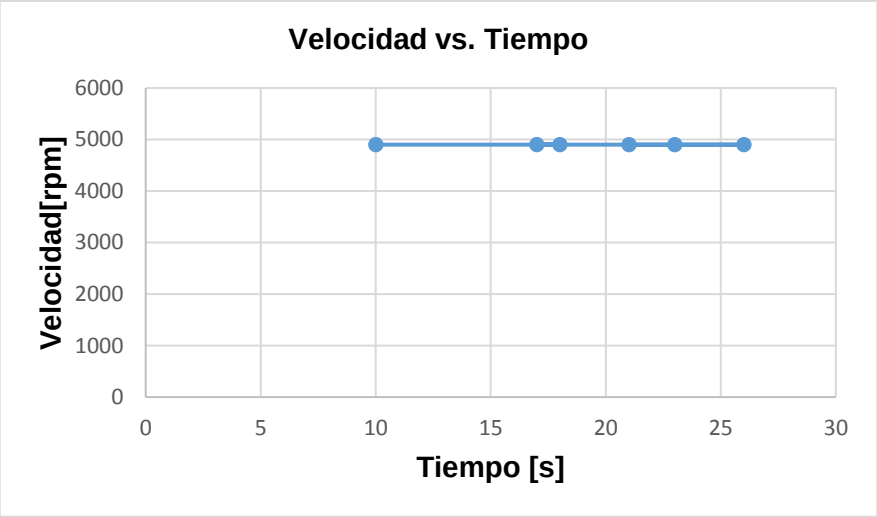


Figura 2.36. Velocidad vs. Tiempo (Polietileno).

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.23. Tabla de datos velocidad vs. Presión de calentamiento.

VELOCIDAD [rpm]	P_calentamiento	
	psi	MPa
4900	888.94	6.12
4900	888.94	6.12
4900	888.94	6.12
4900	888.94	6.12
4900	888.94	6.12
4900	888.94	6.12

(Fuente Propia, 2018)

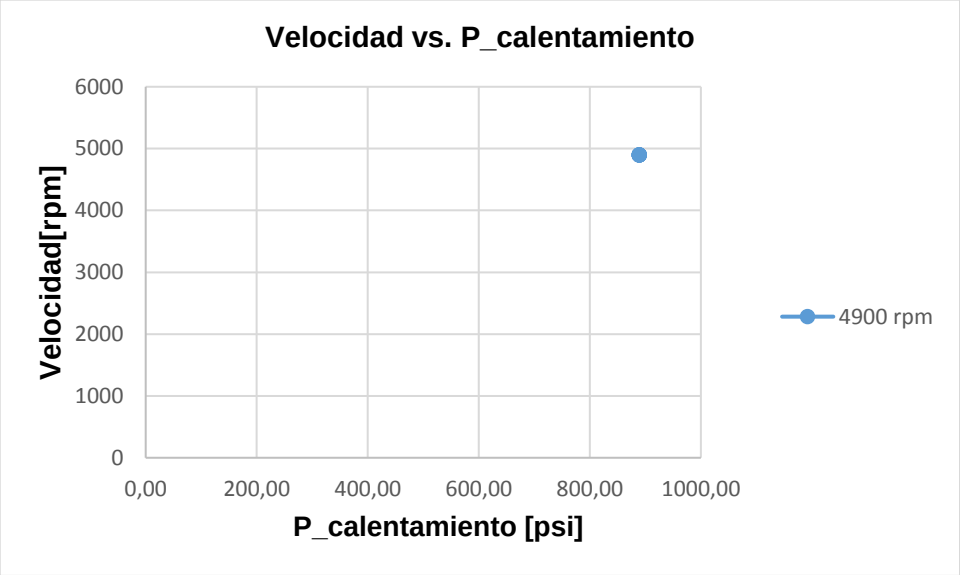


Figura 2.37. Velocidad vs. P_calentamiento (Polietileno).

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.24. Tabla de datos velocidad vs. Presión de forja.

VELOCIDAD [rpm]	P_forja	
	psi	MPa
4900	2666.81	18.38
4900	1777.88	12.25
4900	888.94	6.13
4900	2666.81	18.38
4900	888.94	6.13
4900	1777.88	12.25

(Fuente Propia, 2018)

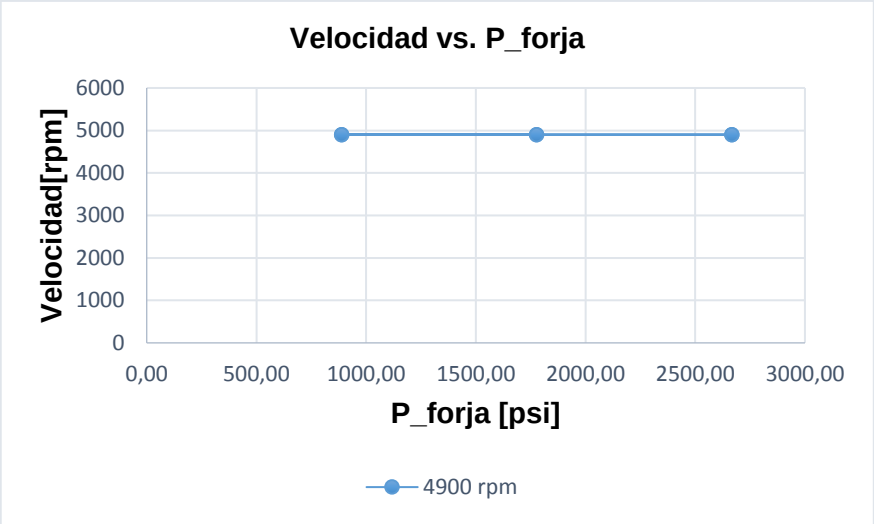


Figura 2.38. Velocidad vs. P_forja (Polietileno).

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.25. Tabla de datos encogimiento de las probetas soldadas.

Longitud inicial	Longitud final	Encogimiento
[mm]	[mm]	[mm]
160	146	14
160	153	7
160	154	6
160	152	8
160	155	5
160	157	3

(Fuente Propia, 2018)

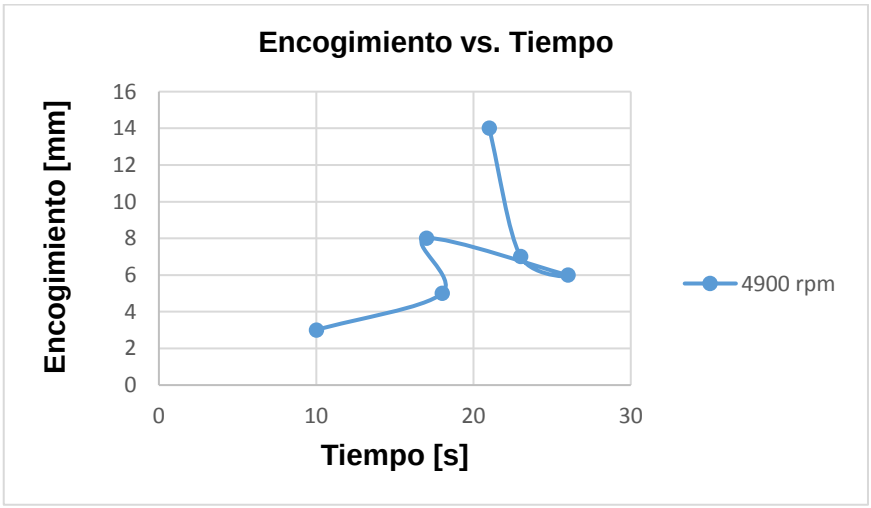


Figura 2.39. Encogimiento vs. Tiempo (Polietileno).

(Fuente Propia, 2018)

2.9. Procedimiento de la soldadura por fricción-agitación

2.9.1. Ubicación de las probetas en la máquina de soldadura por fricción-agitación

Las probetas deben ser fijadas a tope sobre la mesa de la fresadora procurando que la separación entre ellas sea la mínima y para evitar posibles vibraciones e incluso desplazamientos al momento de entrar en contacto la herramienta con las superficies a soldar, por lo tanto se deben usar accesorios de sujeción (bridas o calzos), para de esta manera obtener buenas soldaduras. Es importante mencionar que se debe colocar placas como base para evitar el contacto entre la herramienta y la mesa de la fresadora, tal como se puede observar en la figura 2.40.

Figura 2.40. Colocación de las probetas en la máquina fresadora.

(Fuente Propia, 2018)

2.9.2. Pruebas preliminares

Las primeras soldaduras se realizaron con velocidades (rpm) altas y velocidades de avance bajas. Así, se dedujo que para una buena penetración el hombro debe rozar la placa con velocidades entre 1500-2000 rpm y un avance semiautomático regulado por el calentamiento inicial entre las superficies de la herramienta y las placas, para los dos materiales. Los ensayos se tabulan en las tablas 2.26 y 2.27, para el polietileno y

poliamida respectivamente. Los mismos que ayudarán a obtener los parámetros para la soldadura y las probetas finales.

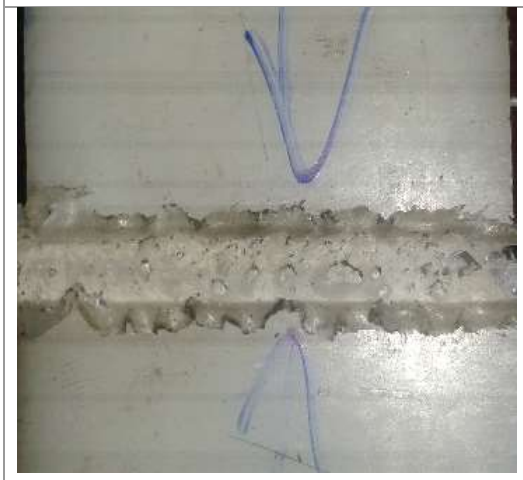
Tabla 2.26. Pruebas preliminares para la soldadura del Polietileno.

ENSAYO 1		
	Rpm:	1200
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:5:10
	Desplazamiento:	100 mm
	Avance:	20 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	4.7 mm
	Material:	Polietileno
ENSAYO 2		
	Rpm:	1500
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:1:15
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	45 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	4.7 mm
	Material:	Polietileno
ENSAYO 3		
	Rpm:	2000
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:1:55
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	32 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	4.7 mm
	Material:	Polietileno

ENSAYO 4		
	Rpm:	1800
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:2:10
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	25 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	4.7 mm
	Material:	Polietileno
ENSAYO 5		
	Rpm:	1500
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:1:40
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	35 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	3.175 mm
	Material:	Polietileno
ENSAYO 6		
	Rpm:	1800
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:3:20
	Desplazamiento:	100 mm
	Avance:	31 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	2.35 mm
	Material:	Polietileno

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.27. Pruebas preliminares para la soldadura de la poliamida PA-66.

ENSAYO 1		
	Rpm:	1500
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:2:56
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	20 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	8 mm
	Material:	Poliamida PA-66
ENSAYO 2		
	Rpm:	1500
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:3:35
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	15 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	6 mm
	Material:	Poliamida PA-66
ENSAYO 3		
	Rpm:	1800
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:2:10
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	25 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	6 mm
	Material:	Poliamida PA-66

ENSAYO 4

Rpm:	1800
Profundidad:	10 mm
Tiempo:	00:3:30
Desplazamiento:	50 mm
Avance:	15 mm/min
Diámetro de la herramienta:	6 mm
Material:	Poliamida PA-66

ENSAYO 5

Rpm:	2000
Profundidad:	10 mm
Tiempo:	00:3:30
Desplazamiento:	50 mm
Avance:	15 mm/min
Diámetro de la herramienta:	6 mm
Material:	Poliamida PA-66

ENSAYO 6

Rpm:	2000
Profundidad:	10 mm
Tiempo:	00:2:50
Desplazamiento:	50 mm
Avance:	20 mm/min
Diámetro de la herramienta:	6 mm
Material:	Poliamida PA-66

(Fuente Propia, 2018)

2.9.3. Resultados finales de la soldadura por fricción-agitación

Con los resultados que previamente se obtuvieron en los ensayos para determinar las condiciones necesarias para realizar el proceso de soldadura, se procedió a realizar la soldadura con los parámetros que mejor se adaptan a las condiciones y propiedades de cada material.

Las tablas 2.28 y 2.29, muestran los resultados de las soldaduras finales para el polietileno y poliamida PA-66 respectivamente. Se presentó una ligera variación entre las velocidades de soldadura para la poliamida PA-66 y polietileno, debido a la diferencia en las temperaturas de ablandamiento y propiedades mecánicas.

Tabla 2.28. Resultados de las soldaduras finales para el Polietileno.

PROBETA 1		
	Rpm:	1500
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:02:45
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	29 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	3.15 mm
	Material:	Polietileno
PROBETA 2		
	Rpm:	1800
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:02:25
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	22 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	3.15 mm
	Material:	Polietileno

PROBETA 3		
	Rpm:	2000
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:3:30
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	17 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	3.15 mm
	Material:	Polietileno

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.29. Resultados de las soldaduras finales para la Poliamida PA-66.

PROBETA 1		
	Rpm:	1500
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:3:30
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	15 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	6 mm
	Material:	Poliamida PA-66
PROBETA 2		
	Rpm:	1600
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:3:30
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	15 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	6 mm
	Material:	Poliamida PA-66

PROBETA 3		
	Rpm:	1800
	Profundidad:	10 mm
	Tiempo:	00:3:30
	Desplazamiento:	50 mm
	Avance:	15 mm/min
	Diámetro de la herramienta:	6 mm
	Material:	Poliamida PA-66

(Fuente Propia, 2018)

2.10. Ensayos

Los ensayos se realizaron para determinar la calidad del proceso, a través de la evaluación de las características obtenidas en las probetas, de esta manera se puede validar o rechazar los resultados. Estos ensayos se encuentran ya definidos y sus resultados son comparados con normas establecidas, que ayudan a dar una interpretación correcta de los resultados.

2.10.1. Ensayos no destructivos

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Se realizaron ensayos de inspección visual y tintas penetrantes en las probetas. En primera instancia el ensayo en tintas se realizó con tintas convencionales. Debido a las propiedades del material, estas tinturaron la superficie, razón por la cual se decidió usar tintas fluorescentes, y de esta manera se obtuvo una mejor apreciación de las discontinuidades, y los resultados se encuentran en el ANEXO IV.

A continuación se ilustra y detalla el proceso, realizando una breve descripción de cada uno de los pasos a seguir:

a. Limpiar las superficies de las probetas a ensayar con un diluyente (thinner), para eliminar la suciedad.

Figura 2.41. Limpieza de las superficies.

(Fuente Propia, 2018)

b. Aplicar el CLEANER con un paño frotando en una sola dirección para dejar lista la superficie donde se aplicará el penetrante.

Figura 2.42. Aplicación del CLEANER.

(Fuente Propia, 2018)

c. Aplicar el líquido penetrante de 10 a 15 min para obtener la penetración necesaria; si es necesario aplicar el revelador por aproximadamente 5 min.

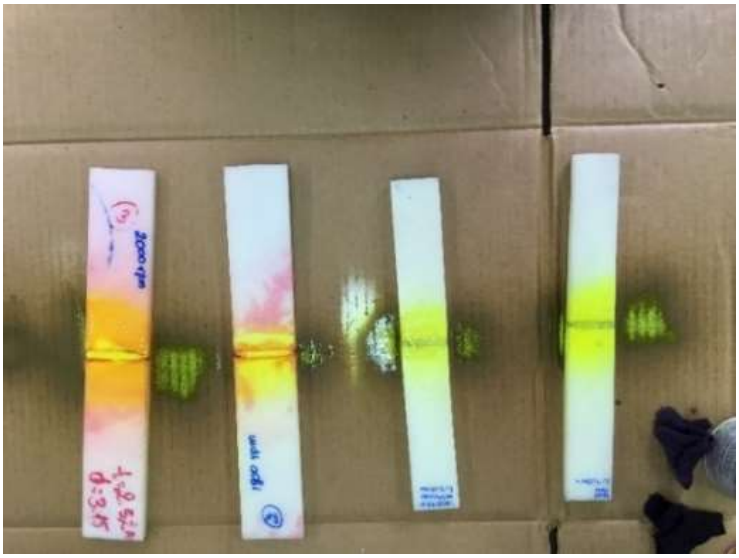


Figura 2.43. Aplicación de la tinta fluorescente.

(Fuente Propia, 2018)

d. Limpiar el penetrante con un chorro de agua inclinando la probeta.

Figura 2.44. Aplicación del chorro de agua.

(Fuente Propia, 2018)

e. Inspeccionar las probetas en el cuarto obscuro, dirigiendo la luz led perpendicularmente hacia el cordón de soldadura.

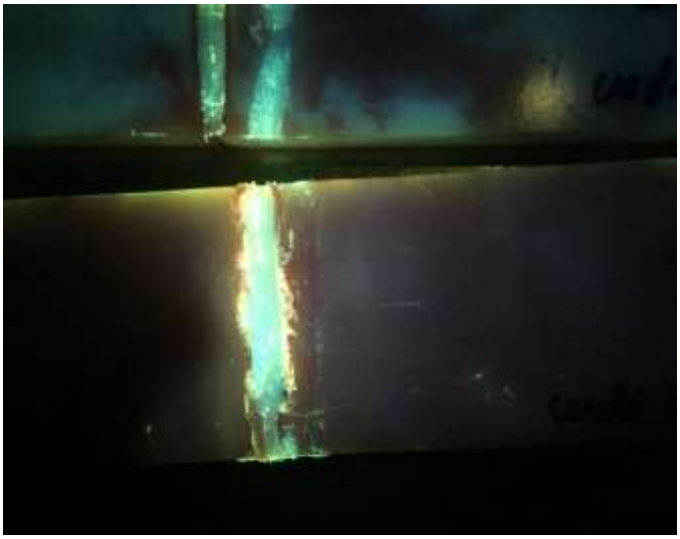


Figura 2.45. Visualización de las discontinuidades en amarillo fluorescente para el polietileno.

(Fuente Propia, 2018)

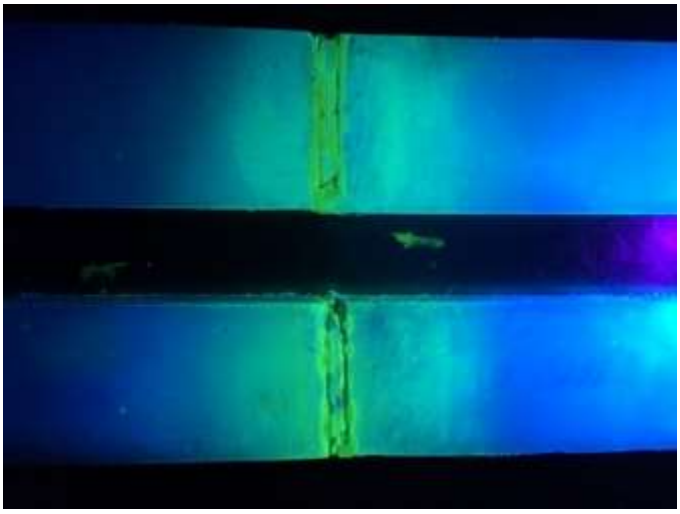


Figura 2.46. Visualización de las discontinuidades en verde fluorescente para la Poliamida PA-66.

(Fuente Propia, 2018)

2.11. Ensayos destructivos

2.11.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la EPN, en donde se escogieron tres probetas rectangulares y circulares para someterlas a diferentes cargas gradualmente crecientes hasta que ocurra la falla. Los resultados fueron comparados con normas establecidas.

Figura 2.47. Máquina universal de ensayos mecánicos.

(Fuente Propia, 2018)

En las tablas 2.30 y 2.31 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas rectangulares y circulares respectivamente. El informe técnico se encuentra en el ANEXO III.

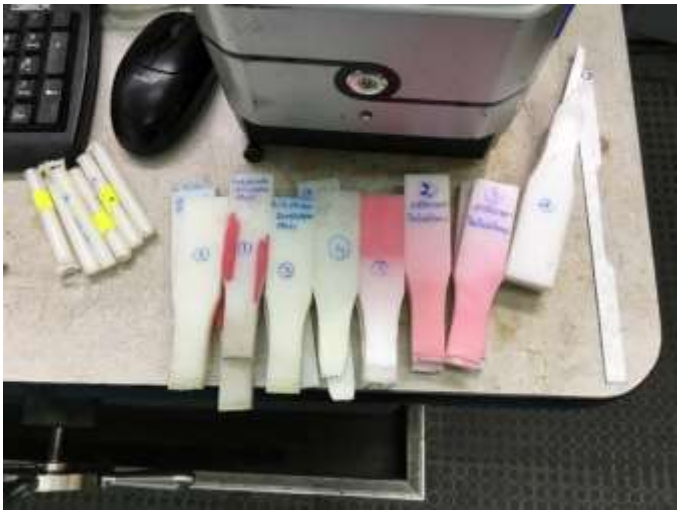


Figura 2.48. Probetas ensayadas mediante ensayo de tracción.

(Fuente Propia, 2018)

Tabla 2.30. Resultados del ensayo de tracción a las probetas rectangulares.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
PA66T-1	19.63	11.00	751	3341	2.20	15.50	FJS
PA66T-2	19.66	10.97	404	1797	1.20	8.30	FJS
PA66T-3	19.69	10.94	464	2064	1.40	9.60	FJS
PA66T-4	19.77	10.39	3570	15880	11.20	77.30	FMB
PE T-1	19.47	9.83	337	1499	1.10	7.80	FJS
PE T-2	19.68	9.94	604	2687	2.00	13.70	FJS
PE T-3	19.75	9.92	475	2113	1.60	10.80	FJS
PE T-4	19.61	11.64	1460	6494	4.10	28.50	FMB

*FJS: Falla en la junta soldada

*FMB: Falla en el material base

(LAEV, 2018)

Tabla 2.31. Resultados del ensayo de tracción a las probetas circulares.

Id.	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
PA66T-1	10.53	265	60	3.00	0.40	FJS
PA66T-2	10.36	99	62	1.20	0.20	FJS
PA66T-3	10.34	314	71	3.70	0.50	FJS
PE T-1	10.02	664	149	8.40	1.20	FJS
PE T-2	8.89	508	114	8.20	1.20	FJS
PE T-3	9.84	802	180	10.50	1.50	FJS

*FJS: Falla en la junta soldada

*FMB: Falla en el material base

(LAEV, 2018)

3. RESULTADOS

3.1. RESULTADO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN

Analizando la figura 2.32, se pudo observar un comportamiento lineal para cada una de las velocidades, lo cual demostró que para velocidades (rpm) bajas se necesita mayor tiempo de soldadura para que lleguen a unirse las probetas, por esta razón aumentó el desgaste del material.

En la figura 2.33, se evidenció que para velocidades más altas se necesitan presiones de calentamiento bajas para que se genere un rozamiento adecuado entre las caras de las probetas, además presión de calentamiento constante para que se produzca el calor necesario antes de la fase de forja.

Para la figura 2.34, se tuvo un comportamiento lineal para cada una de las velocidades, además para la velocidad de 4200 rpm se necesitó presiones de forja mayores para consolidar la unión de las probetas, lo que provocó un desperdicio excesivo de material.

En la figura 2.35 de encogimiento axial en función del tiempo se obtuvo una curva creciente para la velocidad de 2500 rpm, puesto que el encogimiento se da de manera proporcional al tiempo, mientras que para las dos velocidades restantes el tiempo óptimo para consolidar la unión de las probetas fue menor a 8 segundos, ya que si se aumenta el tiempo se produce una acumulación de material fundido y por consiguiente desprendimiento del mismo por las altas velocidades.

En la soldadura por fricción del polietileno se comprobó que a velocidades bajas de rotación de la máquina no se produce una temperatura de ablandamiento de 130°C o la mínima temperatura dentro del rango de temperaturas de ablandamiento que sugieren las normas ASTM D1525 y la norma ISO 306 adecuada para llegar a un punto de plastificación del polietileno la cual es de 125.5 °C, por lo cual, durante los ensayos previos se optó por definir tiempos para establecer los rangos en los cuales se van a soldar las probetas. A pesar de que el tiempo de calentamiento sea alto, a velocidades de 2500 y 4200 rpm, no se produce la fricción necesaria para soldar adecuadamente las probetas, por lo cual se optó por la velocidad de 4900 rpm, obteniendo buenos resultados.

En la figura 2.36, se comprobó que el tiempo de calentamiento para obtener una adecuada soldadura se produjo a partir de 10 segundos, sin embargo, mejores resultados se consiguieron a partir de 18 segundos, debido a que la fricción producida por el contacto aumenta la temperatura de la junta a soldar con el pasar del tiempo.

En la figura 2.37, se constató en general que para todas las velocidades la presión de calentamiento es la misma, debido a que si se trata de ejercer mayor presión el material tiende a salir en forma de viruta, realizando un proceso similar al refrentado en ambas caras.

En la figura 2.38, se evidenció que la presión de forja tiende a tener valores superiores a la presión de calentamiento, ya que el material se encuentra en un punto de plastificación que permitió ejercer mayores presiones sin tener pérdidas de material.

En la figura 2.39, se observó que entre 18 a 26 segundos se produjo un encogimiento máximo de 8 mm, y mínimo de 6 mm, lo cual fue considerablemente bueno, ya que la presión ejercida durante la soldadura determina el encogimiento y la producción de la unión soldada. Se visualizó un pico máximo de 14 mm de encogimiento, lo cual es considerado como pérdida innecesaria del material, y pudo ser el producto de ejercer mucha presión al momento de realizar la soldadura.

3.2. Resultados de los ensayos preliminares de la soldadura por fricción-agitación (FSW)

3.2.1. Polietileno de alta densidad

En el ensayo 1 de la tabla 2.26, se comprobó que bajo los parámetros establecidos para esta soldadura, no existe una correcta fusión del polietileno. Sin embargo, muestra indicios de que es posible realizar la soldadura de este material. La falta de fusión del material se debe a que, a bajas revoluciones no existe la suficiente temperatura generada por la herramienta con hombro estacionario, pues tiene una similitud con la soldadura por fricción al presentar dificultades para soldar este material a bajas velocidades (rpm). El ancho del cordón de soldadura es muy grande, lo que dificulta que la herramienta pueda conservar una temperatura de ablandamiento de 130°C, dado que es la adecuada para llegar a plastificar el material. En este ensayo se probó con una herramienta roscada, lo cual no fue factible, debido a que este material necesita altas temperaturas para su fusión y las ranuras disminuían el contacto entre la herramienta y el material.

En el ensayo 2 de la tabla 2.26, se notó material fundido parcialmente, la entrada de la herramienta no se fusionó correctamente. A partir de la mitad del recorrido, se observa una soldadura completa. El inconveniente que presentó este ensayo fue, que la soldadura no llenó completamente el cordón, la causa, el diámetro de la herramienta, al no ser el indicado para realizar la soldadura de este material.

En el ensayo 3 de la tabla 2.26, se observó material ya fusionado, pero presenta un cordón de soldadura irregular causada por la acumulación de material fusionado en la base, pues el espacio a llenar resultó muy amplio para el tiempo que demora el polietileno en solidificarse. Este ensayo ayudó a determinar las revoluciones máximas para realizar la soldadura. En la soldadura de polímeros necesariamente se tiene que establecer la velocidad (rpm) correcta para evitar quemar el material.

En el ensayo 4 de la tabla 2.26, se evidenció que casi hasta la mitad de la parte inicial la soldadura presenta una buena fusión en el cordón. No obstante, el avance fue muy lento y causó que la herramienta aumente su temperatura; en el resto de la soldadura el material estuvo muy plastificado, por esta razón se formó una cavidad en la parte central por la acumulación del material en la base.

En el ensayo 5 de la tabla 2.26, se pudo observar una soldadura uniforme. Para este ensayo se disminuyó el diámetro de la herramienta a 3.175 mm para facilitar a la solidificación del material, también se optó por un avance semiautomático para permitir el calentamiento previo entre la herramienta y las superficies de las probetas a soldar. La velocidad fue relativamente baja, sin embargo el material sí llego a un punto de plastificación debido a los factores que se describieron anteriormente, ayudaron a optimizar el proceso de soldadura.

En el ensayo 6 de la tabla 2.26, se obtuvo una soldadura completa y uniforme. Para este ensayo se utilizó una herramienta de diámetro 2.35 mm. Posteriormente y con los resultados se determinó las condiciones finales para la soldadura de las probetas.

3.2.2. Poliamida PA-66

En el ensayo 1 de la tabla 2.27, se utilizó la mesa de la fresadora para apoyar las probetas. Además, se escogió el sentido de giro horario a la herramienta, pero debido a que la rosca tiene el mismo sentido de giro (rosca derecha) el material empezó a ser arrastrado hacia la parte superior de las placas y comenzó a adherirse al hombro de la herramienta; por esta razón se obtuvo un cordón de soldadura incompleto. En este caso se utilizó una velocidad 1500 rpm y velocidad de avance de 20 mm/min, los cuales no fueron los parámetros correctos, ya que la herramienta se desplazó en un tiempo aproximado de 3 minutos. La profundidad de la herramienta fue de aproximadamente 10 mm y se utilizó un pin de rosca M8 de paso 1.

En el ensayo 2 de la tabla 2.27, se usó el mismo material (Poliamida PA-66) para apoyar las placas. Para que el material se plastifique homogéneamente y obtener un cordón de soldadura completo, se cambió el sentido de giro a la herramienta, se mantuvo las misma velocidad de 1500 rpm y disminuyó la velocidad de avance a 15 mm/min. En este caso se utilizó un pin de rosca M6 de paso 1, el cual será utilizado para los ensayos restantes.

En el ensayo 3 de la tabla 2.27, debido al aumento de la velocidad a 1800 rpm el cordón de soldadura no llego a completarse en la parte final, ya que el material plastificado quedó adherido en la rosca de la herramienta, además al aumentar la velocidad de avance a 25 mm/min la herramienta de desplazó en un tiempo aproximado de 2 minutos.

En el ensayo 4 de la tabla 2.27, se utilizó la misma placa base del ensayo 3. En este caso se obtuvo un cordón de soldadura de buen aspecto, pero no se logró un relleno completo al final, debido a que la herramienta quedo adherida a las placas soldadas. Se utilizó una velocidad de 1800 rpm y disminuyó la velocidad de avance a 15 mm/min.

Para el ensayo 5 y 6 de la tabla 2.27, se observó cordones de soldadura incompletos, debido a que al utilizar velocidades mayores a 1800 rpm el material se funde rápidamente y tiende a disminuir su viscosidad, por esta razón el material fundido fue hacia la raíz y a la placa base, además se generó una concavidad al final del cordón de soldadura.

La herramienta roscada M6 de paso 1 usada para soldar las placas de poliamida PA-66 fue la correcta, ya que generó una temperatura de ablandamiento aproximada de 199°C, la cual es la adecuada para llegar a plastificar el material, debido a que la temperatura de transición vítrea es de 57ºC no necesitó llegar hasta la temperatura máxima de ablandamiento de 252.22ºC.

3.3. Resultados de los ensayos finales de la soldadura por fricción-agitación FSW

3.3.1. Polietileno de alta densidad

En la probeta 1 de la tabla 2.28, a 1500 rpm se pudo observar que el cordón de soldadura es uniforme, sin embargo, existe un vacío en la parte inicial generado por el avance de la herramienta, debido a que a 1500 rpm tarda mucho tiempo en llegar el material al punto de plastificación y posteriormente que inicia el recorrido la herramienta, observamos que el cordón de soldadura empieza a formarse sin dejar vacíos. La velocidad de avance para está probeta (29 mm/min) es la mayor debido a que se necesita generar mayor contacto entre la superficie de la herramienta y el material.

En la probeta 2 de la tabla 2.28, a 1800 rpm se generó un cordón de soldadura con mejores características que en la probeta 1, pues el material ya entra en su punto de plastificación, el cual permite realizar un avance lento a 22 mm/min, para asegurar el llenado completo de los espacios generados por la herramienta con el material fusionado.

En la probeta 3 de la tabla 2.28, a 2000 rpm se observó un cordón de soldadura uniforme con excesos de material en los costados del cordón, no se encuentran vacíos en la parte inicial ni final del cordón de soldadura, la velocidad de avance en este caso es la menor, y posterior a realizar el retiro de los exceso de material se observó en los ensayos que esta soldadura no presenta defectos.

Posteriormente se evaluaron los resultados de las probetas mediante ensayos no destructivos y destructivos de acuerdo a la norma ASTM D638-14 para el ensayo de tracción, la misma que se encuentra en el Anexo II. Previamente al ensayo de tracción se analizaron las probetas mediante ensayos no destructivos para garantizar que estas cumplan con parámetros propios de las juntas soldadas y detectar posibles defectos.

3.3.2. Poliamida PA-66

En la probeta 1 de la tabla 2.29, a 1500 rpm se generó un cordón de soldadura uniforme pues aparentemente los parámetros de soldeo utilizados fueron los adecuados. Además se dio una profundidad de toda la longitud del pin para lograr que se forme una pequeña sobremonta, la cual posteriormente fue removida mediante el maquinado con una fresa de vástago. El avance de 15 mm/min fue el adecuado ya que se logró el tiempo de soldeo necesario para completar el cordón de soldadura y el hombro de la herramienta ayudó a formar la trayectoria del cordón de soldadura.

Para la probeta 2 de la tabla 2.29, a 1600 rpm se observó de igual manera un cordón de buen aspecto, pero debido al aumento de la velocidad el material tiende a fluir hacia la raíz, generando el desgaste en los flancos y cresta de la rosca.

En la probeta 3 de la tabla 2.29, se decidió cambiar a 1800 rpm, mantener el mismo avance y reparar la rosca. En este caso se generó un cordón uniforme, pero de igual manera el material se plastificó rápidamente y se adhirió en la rosca durante la ejecución de la soldadura. Por esta razón se concluye que para la poliamida PA-66 no se necesita altas revoluciones (rpm) para llegar al punto de plastificación.

3.4. Comparación entre las soldaduras por fricción (FRW) y fricción-agitación (FSW)

La soldadura por fricción y la soldadura por fricción-agitación, se basan en un mismo principio que es la soldadura mediante fricción, para lo cual, no se añade material de aporte. A pesar de ser dos procesos similares, su aplicabilidad, está condicionada a geometrías radiales y planas respectivamente. A continuación se analizará los dos procesos para cada material según los datos obtenidos.

La soldadura de la poliamida PA-66, presenta similares propiedades en el proceso de soldadura por fricción a bajas y altas revoluciones, esto se puede observar en la tabla 3.32, donde la resistencia a la tracción a las diferentes velocidades (rpm) no muestra mucha variación, no obstante, sus valores de resistencia a la tracción son muy bajos comparándolos con la soldadura por fricción-agitación. En el proceso de soldadura por fricción a altas velocidades (rpm) la poliamida no tiende a fragilizarse, mientras que al realizar la soldadura por fricción-agitación, si se aumenta la velocidad (rpm), el material se fragiliza y cambia de color, símbolo de que el material empieza a perder sus propiedades mecánicas. En los ensayos realizados se puede observar las características propias de cada probeta al variar las revoluciones en la soldadura y los avances en el tiempo de soldadura. ,

El polietileno de alta densidad, al ser soldable solo a altas revoluciones para el caso de la soldadura por fricción (FRW) (tabla 3.32), se mantiene en un rango relativamente estable de resistencia a la tracción. Sin embargo, al comparar estos valores con los de resistencia a la tracción en la soldadura por fricción-agitación (FSW), se nota que hay una gran diferencia en cuanto a resistencia para los dos métodos. Estos se evalúan en las gráficas respectivas, proporcionando una mejor visualización de las variables que intervienen en cada proceso.

Tabla 3.32. Comparación de carga máxima y resistencia a la tracción entre los procesos FRW Y FSW.

TIPO DE SOLDADURA	SOLDADURA FSW		SOLDADURA FRW	
MATERIAL	**POLIAMIDA PA-66**		**POLIAMIDA PA-66**	
Tipo de ensayo	**Carga máxima registrada [N]**	**Resistencia a la tracción [MPa]**	**Carga máxima registrada [N]**	**Resistencia a la tracción [MPa]**
Id.	Placas rectangulares		Placas redondas	
PA66T-1	3341	15.50	60	0.40
PA66T-2	1797	8.30	22	0.20
PA66T-3	2064	9.60	71	0.50
PA66T-4	15880	77.30	-	-
MATERIAL	**POLIETILENO**		**POLIETILENO**	
PE T-1	1499	7.80	149	1.20
PE T-2	2687	13.70	114	1.20
PET -3	2113	10.80	180	1.50
PE T-4	6494	28.50	-	-

(Fuente Propia, 2018)

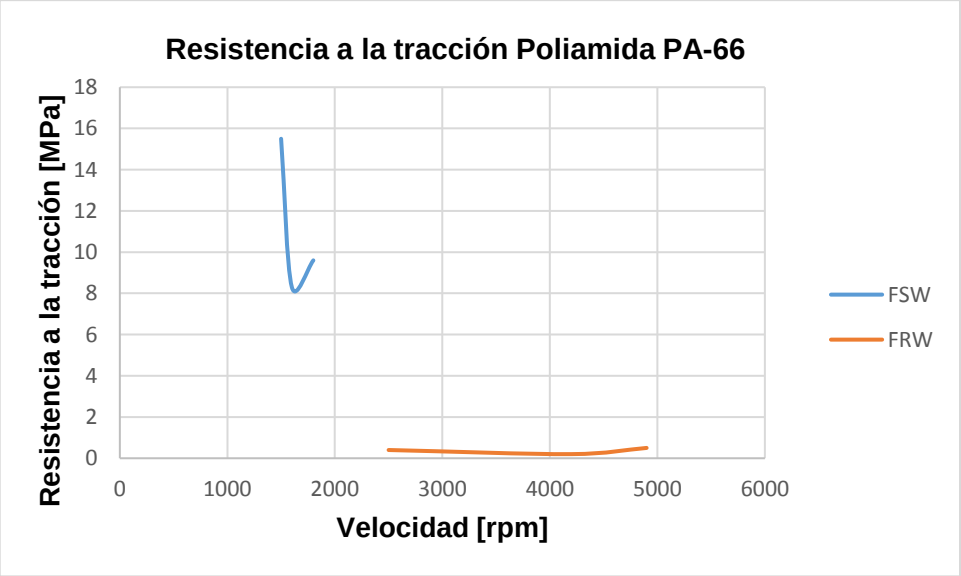


Figura 3.49. Resistencia a la tracción Poliamida PA-66.

(Fuente Propia, 2018)

La figura 3.49, indica que la mayor resistencia a la tracción en la poliamida PA-66, se obtiene del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW), con un valor cercano a los 16 MPa, mientras que los valores de resistencia a la tracción de las soldaduras por fricción (FRW) tienen una línea de tendencia con valores que oscilan entre 0.2 y 0.5 MPa.

Hay una diferencia muy notoria entre las revoluciones de soldadura para cada método, la tabla 3.32, muestra que la probeta PA66T-1, la cual fue soldada a 1500 rpm tiene la más alta resistencia a la tracción. Esto no aplica para el proceso de soldadura por fricción (FRW) mostrando de esta forma que el proceso de fricción-agitación (FSW) requiere de menos revoluciones para realizar la soldadura y proporciona mejores propiedades mecánicas.

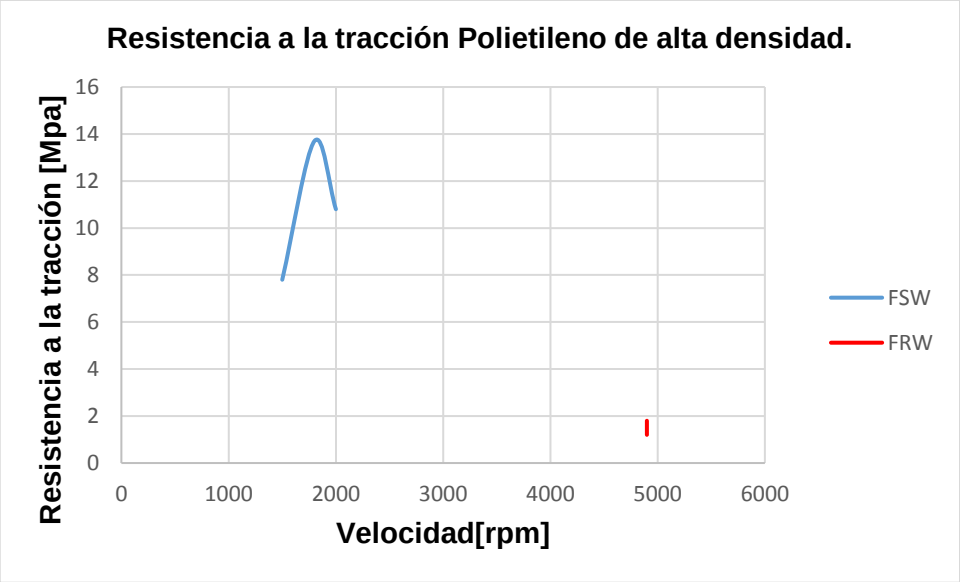


Figura 3.50. Resistencia a la tracción Polietileno de alta densidad.

(Fuente Propia, 2018)

La figura 3.50, indica que la mayor resistencia a la tracción se obtiene en el proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) con un valor máximo de 13.7 MPa. Por otro lado, en el caso de las probetas ensayadas de la soldadura por fricción (FRW), muestra una línea vertical con un rango muy pequeño de valores de resistencia a la tracción, siendo el valor máximo obtenido en este ensayo el correspondiente a la probeta PE T-2 para la soldadura por fricción-agitación (FSW) soldada a 1800 rpm. Sin embargo, se aprecia que para la soldadura del polietileno no se tienen muy buenos resultados al usar bajas velocidades (rpm), así como no es conveniente sobrepasar las 2000 rpm, ya que se empieza a perder resistencia en la soldadura. El proceso de soldadura que permite obtener mejores propiedades mecánicas para el polietileno, es la soldadura por fricción-agitación (FSW), pues presenta muchas ventajas en comparación al proceso de soldadura por fricción (FRW), siendo la más notoria, ya que permite soldar a velocidades (rpm) menores de las requeridas por este proceso de soldadura. Se debe considerar que el uso de una herramienta con hombro estacionario fabricada de un acero rápido (HSS), permite alcanzar temperaturas más altas producto de la fricción.

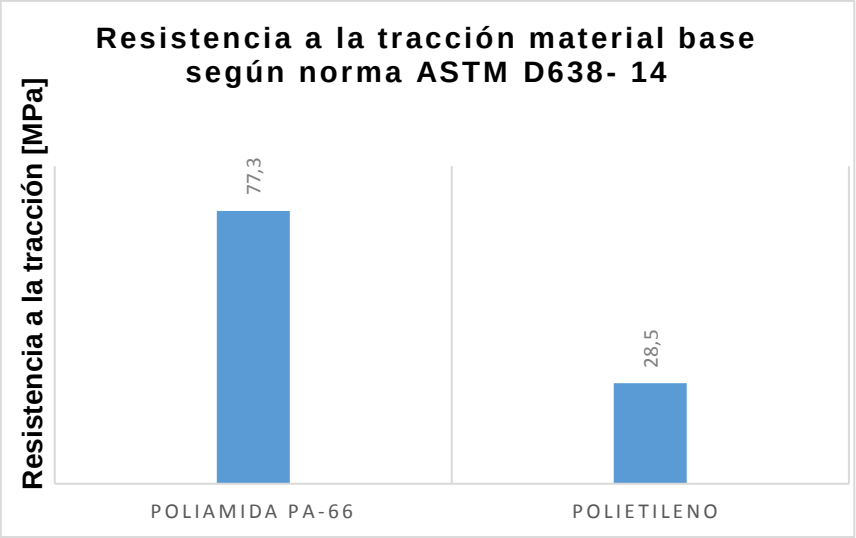


Figura 3.51. Resistencia a la tracción en el material base según la norma ASTM D638- 14.

(Fuente Propia, 2018)

La figura 3.51, muestra los resultados del ensayo de tracción en los materiales base, que al ser comparados con los valores obtenidos de las diferentes probetas muestran que los dos procesos de soldadura tienen baja resistencia en su soldadura. Además los valores de la tabla 3.32, para el polietileno y la poliamida proporcionan una idea clara de que proceso de soldadura es el óptimo para la soldadura de estos polímeros. Si bien no existe una norma para evaluar la soldadura en polímeros, se puede realizar una comparación entre los resultados obtenidos mediante la norma ASTM D638-14 y los valores de los ensayos de tracción aplicados a las probetas rectangulares y circulares soldadas, que se diseñaron en función de las limitaciones impuestas por las máquinas utilizadas para realizar las soldaduras.

Los resultados de la figura 3.51, son muy similares a los de la resistencia a la tracción en la poliamida y el polietileno que se pueden encontrar en la bibliografía. Tanto la soldadura de la poliamida PA-66 como la del polietileno de alta densidad, requieren realizar un ensayo no destructivo previo para evaluar la calidad de las juntas soldadas. Los resultados de este ensayo se pueden observar en el Anexo IV.

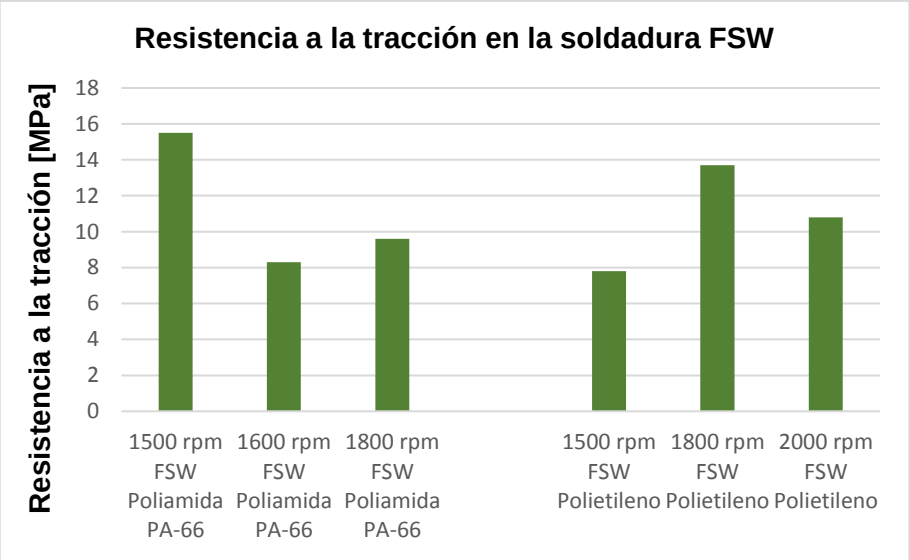


Figura 3.52. Resistencia a la tracción en la soldadura FSW.

(Fuente Propia, 2018)

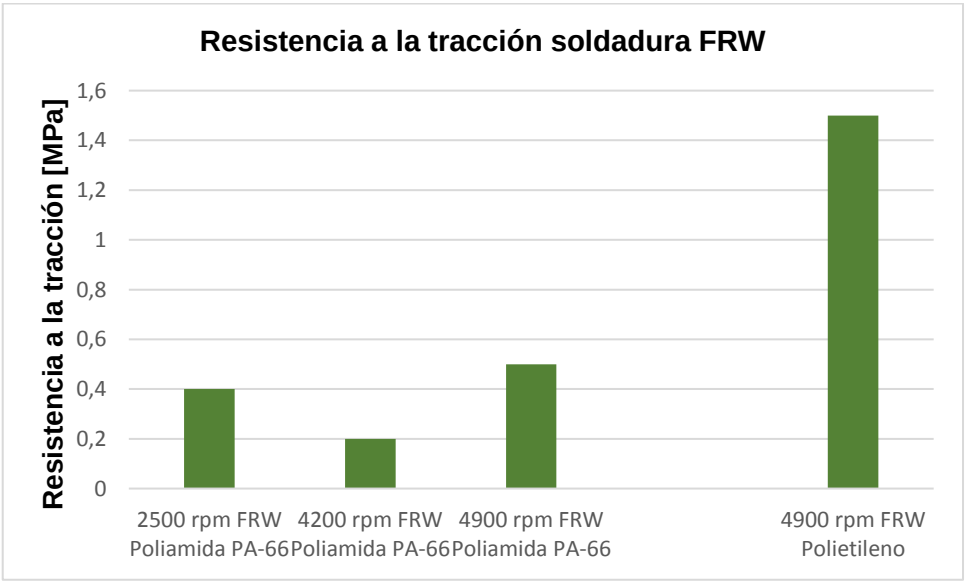


Figura 3.53. Resistencia a la tracción soldadura FRW.

(Fuente Propia, 2018)

Las figuras 3.52 y 3.53, muestran la resistencia a la tracción para cada método de soldadura. Una comparación entre los dos procesos para la soldadura de un mismo material, concluye que en la soldadura por fricción-agitación (FSW) de la poliamida PA-66, al variar la velocidad de 1500 rpm a 1800 rpm se logran mejores propiedades mecánicas que al utilizar la soldadura por fricción (FRW) a pesar de emplear las diferentes velocidades disponibles en la máquina con ninguna se logra alcanzar la menor resistencia lograda en la soldadura por fricción-agitación (FSW), el cual fue de 8.3 MPa.

La soldadura por fricción (FRW) del polietileno solo se puede realizar satisfactoriamente a velocidades muy elevadas (4900 rpm), la cual es la velocidad más alta con la que cuenta la máquina de soldadura por fricción. Esto se debe a que el polietileno tiene una alta densidad y es un material difícil de maquinar, por lo tanto su soldadura implica mayor complicación, ya sea en soldadura por fricción (FRW) o soldadura por fricción-agitación (FSW). Al analizar las figuras 3.52 y 3.53, se nota que la resistencia en soldadura por fricción (FRW) es muy baja (1.5 MPa) comparada con la resistencia del material base (28.5 MPa), figura 3.51 lo cual indica que la soldadura no es buena. Por otro lado, al analizar la figura 3.52, para la soldadura por fricción-agitación (FSW) del polietileno, se observa valores aproximados de 8 y 14 MPa lo cual denota que esta soldadura cuenta con mejores propiedades en general para los dos materiales.

En el proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) hay otras variables que pueden intervenir en la soldadura de cada polímero, tales como: la geometría de la herramienta, la dirección de giro de la herramienta, la existencia de ranuras o no en el pin, aplicación de una placa base de acero y el punto de fusión del polímero, y que deben ser controladas, ya que influyen para que este proceso produzca soldaduras de mejores propiedades mecánicas.

4. CONCLUSIONES

- Tanto en la soldadura por fricción (FRW) y como en la soldadura por fricción-agitación (FSW), los parámetros de soldadura a controlar son pocos, siendo estos procesos más eficaces, sin embargo es primordial establecer las condiciones apropiadas de operación para conseguir cordones de soldadura óptimos.
- En la parte experimental de la soldadura por fricción (FRW) a bajas velocidades (rpm) en la poliamida PA-66 se genera una unión adecuada entre las probetas y no necesita mucho tiempo de calentamiento para llegar al punto de plastificación, mientras que para el polietileno de alta densidad tarda mucho más tiempo y se requiere altas velocidades (rpm), esto es debido a las propiedades de cada material.
- La presión de calentamiento está ligada a la velocidad (rpm), es decir que para tener un adecuado rozamiento entre las superficies para el caso de la poliamida PA-66 se necesita de menor velocidad (rpm), mientras que para que el polietileno de alta densidad sucede todo lo contario, ya que se necesita de la mayor velocidad (rpm) que proporciona la máquina de soldar.
- La presión de forja está relacionada con la velocidad (rpm) y el encogimiento, ya que al aplicar una presión excesiva el material tiende a salir expulsado. Esto sucede especialmente en la poliamida PA-66, pues al utilizar velocidades (rpm) mayores a 2500 rpm hay pérdida de material, mientras que para el polietileno de alta densidad a una velocidad de 4900 rpm se consolida la soldadura.
- En el proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) se tiene algunos inconvenientes y por esta razón se debe modificar la herramienta tomando en cuenta las siguientes consideraciones:
    - Al utilizar una rosca que teóricamente es la correcta (M8 de paso 1) se genera más área de contacto entre el diámetro de la rosca y la superficie del material a soldar.
    - La fricción genera incremento de calor en la herramienta, por lo que el material se plastifica rápidamente desde el principio del cordón de soldadura.
    - Demasiada acumulación de material fundido en la concavidad del hombro estacionario.
    - No hay un buen relleno en el cordón de soldadura debido al espesor de la placa.
- El uso de un pin roscado de diámetro 8 mm provoca mayor resistencia al momento de entrar en contacto con el material, por lo que se fractura y por esta razón se debe

utilizar un pin cilíndrico de diámetro 1/8 de pulgada y sin rosca, para soldar el polietileno de alta densidad.

- Tomando en cuenta estas consideraciones, para soldar la poliamida PA-66 se debe utilizar una rosca M6 de paso 1, refrentar la concavidad dejando una superficie lisa en la parte inferior del hombro estacionario e incrementar la longitud del pin a 10.8 mm para adaptarse al espesor de la placa adquirida, además las dimensiones del hombro deben ser 3 veces mayor que la del pin para conseguir retener el material plastificado en la línea de unión. Con estas modificaciones se generan mejores resultados (tabla 2.29).
- Se debe utilizar una herramienta con rosca M6 de paso 1 para la poliamida PA-66 y para el polietileno de alta densidad una herramienta cilíndrica sin rosca de acero rápido, ya que estas herramientas ayudan a llegar a la temperatura de ablandamiento adecuada para cada material.
- La dureza del material para fabricar la herramienta es muy importante, por esta razón se debe utilizar un acero rápido (HSS) S630 para el polietileno de alta densidad debido a que esta resiste altas temperaturas, mientras que para la poliamida se usa un acero de herramientas SAE 4340 (dureza de suministro 270-330 HB) que no necesita de ningún tipo de tratamiento térmico, pues a las velocidades empleadas en el proceso (1500 rpm) la herramienta no sufre ningún tipo de cambio.
- La velocidad (rpm), el avance (mm/min) y la penetración de la herramienta son los parámetros principales que permiten obtener juntas con mejores propiedades, pues estos parámetros intervienen en la generación de calor durante la ejecución del trabajo.
- Al realizar la soldadura para cada material mediante la soldadura por fricción y fricción-agitación (FSW), las propiedades de cada polímero influyen en los procedimientos de soldadura tanto en la variación de velocidades (rpm) entre procesos como en la soldabilidad y propiedades mecánicas obtenidas.
- La mayor resistencia mecánica se obtiene en la soldadura por fricción-agitación (FSW), para la poliamida y el polietileno, 15.5 y 13.7 MPa respectivamente, (figura 3.52).
- Para lograr una agitación adecuada y lograr una cohesión homogénea del material se necesita una velocidad de 1500 rpm para la poliamida PA-66, mientras que para el polietileno de alta densidad una velocidad de1800 rpm. De igual manera y de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo de tracción a velocidades de avance bajas se presentan mejores propiedades mecánicas (figura 3.52).

- Mediante el proceso de la soldadura por fricción-agitación (FSW) se pueden obtener juntas soldadas a tope sin la necesidad de ninguna preparación de biseles, además la separación entre las placas es mínima.

Referencias Bibliográficas

[1] A.M.Strauss, B. D. (2014). Friction stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, 56-73.

[2] Alcántara, V. (2015). Crece la demanda de poliamida en la industria automotriz. *Tecnología del Plástico*, 1. Obtenido de: http://www.plastico.com/temas/Crece-la-demanda-de-poliamida-en-la-industria-automotriz+109392

[3] Arguello, A. (1987). *Diseño y construcción de una máquina para soldar por fricción.* Quito,Ecuador .

[4] Besco, S., Lorenzetti, A., Roso, M., & Modesti, M. (01 de 11 de 2011). PA66/PA12/clay based nanocomposites: structure and thermal properties. *Polym. Adv. Technol., 22*(11), 1518-1528. doi:10.1002/pat.1640

[5] BÖHLER. (08 de 2015). *Bohlerandina*. Obtenido de http://www.bohlerandina.com/media/productdb/downloads/S630%20ES%20EN.pdf

[6] ERASTEEL. (2016). *ERASTEEL*. Obtenido de http://www.erasteel.com/sites/default/files/media/document/ES_Grade_ET1.pdf

[7] Gutiérrez, J. D. (2016). *Análisis del defecto de los parámetros de opración de un proceso de soldadur apor fricción.* Instituto Politécnico Nacional, Querétaro. Obtenido de https://www.google.com.ec/search?source=hp&ei=6JdmWrXoAoGgzwK457yACw&q=Jes%C3%BAs+Dolores+Eduardo+Guerrero+Guti%C3%A9rrez&oq=Jes%C3%BAs+Dolores+Eduardo+Guerrero+Guti%C3%A9rrez&gs_l=psy-ab.3...861.861.0.1574.2.1.0.0.0.0.600.600.5-1.1.0....0...1c.1.64.psy-a

[8] Handbook, P. T. (2007). *Plastics Technology Handbook.* New York: Taylor & Francis Group.

[9] Importcom. (2015). Características de los acero . *Catálogo*, 25.

[10] K.Lenin, & K.Pannerselvam. (se de Septiembre 2012). *Investigation on Effect of Tool Forces and Joint Defects During FSW of Polypropylene Plate* (Vol. 38). Procedia Engineering.

[11] LAEV. (2018). *Informe del ensayo de tracción en Polímeros.*

[12] Mariano. (9 de 11 de 2013). *tecnología de los Plásticos.* Obtenido de http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/11/soldadura-de-plasticos.html

[13] Oliveros, O. S. (2017). *Análisis de soldadura en placas de polipropileno unidas mediante fricción- agitación para bancos de troquelados.* Santiago de Cali .

[14] Sanmetal. (1 de 11 de 2017). *Sanmetal, s.a.* Obtenido de http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/poliamida-66-pa-66/8

[15] Santaella, D. (03 de 07 de 2012). Estudio de la Deformabilidad a tracción de películas plásticas: Norma ASTM D638 vs ASTM D882. Sartenejas.

[16] Sergio, M. (2015). Friction Stir Welding FSW of Gas Polyethylene Pipes . Cartagena: 6th Pan American Conference for NDT .

[17] SIEGERT, E. M. (2008). SOLDADURA POR FRICCIÓN. MEDELLÍN.

[18] Society, A. W. (2007). Welding Handbook. (A. O'Brien, Ed.) 3(9), 728.

[19] Society, A. W. (2007). Welding Handbook. Welding Processes, Part 2, 3, 7, 728. (C. G. Annette O'Brien, Ed.) Miami.

[20] William D. Callister, J. (2007). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales 2. BARCELONA: REVERTÉ.

[21] Sergio, M. (2015). Friction Stir Welding FSW of Gas Polyethylene Pipes . Cartagena: 6th Pan American Conference for NDT .

[22] Eslami, S., Ramos, T., Tavares, P. J., & Moreira, P. M. G. P. (2015). Effect of Friction Stir Welding Parameters with Newly Developed Tool for Lap Joint of Dissimilar Polymers. Procedia Engineering, 114, 199-207. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.059

[23] Norma, I. S. O. DIS 13953,". Polyethylene (PE) Pipes and Fittings-Determination of the tensile Strength of.

[24] Standard, A. S. T. M. (2002). D638-02a. Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

[25] Viteri Erazo, P. A., & Lincango Gallegos, M. J. (2016). Soldabilidad y Análisis del Comportamiento de la Soldadura por Fricción en Acrílicos , Quito, 2016.

[26] Unfried-Silgado, J., Torres-Ardila, A., Carrasco-García, J. C., & Rodríguez-Fernández, J. (2017). Efectos de la geometría del hombro de la herramienta sobre las

propiedades mecánicas de juntas soldadas por fricción-agitación de aleación de aluminio AA1100. DYNA, 84(200), 202-208.

[27] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering: R: Reports, Volume 50, Issues 1–2, 31 August 2005, Pages 1-78, ISSN 0927-796X, https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001.

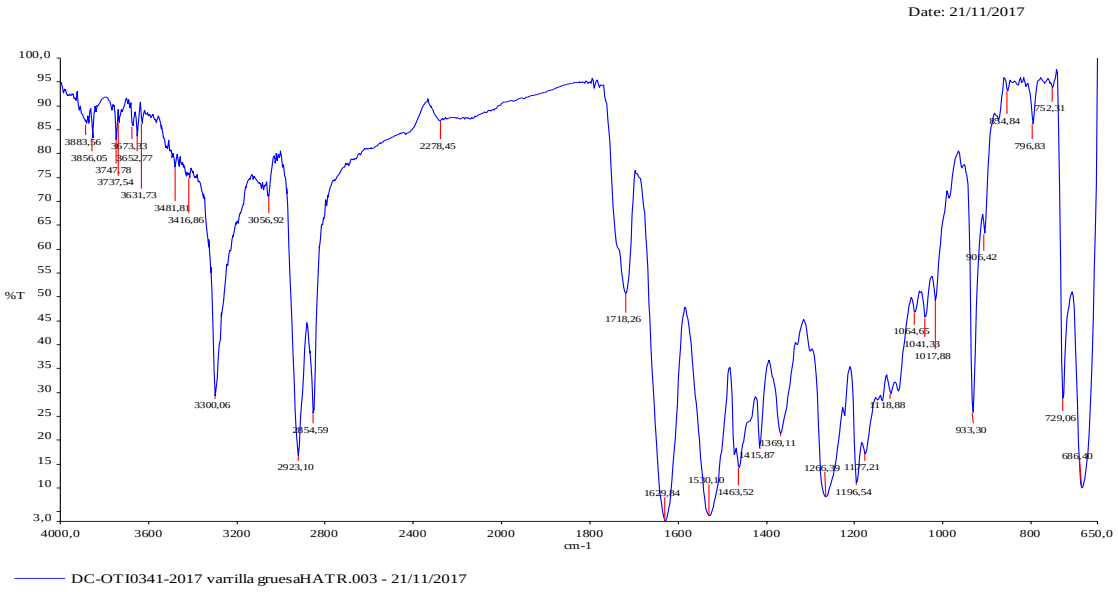
Anexos

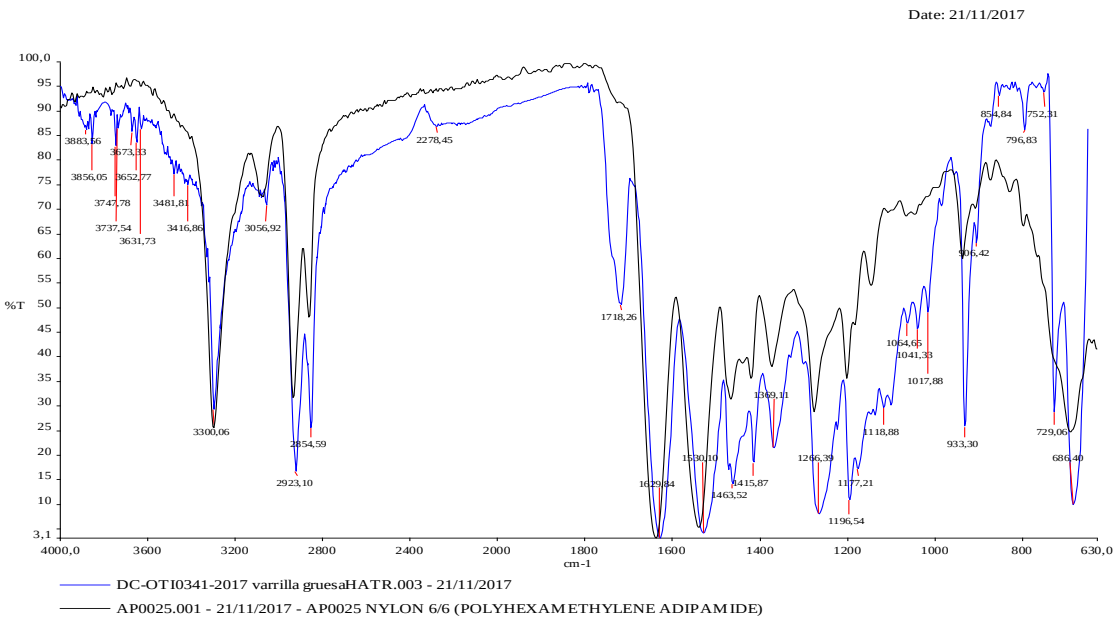
ANEXO I.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Varilla Gruesa

Espectro FT-IR





Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Instrument:	NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix	**Sample name:**	VARRILLA GRUESA
Project:		**Sample Mass:**	16.21 mg
Filename:	DC-OTI0341-2017 VARRILLA GRUESA.ngl	**Reference name:**	
Sample identity:	DC-OTI0341-2017	**Reference Mass:**	0 mg
Date/Time:	17/11/2017 7:51:41	**Reference Crucible Ma:**	40 mg
End Date/Time:	17/11/2017 9:13:48	**Material:**	
Laboratory:	CIAP	**Temp.Calib.:**	Cal sep 2016.ngb-td7
Operator:	Iván Ch	**Sensitivity:**	Cal marzo 2012 entalpía.ngb-ed7
Mode:	DSC	**Crucible:**	Pan Al, open
Measurement Type:	Sample		

Remark:

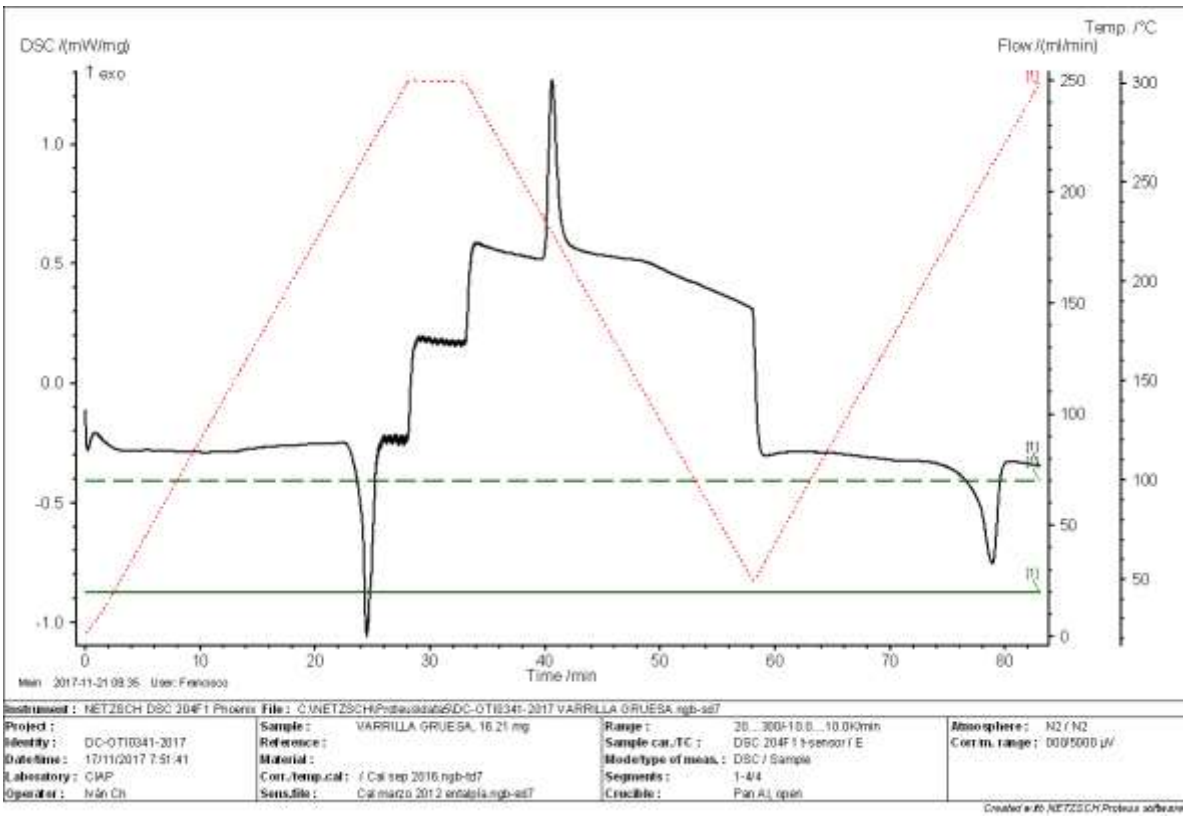
Furnace:	Standard DSC 204F1	**Furnace TC:**	E
Sample carrier:	DSC 204F1 t-sensor	**Sample TC:**	E
Measurement End:	Normal end	**Crucible Mass:**	39.60 mg

Purge 2 MFC: NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**
Protective MFC: NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**

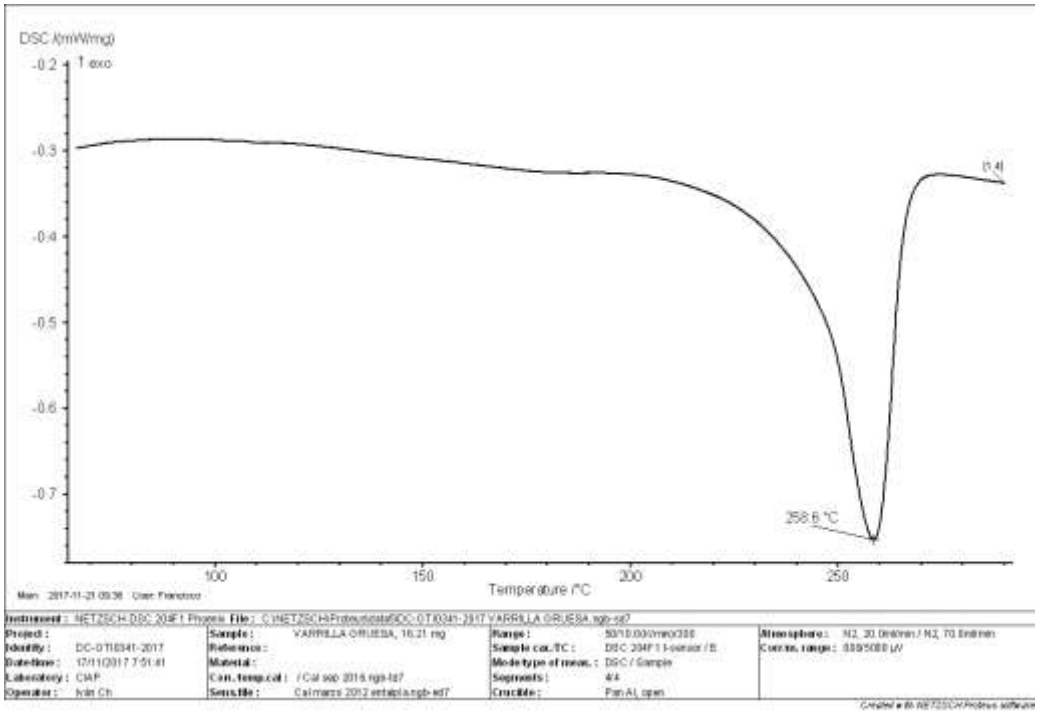
Start criteria
Reset after maximum standby time: No

List of temperature steps:

Num	Mode	Temp. °C	HR K/min	Acq.Rate pts/min	Duration hh:mm	STC	P2:N2	PG:N2	IC	BC
---	Stand-by heating	20.0	40.000			1	20.0	70.0	1	0
---	Stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0
1	Dynamic	300.0	10.000	300.00	00:28	1	20.0	70.0	1	0
2	Isothermal	300.0		50.00	00:05	1	20.0	70.0	1	0
3	Dynamic	50.0	10.000	300.00	00:25	1	20.0	70.0	1	0
4	Dynamic	300.0	10.000	300.00	00:25	1	20.0	70.0	0	0
---	Emergency	310.0					20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by heating	20.0	40.000		00:07	1	20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0

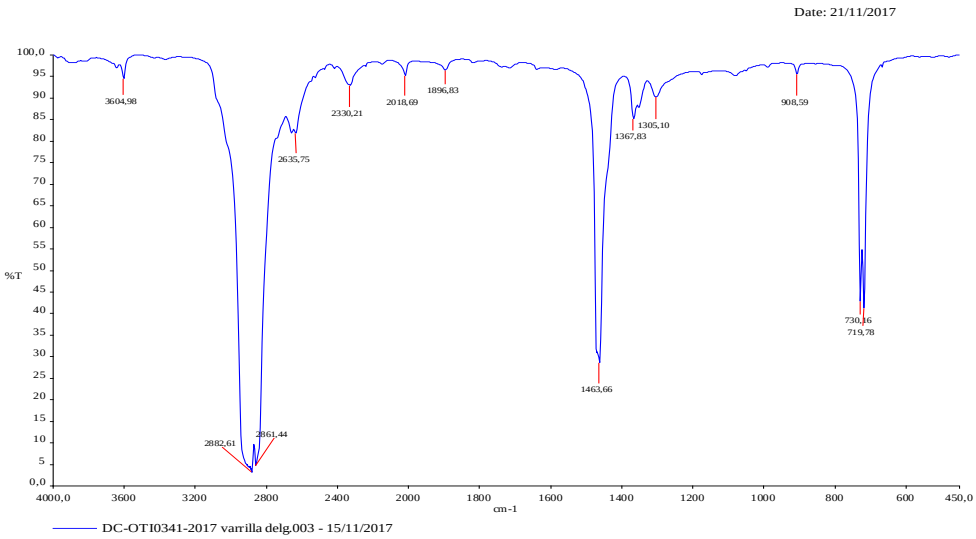


Segundo barrido



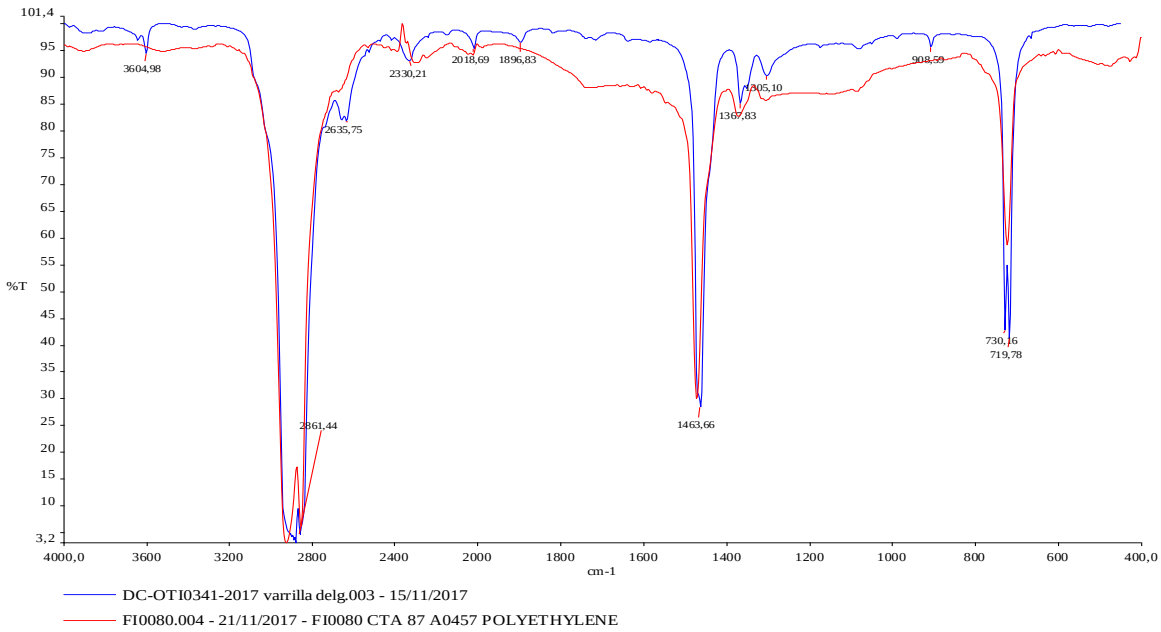
Identificación.-La muestra Varilla gruesa tiene las bandas de absorción características de una ***poliamid***a[1] 3300, 1629 y 1530 cm^{-1}, por el punto de fusión el material es una Poliamida 66[2]

Varilla Delgada



[1] John Scheirs, "Compositional and Failure Análysis of Polymers", John Wiley & Sons, 2000, England, pp 180.
[2] Gottfried W. Ehrenstein " Thermal Analysis of Plastics", Hanser,pp 331

Date: 21/11/2017



Instrument:	NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix	**Sample name:**	VARRILLA DELGADA
Project:		**Sample Mass:**	15.73 mg
Filename:	DC-OTI0341-2017 VARRILLA DELGADA.ng	**Reference name:**	
Sample identity:	DC-OT0341-2017	**Reference Mass:**	0 mg
Date/Time:	17/11/2017 9:42:33	**Reference Crucible Ma**	40 mg
End Date/Time:	17/11/2017 10:35:01	**Material:**	
Laboratory:	CIAP	**Temp.Calib.:**	Cal sep 2016.ngb-td7
Operator:	Iván Ch	**Sensitivity:**	Cal marzo 2012 entalpía.ngb-ed7
Mode:	DSC	**Crucible:**	Pan Al, open
Measurement Type:	Sample		

Remark:

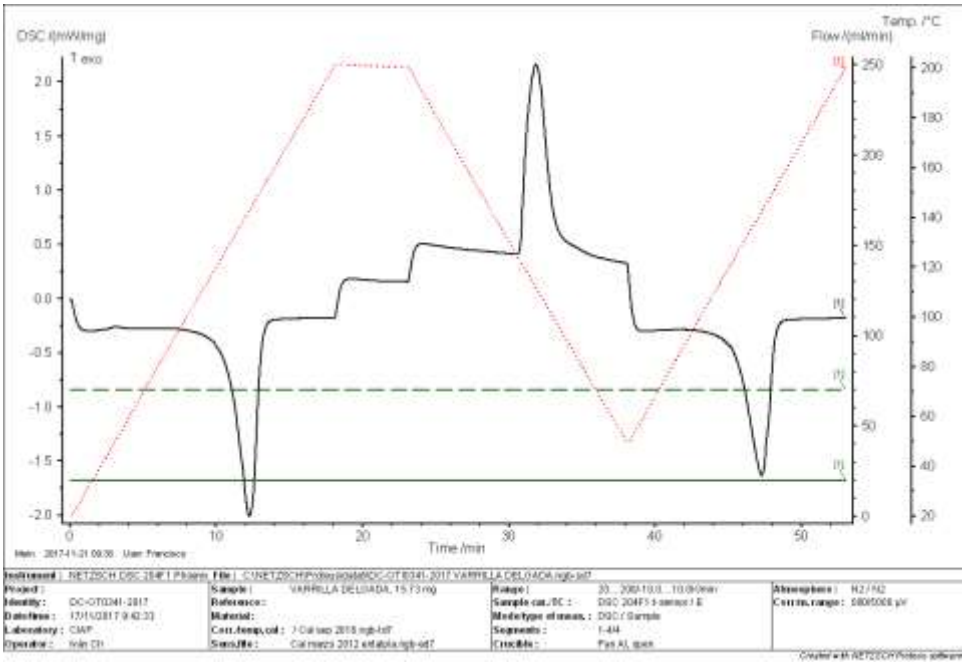
Furnace:	Standard DSC 204F1	**Furnace TC:**	E
Sample carrier:	DSC 204F1 t-sensor	**Sample TC:**	E
Measurement End:	Normal end	**Crucible Mass:**	39.43 mg

Purge 2 MFC: NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**
Protective MFC: NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**

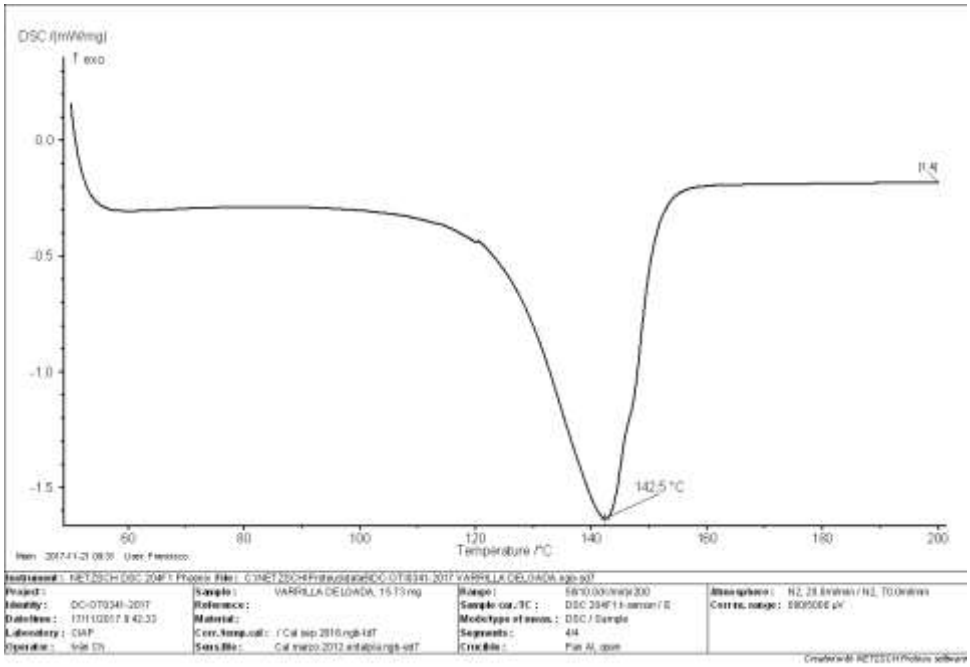
Start criteria
Reset after maximum standby time: No

List of temperature steps:

Num	Mode	Temp. °C	HR K/min	Acq.Rate pts/min	Duration hh:mm	STC	P2:N2	PG:N2	IC	BC
---	Stand-by heating	20.0	40.000			1	20.0	70.0	1	0
---	Stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0
1	Dynamic	200.0	10.000	300.00	00:18	1	20.0	70.0	1	0
2	Isothermal	200.0		50.00	00:05	1	20.0	70.0	1	0
3	Dynamic	50.0	10.000	300.00	00:15	1	20.0	70.0	1	0
4	Dynamic	200.0	10.000	300.00	00:15	1	20.0	70.0	1	0
---	Emergency	210.0					20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by heating	20.0	40.000		00:04	1	20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0



Segundo barrido

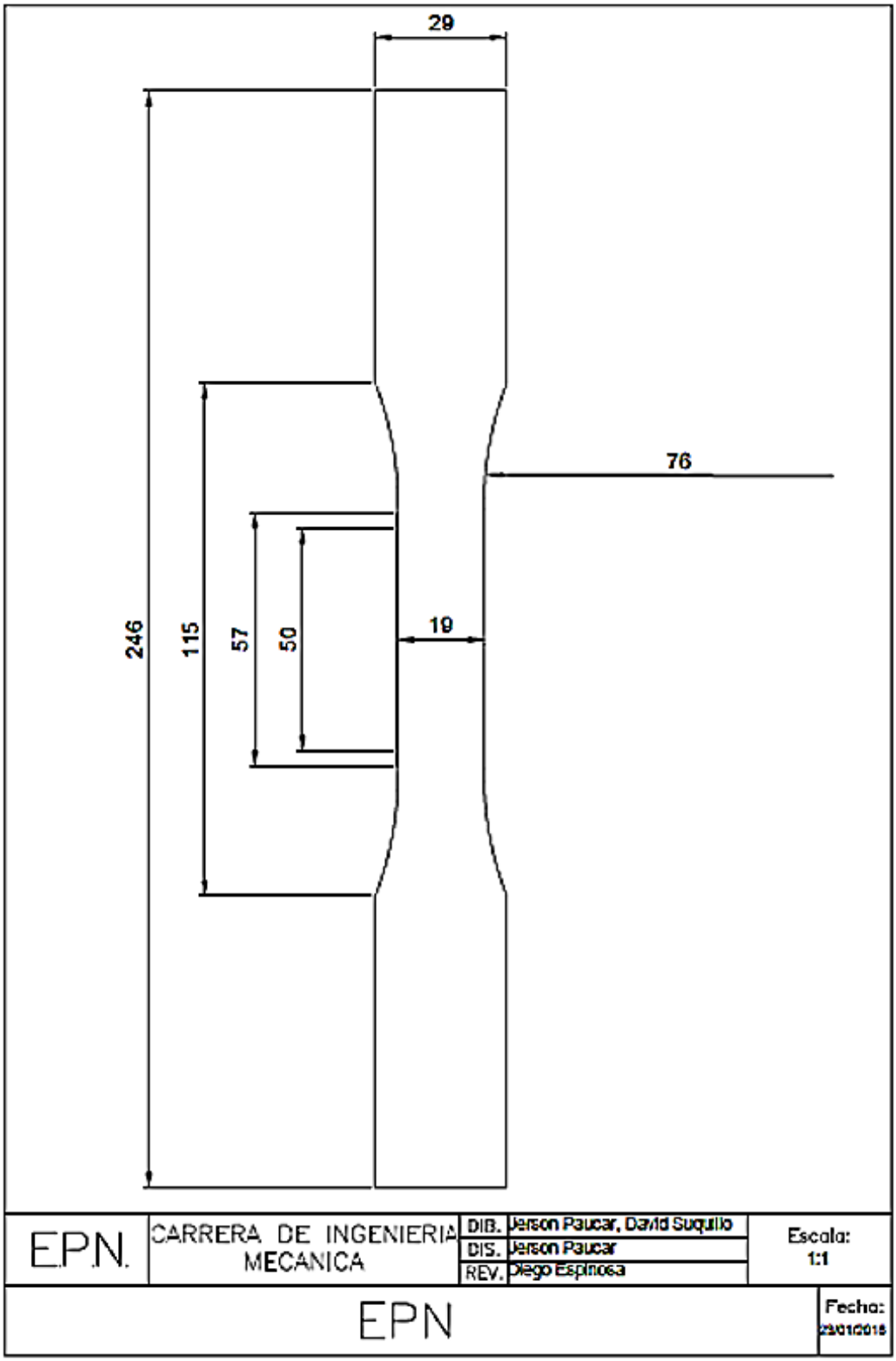


Identificación.-La muestra Varilla delgada tiene las bandas de absorción características de una ***polietileno***[3] 2920, 1470 y 730-720 cm^{-1}, por el punto de fusión el material corresponde a un Polietileno de alta densidad (PEAD) o a un Polietileno de Ultr

[3] John Scheirs, "Compositional and Failure Análysis of Polymers", John Wiley & Sons, 2000, England, pp 180.

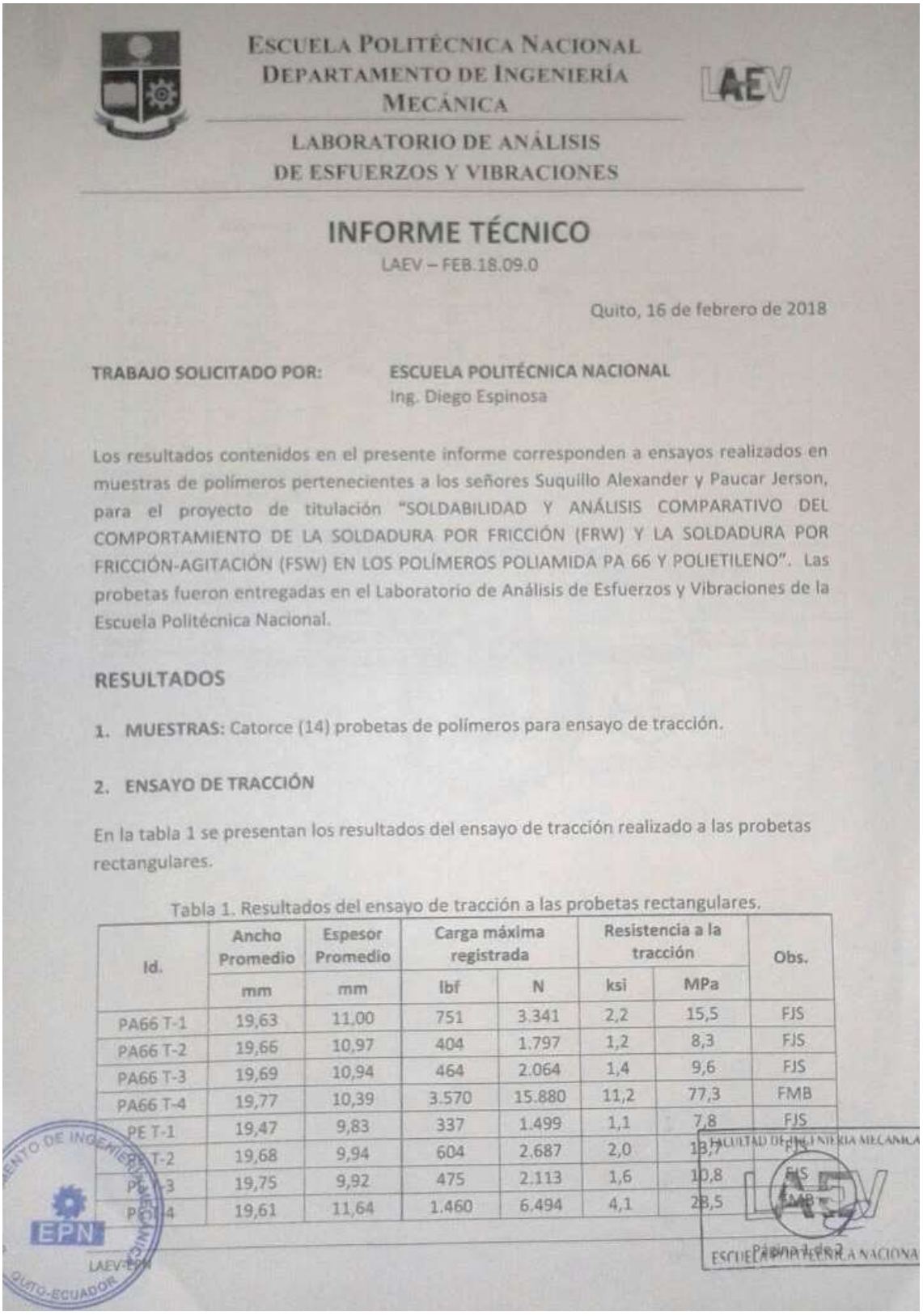
ANEXO II.

DIMENSIONES DE LAS PROBETAS DE LA SOLDADURA FSW PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN SEGÚN LA NORMA ASTM D638-14.



ANEXO III.

INFORME TÉCNICO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

INFORME TÉCNICO

LAEV – FEB.18.09.0

Quito, 16 de febrero de 2018

TRABAJO SOLICITADO POR: **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**
Ing. Diego Espinosa

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de polímeros pertenecientes a los señores Suquillo Alexander y Paucar Jerson, para el proyecto de titulación "SOLDABILIDAD Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN (FRW) Y LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW) EN LOS POLÍMEROS POLIAMIDA PA 66 Y POLIETILENO". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Catorce (14) probetas de polímeros para ensayo de tracción.

2. **ENSAYO DE TRACCIÓN**

En la tabla 1 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas rectangulares.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción a las probetas rectangulares.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
PA66 T-1	19,63	11,00	751	3.341	2,2	15,5	FJS
PA66 T-2	19,66	10,97	404	1.797	1,2	8,3	FJS
PA66 T-3	19,69	10,94	464	2.064	1,4	9,6	FJS
PA66 T-4	19,77	10,39	3.570	15.880	11,2	77,3	FMB
PE T-1	19,47	9,83	337	1.499	1,1	7,8	FJS
PE T-2	19,68	9,94	604	2.687	2,0	13,7	FJS
PE T-3	19,75	9,92	475	2.113	1,6	10,8	FJS
PE T-4	19,61	11,64	1.460	6.494	4,1	28,5	FMB

EPN LAEV-EPN QUITO-ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
LAEV
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

En la tabla 2 se presenta los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas circulares.

Tabla 2. Resultados del ensayo de tracción de las probetas circulares.

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	N	lbf	MPa	ksi	
PA66 T-1	10,53	265	60	3,0	0,4	FJS
PA66 T-2	10,36	99	22	1,2	0,2	FJS
PA66 T-3	10,34	314	71	3,7	0,5	FJS
PE T-1	10,02	664	149	8,4	1,2	FJS
PE T-2	8,89	508	114	8,2	1,2	FJS
PE T-3	9,84	802	180	10,5	1,5	FJS

Falla en la junta soldada
Falla en el material base

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA EPN QUITO-ECUADOR

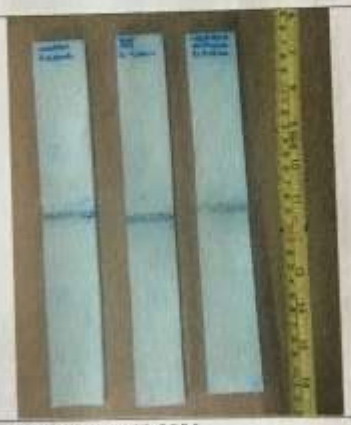
LAEV ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ANEXO IV.

REPORTE DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES

REPORTE DE INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES

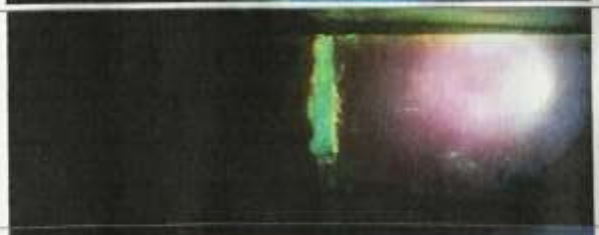
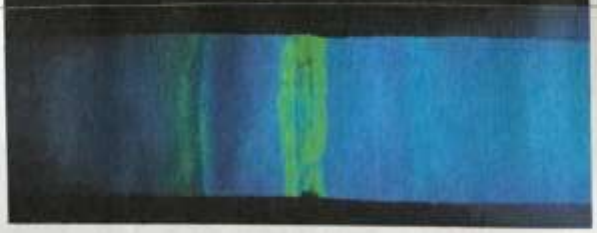
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
DEPARTAMENTO DE MATERIALES

DATOS GENERALES	
Solitante: Suquillo Alexander y Paucar Jerson, Estudiantes de Titulación FIM	**Reporte N°:** LABEND-EPN-2018-R-03-LP-02
Fecha: 02-03-2018	**Lugar:** Quito-Ecuador
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Polietileno de Alta Densidad: - 2018-R-03-LP-02-0001 - 2018-R-03-LP-02-0002 - 2018-R-03-LP-02-0003 Poliamida PA66: - 2018-R-03-LP-02-0004 - 2018-R-03-LP-02-0005 - 2018-R-03-LP-02-0006	Polietileno de Alta Densidad: - 2018-R-03-LP-02-0001 - 2018-R-03-LP-02-0002 - 2018-R-03-LP-02-0003 Poliamida PA66: - 2018-R-03-LP-02-0004 - 2018-R-03-LP-02-0005 - 2018-R-03-LP-02-0006
Material: Polietileno de Alta Densidad Poliamida PA66	**Estado Superficial:** Rugosidad Normal del Material
ESQUEMA DE LA PIEZA	
	
- 2018-R-03-LP-02-0001 - 2018-R-03-LP-02-0002 - 2018-R-03-LP-02-0003	- 2018-R-03-LP-02-0004 - 2018-R-03-LP-02-0005 - 2018-R-03-LP-02-0006

Página 1 de 3

MATERIALES Y EQUIPOS		
Líquidos:		
Limpiador / removedor: Met-L-check E-59A		**Emulsificador:** N/A
Penetrante Met-L-check VP-30	**Revelador** Met-L-check D-70	
Accesorios: N/A		
CONDICIONES DE TRABAJO		
Procedimiento: basado en ASTM E 165, Tipo I método A	**Limpieza:** Con solvente	
Tiempos:		
Penetrante: 10 minutos	**Emulsificador:** N/A	**Revelador:** 5 minutos
Luz de observación: UV 365nm	**Tiempo:** N/A	
Normas de Aceptación / Rechazo N/A. Observación de discontinuidades en juntas soldadas		

RESULTADOS

IDENTIFICACIÓN	IMAGEN	OBSERVACIONES
2018-R-03-LP-02-0001		Cavidades, falta de unión en la junta en toda su extensión
2018-R-03-LP-02-0002		Cavidades, falta de unión en la junta en toda su extensión
2018-R-03-LP-02-0003		Cavidades, falta de unión en la junta en toda su extensión

2018-R-03-LP-02-0004		Cavidades, falta de unión en la junta, particularmente en los extremos de la probeta
2018-R-03-LP-02-0005		Cavidades, falta de unión en los extremos de la probeta
2018-R-03-LP-02-0006		Cavidades, falta de unión en los extremos de la probeta

OPERADOR:
Verónica Sotomayor

Nivel: LÍQUIDOS PENETRANTES –ASNT NIVEL II
Reg.# ICC-132

Firma:

Laboratorio de Ensayos No Destructivos
LAB-END

Fecha: 02-03-2018

Firma:

Ing. Verónica Sotomayor
JEFE LAB-END

Solicitante

Fecha: 02-03-2018

Firma:

Sr. Alexander Suquillo
Estudiante titulación

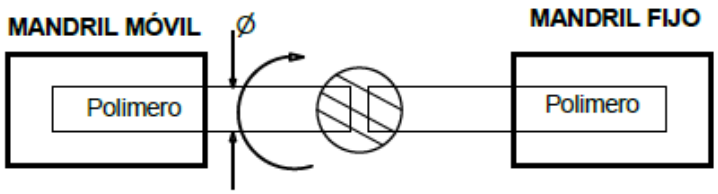
Por: Jerson Pawcar

ANEXO V.

ESPECIFICACIONES DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN (WPS)

	ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE POLÍMEROS POR EL MÉTODO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN			
ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)				
Elaborado por: Páucar Jerson - Suquillo Alexander				
Institución	Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica		Fecha	2018/04/09
Revisión N°	1			

ESQUEMA DE LA JUNTA



TIPO Y PROCESO DE SOLDADURA			**JUNTA UTILIZADA**	
PROCESO	**FRW**		**TIPO**	A TOPE
TIPO	MANUAL		**RESPALDO**	NINGUNO
	SEMIAUTOMÁTICA	X	**SEPARACIÓN**	3 mm
	AUTOMÁTICA		**PREPARACIÓN**	REFRENTADO
MATERIAL DE APORTE		NINGUNO	**LIMPIEZA**	SI
TRATAMIENTO TÉRMICO		NINGUNO	**PARÁMETROS PRINCIPALES**	
MATERIAL BASE			**VELOCIDAD DE ROTACIÓN[RPM]**	4900
GRUPO	POLÍMEROS		**FUERZA DE CALENTAMIENTO [Kgf]**	62.5
TIPO	POLIETILENO		**FUERZA DE FORJA [Kgf]**	187.5
DIÁMETRO [mm]			**TIEMPO DE CALENTAMIENTO [s]**	12
OBSERVACIONES				
REALIZADO POR			**APROBADO POR**	
Páucar Jerson - Suquillo Alexander			Ing. Gabriel Velasteguí	

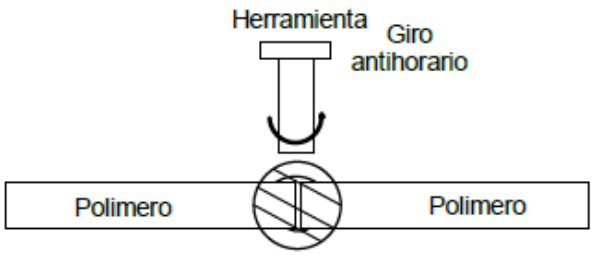
ANESO VI.

ESPECIFICACIONES DEL PROCESO DE SOLDADURA PORFRICCIÓN-AGITACIÓN (WPS)

	ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE POLÍMEROS POR EL MÉTODO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN	

ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)			
Elaborado por: Páucar Jerson - Suquillo Alexander			
Institución	Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica	Fecha	2018-04-09
Revisión Nº	1		

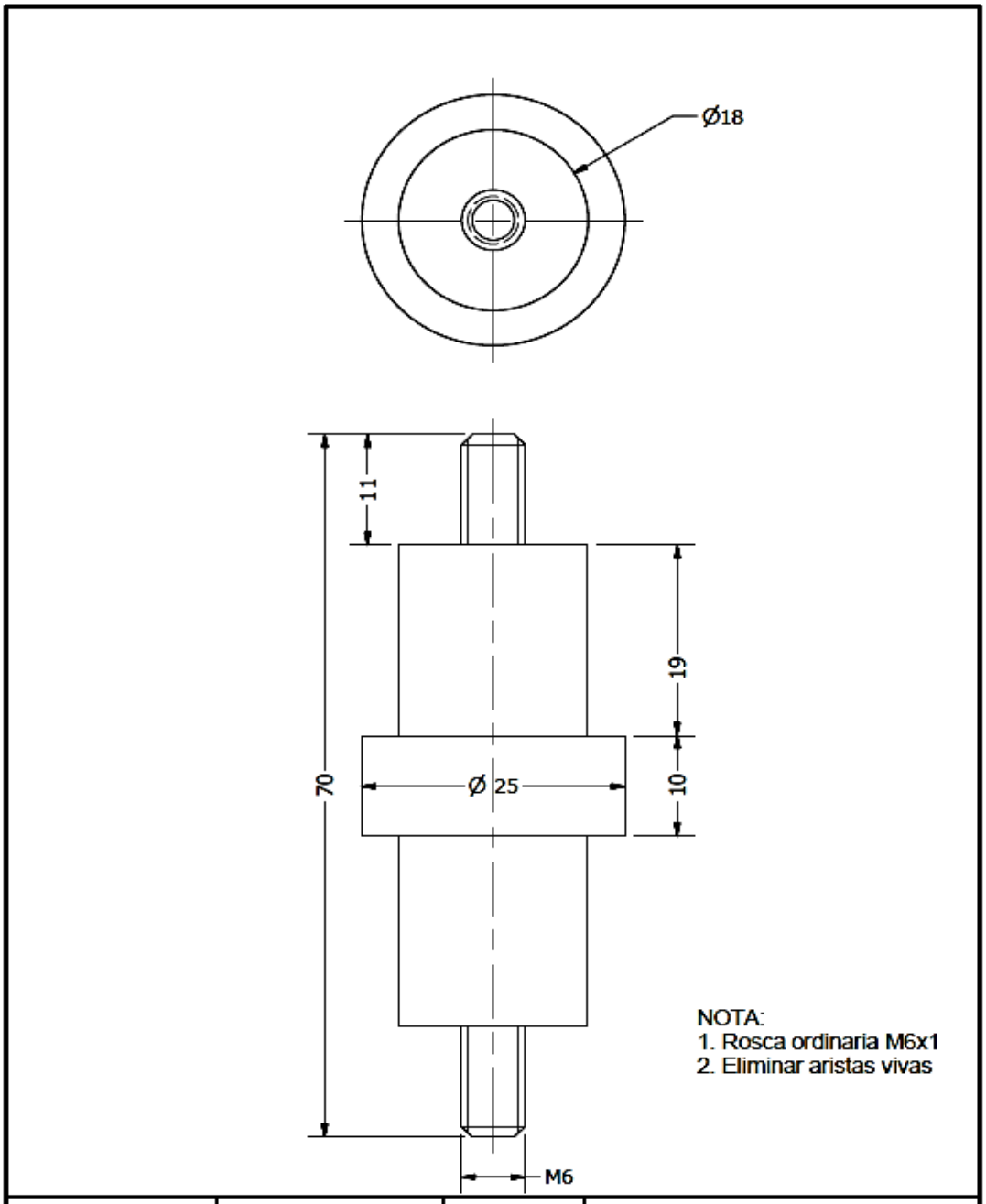
ESQUEMA DE LA JUNTA



TIPO Y PROCESO DE SOLDADURA					
PROCESO	**FSW**		**TIPO**	A TOPE	
TIPO	MANUAL		**RESPALDO**	NINGUNO	
	SEMIAUTOMÁTICA	X	**SEPARACIÓN**	NINGUNO	
	AUTOMÁTICA		**PREPARACIÓN**	REFRENTADO	
MATERIAL DE APORTE		NINGUNO	**LIMPIEZA**	SI	
TRATAMIENTO TÉRMICO		NINGUNO	**PARÁMETROS PRINCIPALES**		
MATERIAL BASE			**VELOCIDAD DE ROTACIÓN[RPM]**		2000
GRUPO	POLÍMEROS		**AVANCE[mm/min]**		25
TIPO	POLIETILENO				
DIÁMETRO [mm]			**TIEMPO DE SOLDADURA [s]**		210
OBSERVACIONES					
REALIZADO POR			**APROBADO POR**		
Páucar Jerson - Suquillo Alexander			Ing. Gabriel Velasteguí		

ANEXO VII.

DIMENSIONES DE LA HERRAMIENTA



Trat. Térmico:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento:	Ninguno				
MATERIAL: ACERO SAE 4340	Tol. Gral: ± 0.1	Escala: 2:1	Dib:	Páucar Jerson-Suquillo Alexander	
			Dis:	Páucar Jerson-Suquillo Alexander	
			Rev:	Ing. Gabriel Velasteguí	
HERRAMIENTA ROSCADA CON HOMBRO PLANO		PR.SO.EPN.001	Fecha: 2018-03-07		

ANEXO VIII.

ASTM D638-14

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.

Designation: D638 – 14

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics[1]

This standard is issued under the fixed designation D638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method is applicable for testing materials of any thickness up to 14 mm (0.55 in.). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness, ASTM standard D882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm (0.55 in.) shall be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

NOTE 1—This standard and ISO 527-1 address the same subject matter, but differ in technical content.

NOTE 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rate of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified disguise important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used where more precise physical data are needed.

NOTE 3—This test method may be used for testing phenolic molded resin or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D229 and Test Method D651.

NOTE 4—For tensile properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus >20-GPa (>3.0 × 10^6-psi) fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D3039/D3039M.

1.4 Test data obtained by this test method have been found to be useful in engineering design. However, it is important to consider the precautions and limitations of this method found in Note 2 and Section 4 before considering these data for engineering design.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are for information only.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*[2]

D229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation

D412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension

D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing

D651 Test Method for Test for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials (Withdrawn 1989)[3]

D882 Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting

D883 Terminology Relating to Plastics

D1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials

D3039/D3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials

D4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials (PA)

D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved Dec. 15, 2014. Published March 2015. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2010 as D638 - 10. DOI: 10.1520/D0638-14.

[2] For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

[3] The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

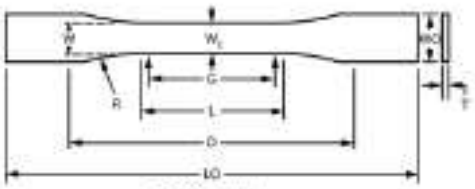
*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

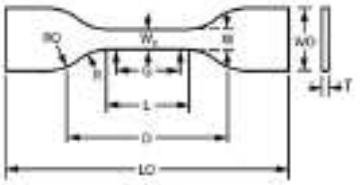
Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Mar 20 13:45:32 EDT 2018

Downloaded/printed by

Escuela Politecnica Nacional (Escuela Politecnica Nacional) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.



TYPES I, II, III & V



TYPE IV

Specimen Dimensions for Thickness, *T*, mm (in.)[A]

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV[B]	Type V[C,D]	
W—Width of narrow section[E,F]	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02)[E,G]
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02)[F]
WO—Width overall, min[H]	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	—	+6.4 (+0.25)
WO—Width overall, min[H]	—	—	—	—	9.53 (0.375)	+3.18 (+0.125)
LO—Length overall, min[H,I]	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length[J]	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	—	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010)[F]
G—Gage length[J]	—	—	—	25 (1.00)	—	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5)[K]	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04)[G]
RO—Outer radius (Type IV)	—	—	—	25 (1.00)	—	±1 (±0.04)

[A] Thickness, *T*, shall be 3.2± 0.4 mm (0.13 ± 0.02 in.) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, *T*, shall be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to 14 ± 0.4 mm (0.55 ± 0.02 in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm (0.55 in.) shall be those standard for the grade of material tested.

[B] For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm (0.250 ± 0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D412.

[C] The Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:
W = 3.18 ± 0.03 mm (0.125 ± 0.001 in.),
L = 9.53 ± 0.08 mm (0.375 ± 0.003 in.),
G = 7.62 ± 0.02 mm (0.300 ± 0.001 in.), and
R = 12.7 ± 0.08 mm (0.500 ± 0.003 in.).
The other tolerances are those in the table.

[D] Supporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D1822 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1006.

[E] The tolerances of the width at the center *W*, shall be +0.00 mm, −0.10 mm (+0.000 in., −0.004 in.) compared with width *W* at other parts of the reduced section. Any reduction in *W* at the center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

[F] For molded specimens, a draft of not over 0.13 mm (0.005 in.) is allowed for either Type I or II specimens 3.2 mm (0.13 in.) in thickness. See diagram below and this shall be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the maximum allowable draft, could be as follows:

[G] Overall widths greater than the minimum indicated are used for some materials in order to avoid breaking in the grips.

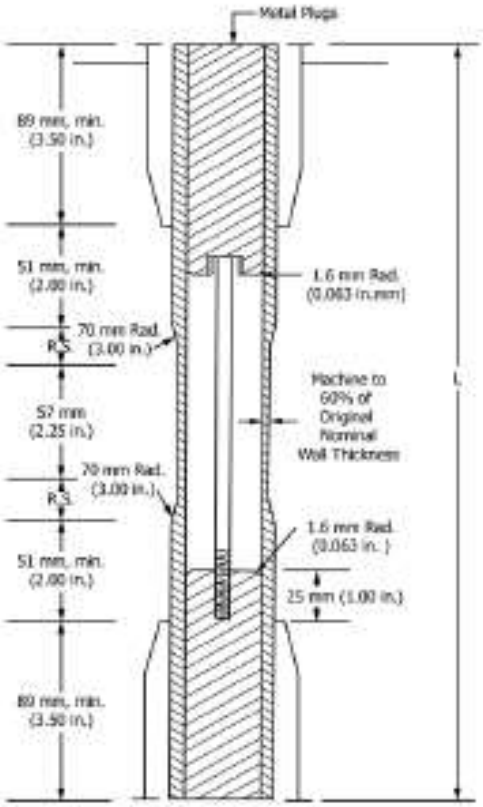
[H] Overall lengths greater than the minimum indicated are used for some materials to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

[I] Test marks or initial extensometer span.

[J] When self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if maintained uniform once chosen.

FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Mar 20 13:45:32 EDT 2018
Downloaded/printed by
Escuela Politecnica Nacional (Escuela Politecnica Nacional) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.



DIMENSIONS OF TUBE SPECIMENS

Nominal Wall Thickness	Length of Radial Sections, ±R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L, of Specimen to Be Used for 89-mm (3.5-in.) Jaws[A]
mm (in.)			
0.79 (1/32)	13.9 (0.547)	350 (13.80)	361 (15)
1.2 (3/64)	17.0 (0.670)	354 (13.92)	361 (15)
1.6 (1/16)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	361 (15)
2.4 (3/32)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	361 (15)
3.2 (1/8)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	361 (15)
4.8 (3/16)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
6.4 (1/4)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
7.9 (5/16)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
9.5 (3/8)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
11.1 (7/16)	51.3 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
12.7 (1/2)	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (16.5)

[A] For jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 2 Diagram Showing Location of Tube Tension Test Specimens in Testing Machine

machining shall be 60 % of the original nominal wall thickness. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter. Steel or brass plugs having diameters such that they will fit snugly inside the tube and having a length equal to the full jaw length plus 25 mm (1 in.) shall be placed in the ends of the specimens to prevent crushing. They can be located conveniently in the tube by separating and supporting them on a threaded metal rod. Details of plugs and test assembly are shown in Fig. 2.

6.3 *Rigid Rods*—The test specimen for rigid rods shall be as shown in Fig. 3. The length, *L*, shall be as shown in the table in Fig. 3. A groove shall be machined around the specimen at the center of its length so that the diameter of the machined portion shall be 60 % of the original nominal diameter. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter.

6.4 All surfaces of the specimen shall be free of visible flaws, scratches, or imperfections. Marks left by coarse machining operations shall be carefully removed with a fine file or abrasive, and the filed surfaces shall then be smoothed with abrasive paper (No. (00 or finer). The finishing sanding strokes shall be made in a direction parallel to the long axis of the test specimen. All flash shall be removed from a molded specimen, taking great care not to disturb the molded surfaces. In machining a specimen, undercuts that would exceed the dimensional tolerances shown in Fig. 1 shall be scrupulously avoided. Care shall also be taken to avoid other common machining errors.

6.5 If it is necessary to place gage marks on the specimen, this shall be done with a wax crayon or India ink that will not affect the material being tested. Gage marks shall not be scratched, punched, or impressed on the specimen.

6.6 When testing materials that are suspected of anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared, having their long axes respectively parallel with, and normal to, the suspected direction of anisotropy.

7. Number of Test Specimens

7.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials.

7.2 For anisotropic materials, when applicable, test five specimens, normal to, and five parallel with, the principle axis of anisotropy.

7.3 Discard specimens that break at some flaw, or that break outside of the narrow cross-sectional test section (Fig. 1, dimension "L"), and make retests, unless such flaws constitute a variable to be studied.

NOTE 10—Before testing, all transparent specimens should be inspected in a polariscope. Those which show atypical or concentrated strain patterns should be rejected, unless the effects of these residual strains constitute a variable to be studied.

8. Speed of Testing

8.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. The rate of motion of the driven grip or fixture when the testing machine is running

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Mar 20 13:49:32 EDT 2018
Downloaded by
Scienta Print

ANEXO IX.

NORMA ASTM D1525 TEMPERATURAS DE ABLANDAMIENTO VICAT PARA PLASTICOS

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.

Designation: D1525 – 17ε1

Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics[1]

This standard is issued under the fixed designation D1525; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

ε[1] NOTE—Editorial changes were made throughout the standard in September 2017.

1. Scope*

1.1 This test method covers determination of the temperature at which a specified needle penetration occurs when specimens are subjected to specified controlled test conditions.

1.2 This test method is not recommended for ethyl cellulose, nonrigid poly(vinyl chloride), poly(vinylidene chloride), or other materials having a wide Vicat softening range.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units are included in this standard.

1.4 Due to the potential safety and environmental hazards associated with mercury-filled thermometers, the use of alternative temperature measuring devices (such as thermocouples and RTDs) is encouraged with liquid-in-glass thermometers containing mercury, the use of alternative measuring devices, such as digital thermometers using thermocouple of RTD sensors is encouraged.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety, health and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 1—This test method is equivalent to ISO 306 in all sections with the exceptions of the allowance for creep, prior to the beginning of the test and the allowance of the fluidized powder as a heat transfer medium.

1.6 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*[2]

D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing

D883 Terminology Relating to Plastics

D1898 Practice for Sampling of Plastics (Withdrawn 1998)[3]

E1 Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers

E77 Test Method for Inspection and Verification of Thermometers

E608/E608M Specification for Mineral-Insulated, Metal-Sheathed Base Metal Thermocouples

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

E879 Specification for Thermistor Sensors for General Purpose and Laboratory Temperature Measurements

E1137/E1137M Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers

E2251 Specification for Liquid-in-Glass ASTM Thermometers with Low-Hazard Precision Liquids

E2935 Practice for Conducting Equivalence Testing in Laboratory Applications

2.2 *ISO Standards:*[4]

ISO 306 Plastics—Thermoplastic Material—Determination of Vicat Softening Temperature

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 Definitions of plastics used in this test method are in accordance with those defined in Terminology D883, unless otherwise specified.

3.1.2 *Vicat softening temperature*—the temperature at which a flat-ended needle of 1-mm^2 circular cross section will penetrate a thermoplastic specimen to a depth of 1 mm under

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.30 on Thermal Properties (Section D20.30.03).

Current edition approved Aug. 1, 2017. Published August 2017. Originally approved in 1958. Last previous edition approved in 2009 as D1525 – 09. DOI: 10.1520/D1525-17E01.

[2] For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

[3] The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

[4] Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, http://www.ansi.org.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Wed Mar 28 16:22:22 EDT 2018
Downloaded/printed by
Escuela Politecnica Nacional (Escuela Politecnica Nacional) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

ANEXO X.

NORMA ISO 306 TEMPERATURAS DE ABLANDAMIENTO VICAT PARA PLASTICOS

Provläsningsexemplar / Preview

INTERNATIONAL STANDARD

ISO 306

Fourth edition
2004-07-15

Plastics — Thermoplastic materials — Determination of Vicat softening temperature (VST)

Plastiques — Matières thermoplastiques — Détermination de la température de ramollissement Vicat (VST)

Reference number
ISO 306:2004(E)

© ISO 2004