



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE MECÁNICA

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS EFECTOS
DEL POST CALENTAMIENTO DE UNA JUNTA SOLDADA CON EL MÉTODO DE
FRICCIÓN DEL ACERO AISI 1045**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero mecánico

AUTOR: GUILLERMO MARCELO PARRA CEVALLOS

TUTOR: CRISTIAN ANDRES LEIVA GONZALEZ

Quito – Ecuador

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Guillermo Marcelo Parra Cevallos con documento de identificación N° 1725839961 manifesté que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 28 de marzo del año 2024

Atentamente,



Guillermo Marcelo Parra Cevallos
C.I.1725839961

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Guillermo Marcelo Parra Cevallos con documento de identificación N° 172839961, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta Tecnológica: “Caracterización de las propiedades mecánicas de los efectos del post calentamiento de una junta soldada con el método de fricción del acero AISI 1045”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final del formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de marzo del año 2024

Atentamente,



Guillermo Marcelo Parra Cevallos

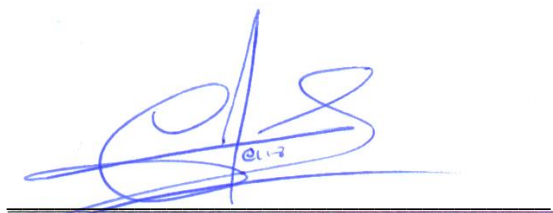
1725839961

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo Cristian Andrés Leiva Gonzales, con documento de identificación N°1716424476 , docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CARACTERIZACION DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS EFECTOS DEL POST CALENTAMIENTO DE UNA JUNTA SOLDADA CON EL MÉTODO DE FRICCIÓN DEL ACERO AISI 1045, realizado por Guillermo Marcelo Parra Cevallos con documento de identificación N°1725839961 obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de marzo del año 2024

Atentamente,



Ing. Cristian Andrés Leiva Gonzales. Mgtr.

1716424476

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por brindarme la sabiduría necesaria para llevar a cabo con éxito este proyecto de tesis, siendo mi refugio en los momentos más desafiantes. Expreso mi profundo agradecimiento a mi madre, quien ha sido el pilar fundamental, mi fuente de energía y la motivación indispensable para culminar exitosamente esta etapa en mi carrera profesional.

También expreso mi gratitud a mi padre, hermanos, familiares y amigos, quienes en diferentes momentos me han brindado su valiosa ayuda y motivación, contribuyendo de manera significativa a la consecución de mi objetivo de completar la carrera.

GUILLERMO PARRA

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento a todos quienes integran la Universidad Politécnica Salesiana, por los valiosos conocimientos y la colaboración proporcionada a lo largo de mi trayectoria académica. Asimismo, quiero expresar mi sincero reconocimiento al Ingeniero Cristian Andrés Leiva González, quien me orientó de manera fundamental para la conclusión exitosa de mi proyecto de tesis.

GUILLERMO PARRA

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE UNA JUNTA SOLDADA POR EL MÉTODO DE FRICCIÓN.....	3
<i>1.1 Glosario de términos.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2 Revisión del estado del arte.....</i>	<i>4</i>
<i>1.3 Fundamentación teórica.....</i>	<i>4</i>
Clasificación de soldadura.....	4
1.3.1.1 Proceso de soldadura.....	5
1.3.2 Soldadura por fricción.....	6
1.3.2.1 Fundamentación teórica de factores influyente en la soldadura a fricción....	6
1.3.2.2 Soldadura por fricción rotativa.....	7
1.3.2.3 Tipos de movimientos rotativos.....	7
1.3.2.4 Fases del desarrollo de soldadura mediante fricción.....	8
1.3.3 Propiedades físicas del acero AISI 1045.....	10
1.3.3.1 Constitución química del acero AISI 1045.....	11
1.3.3.2 Parámetros de soldabilidad mediante fricción del AISI 1045.....	12
1.3.4 Equipo empleado para la unión.....	12
1.3.4.1 Parámetros operativos para el procedimiento de unión.....	13
CAPÍTULO II.....	15
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
<i>2.1 Propuesta de solución.....</i>	<i>15</i>
<i>2.2 Metodología.....</i>	<i>16</i>
<i>2.3 Parámetros de diseño.....</i>	<i>17</i>
<i>2.4 Equipo de torneado.....</i>	<i>18</i>

2.5	<i>Equipo de proceso de soldadura</i>	18
2.6	<i>Horno de tratamientos térmicos</i>	19
2.7	<i>Parámetros iniciales de soldadura a fricción</i>	20
2.8	<i>Soldadura a fricción sin post calentamiento</i>	22
2.8.1	<i>Ensayo a fricción con post calentamiento</i>	24
2.9	<i>Ensayos de caracterización mecánica</i>	27
2.9.1	<i>Normativa ASTM E8</i>	27
2.10	<i>Equipo de ensayo de tracción</i>	27
2.10.1	<i>Ensayo a Tracción o tensión</i>	28
2.11	<i>Probetas de ensayo a tensión</i>	29
CAPÍTULO III		33
3	RESULTADOS	33
3.1	<i>Parámetros de soldadura mediante fricción rotativa</i>	33
3.2	<i>Encogimiento axial</i>	34
3.3	<i>Ensayo a tracción sin post calentamiento</i>	35
3.4	<i>Ensayo a tracción con post calentamiento</i>	38
3.5	<i>Ensayo a tracción sin soldadura del AISI 1045</i>	40
3.6	<i>Discusión de propiedades mecánicas en estado de suministro y soldadura a fricción con y sin post calentamiento</i>	42
CONCLUSIONES		46
RECOMENDACIONES		47
LISTA DE REFERENCIAS		48
ANEXOS		51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento mecánico con respecto al oxígeno en la soldadura.....	7
Figura 2. Disposiciones típicas de soldadura mediante fricción [7].....	8
Figura 3. Fases del desarrollo de unión mediante fricción [9].....	9
Figura 4. Diagrama de soldadura a fricción rotacional [21].....	10
Figura 5. Máquina de soldadura rotativa [25].....	13
Figura 6. Flujograma metodológico desde la materia prima hasta la obtención de las probetas, sin y con post calentamiento.....	16
Figura 7. Dimensionamiento de muestras para soldar mediante FSW.....	17
Figura 8. Torno EMCO MAT-17D.....	18
Figura 9. Máquina de soldadura a Fricción de torque continuo.....	19
Figura 10. Horno de tratamiento térmicos Nabetherm.....	20
Figura 11. Denominación de cada probeta.....	21
Figura 12. Ensayo de unión a fricción.....	22
Figura 13. Soldadura a fricción, a) con rebaba, b) mecanizado.....	23
Figura 14. Probetas sin post calentamiento soldadas a fricción.....	24
Figura 15. Diagrama TTT del acero AISI 1045 [31].....	26
Figura 16. Probetas sin post calentamiento soldadas a fricción.....	26
Figura 17. Dimensionamiento de probetas cilíndricas para ensayo a tensión o tracción bajo la normativa ASTM E8.....	27
Figura 18. Máquina universal TESTRESIST.....	28
Figura 19. Probetas sin post calentamiento soldado a fricción.....	29
Figura 20. Caras de rotura de probetas sin post calentamiento.....	30
Figura 21., Probetas con post calentamiento soldado a fricción.....	31
Figura 22. Caras de rotura de probetas con post calentamiento.....	31
Figura 23. Probetas de suministro del AISI 1045.....	32
Figura 24. Caras de rotura de probetas de suministro.....	32
Figura 25. Diagrama de presión vs tiempo mediante soldadura a fricción.....	34
Figura 26. Diagrama Esfuerzo deformación del acero AISI 1045 con soldadura a fricción sin post calentamiento.....	36
Figura 27. Análisis de falla probetas 4 y 5 sin post calentamiento.....	37
Figura 28. Esfuerzo de fluencia y elongación del AISI 1045 sin post calentamiento.....	37

Figura 29. Diagrama Esfuerzo deformación del acero AISI 1045 con soldadura a fricción con post calentamiento.....	39
Figura 30. Esfuerzo ultimo de ruptura y % de elongación del AISI 1045 con post calentamiento.....	40
Figura 31. Diagrama esfuerzo deformación del acero AISI 1045 en estado de suministro.....	41
Figura 32. Esfuerzo ultimo de ruptura y % de elongación del AISI 1045 en suministro.....	42
Figura 33. Diagrama esfuerzo vs deformación de las probetas sin post calentamiento, con post calentamiento y suministro.....	43
Figura 34. Diagrama esfuerzo máximo y módulo de Young del AISI 1045 en estado de suministro y mediante soldadura a fricción con y sin post calentamiento.....	44
Figura 35. Diagrama y esfuerzo de fluencia y % de elongación del acero AISI 1045 en estado de suministro y mediante soldadura a fricción con y sin post calentamiento.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Subprocesos de soldadura sin llegar al estado líquido (SSW).....	5
Tabla 2. Características físicas.....	11
Tabla 3. Parámetros del AISI 1045.....	11
Tabla 4. Parámetros de acero AISI 1045.....	12
Tabla 5. Parámetros de maquinabilidad del AISI 1045.....	17
Tabla 6. Parámetros de soldadura mediante el proceso FSW.....	20
Tabla 7. Longitud de probetas.....	21
Tabla 8. Parámetros obtenidos de la soldadura a fricción.....	22
Tabla 9. Encogimiento Axial.....	23
Tabla 10. Parámetros obtenidos de la soldadura a fricción antes del post calentamiento.....	24
Tabla 11. Encogimiento Axial antes del post calentamiento.....	25
Tabla 12. Parámetros de soldadura a fricción.....	33
Tabla 13. Encogimiento axial.....	34
Tabla 14. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción sin post calentamiento.....	35
Tabla 15. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción con post calentamiento.....	38
Tabla 16. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción del AISI 1045 en suministro.....	40
Tabla 17. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción del AISI 1045 en suministro y mediante soldadura a fricción con y sin post calentamiento.....	42

RESUMEN

El propósito de esta investigación es detallar de manera específica las propiedades mecánicas de los efectos de post calentamiento de una junta soldada mediante fricción rotativa del acero AISI 1045. Las especificaciones técnicas para la soldadura son: presión de calentamiento de $30\text{kg}/\text{cm}^2$ por 17.26s y la presión de forja de $70\text{kg}/\text{cm}^2$ por un tiempo de 9.19s. En el post calentamiento se desea llegar a la fase del 100% bainita cuyos parámetros son sobrepasar los 800C de temperatura de austenización obteniendo 100% austenita, enfriar por 15s a temperatura ambiente hasta llegar a los 400C donde se alcanza una transformación de 50% austenita y 50% bainita, luego mantener constante en un horno precalentado por al menos 20min y se deja enfriar a temperatura ambiente llegando al 100% bainita. Los resultados obtenidos del ensayo sin post calentamiento son: esfuerzo máximo de 868.78MPa, elongación de 0.2m/m y el módulo de Young de 9615.41 MPa; con post calentamiento son: 860.66MPa de esfuerzo máximo, 0.1m/m de elongación y 14405.18MPa de módulo de Young. Se concluye que, con los parámetros especificados para soldadura a fricción rotativa, con post calentamiento la zona elástica ha mejorado superando el módulo de Young en 37% al de sin post calentamiento.

Palabras claves: Fricción, forja, post calentamiento, soldadura

ABSTRACT

The aim of this study is to precisely elaborate on the mechanical characteristics resulting from the post-heating impacts on a weld joint formed through the rotary friction welding of AISI 1045 steel. The technical specifications for welding are: heating pressure of $30\text{kg}/\text{cm}^2$ for 17.26s and the forging pressure of $70\text{kg}/\text{cm}^2$ for a time of 9.19s. In the post-heating phase, it is desired to reach the 100% bainite phase, whose parameters are to exceed the austenitization temperature of 800C, obtaining 100% austenite, cool for 15s at room temperature until reaching 400C, where a transformation of 50% austenite is achieved, and 50% bainite, then keep constant in a preheated oven for at least 20 minutes and allow it to cool until it reaches the ambient temperature, reaching 100% bainite. The results obtained from the test without post-heating are: maximum stress of 868.78MPa, elongation of 0.2m/m and Young's modulus of 9615.41 MPa; with post heating are: 860.66MPa maximum stress, 0.1m/m elongation and 14405.18MPa Young's modulus. It is concluded that, with the parameters specified for rotary friction welding, with post-heating the elastic zone has improved, exceeding the Young's modulus by 37% than without post-heating.

Keywords: Friction, forging, post heating, welding

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los siglos, la conexión de piezas mediante soldadura ha sido una preocupación constante para la humanidad. Lo que inicialmente surgió como una necesidad básica en tiempos antiguos, donde se unían piedras y palos con fibras vegetales para la supervivencia, se ha transformado en un tema esencial. Con el desarrollo de nuevos materiales, los métodos de unión han evolucionado a lo largo del tiempo. Desde las primeras uniones de metales con soldaduras en el pasado Egipto hace más de tres mil años hasta las más recientes aplicaciones de soldadura en los dispositivos solares instalados en la Estación Espacial Internacional, esta técnica ha perdurado a lo largo de diferentes épocas y usos [1], [2].

La soldadura no se limita solo a la fabricación, sino que también desempeña un papel crucial en el mantenimiento. Los desafíos más complicados en este ámbito suelen surgir durante las tareas de mantenimiento. Este procedimiento implica la aplicación de calor en áreas específicas de metales, los cuales siguen los principios físicos de expansión y contracción, alterando su estructura, especialmente cuando se encuentran en condiciones de movimiento limitado. Durante el proceso de soldadura, el aumento de volumen en una pequeña porción de las piezas se ve influenciado por la variación de temperatura desigual en el metal base y por el grado de ajuste entre las partes. Por lo tanto, el incremento en el volumen libre está directamente vinculado al gradiente o variación de temperatura y al coeficiente de dilatación sometido a calentamiento [1], [3].

Durante el procedimiento de soldadura, diversos sucesos físicos se desencadenan como efecto de factores como la temperatura, las deformaciones y esfuerzos, así como la microestructural. Los esfuerzos originados durante las operaciones de soldadura juegan un papel fundamental en las estructuras, piezas metálicas y componentes ya que tienden a minimizar la susceptibilidad al esfuerzo de fatiga y mejorar la resistencia del material. En determinadas circunstancias, los cordones de soldadura se someten a procesos de mecanizado por razones de diseño, lo que podría introducir esfuerzos residuales adicionales en el material [1], [4].

PROBLEMA DE ESTUDIO

En Ecuador la soldadura mediante fricción (FRW) se encuentra en proceso de desarrollo [5]. Esta técnica de soldadura se basa en la generación de calor mediante la fricción entre dos piezas, donde una permanece estática y la otra se desplaza, con el fin de unir materiales que presentan dificultades para soldarse por fusión. La calidad de las uniones logradas mediante este método

depende crucialmente del control de parámetros como el tiempo durante la fase de calentamiento, la presión de forjado, la velocidad rotacional y la precarga aplicada. Por ende, se busca establecer valores adecuados que aseguren una unión completa en las barras. El propósito de este estudio es establecer o descubrir el tiempo de calentamiento más idóneo para lograr una unión completa mediante la técnica de fricción en barras de acero AISI 1045.

JUSTIFICACIÓN

Debido al problema expuesto anteriormente, el cual con lleva problemas de seguridad y económicos, en el presente proyecto se realizará el estudio soldabilidad por el método de fricción rotativa para detectar los puntos más críticos de la soldabilidad del acero AISI 1045, y luego se propondrá la implementación de especificaciones como tiempo y presión en la etapa de calentamiento, tiempo y presión en la etapa de forjado y velocidad de rotacional

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar las propiedades mecánicas de los efectos del post calentamiento de una junta soldada con el método de fricción del acero AISI 1045

OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Establecer las especificaciones técnicas, para el proceso de soldadura a fricción del acero AISI 1045.
- Determinar la temperatura y tiempo de post calentamiento en la junta soldada.
- Determinar las propiedades mecánicas del AISI 1045 soldado mediante el proceso de fricción con y sin post calentamiento.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS MEDIANTE UNA JUNTA SOLDADA POR EL MÉTODO DE FRICCIÓN

1.1 Glosario de términos

Soldadura: Consiste el proceso de acoplamiento de materiales metálicos, el cual es realizado mediante fusión localizada mediante la aplicación de calor o presión, se puede hacer mediante aporte o sin aporte de material a los elementos involucrados [4], [5].

Soldadura mediante fricción: Proceso de soldadura con sus siglas FRW (Friction Welding) tiene la capacidad de unir las aleaciones no iguales como por ejemplo el aluminio con algún acero, este proceso de soldadura no es tan utilizada en el medio, además existen algunos tipos de soldadura mediante fricción como son las lineales y de rotación [6], [7].

Soldadura por fricción mediante rotación: Se fundamenta en la utilización esencial de una herramienta rotativa, el cual contenga un material estático que se penetre con presión determinada y el otro material rote de tal manera que genere conducción de calor a diferentes revoluciones dependiendo del material [8].

Superficie de fricción: Es el factor principal para que se dé una correcta unión mediante soldadura, entre los aspectos de la superficie de fricción las cuales afecta la soldabilidad están el acabado o rugosidad, planitud o perpendicularidad, y la limpieza [9].

Post calentamiento en soldadura: controla el enfriamiento uniforme del material base luego de la soldadura a una temperatura definida, para que su enfriamiento no sea brusco, y evitar burbujas de hidrogeno que cristalizan la unión de materiales [10], [11].

Precaentamiento en soldadura: la duración del periodo de calentamiento se establece específicamente para una aplicación dada, ya sea durante la fase de preparación o en función de la experiencia acumulada. La duración de calentamiento prolongado puede restringir la productividad y dar lugar al desperdicio de material, mientras que un periodo de calentamiento insuficiente podría resultar en un calentamiento desigual y en la retención de óxidos en áreas no unidas de la interfaz. [12].

Acero: La capacidad de templado del acero está vinculada a su composición molecular, siendo que mayores niveles de C (carbono) y otros elementos de compuesto metálicos conllevan a una mayor templabilidad y, consecuentemente, a una disminución en la facilidad de soldabilidad [13] [14].

Acero AISI 1045: Tiene buenas propiedades de ductilidad y resistencia mecánica, el acero presenta una soldabilidad sobresaliente y una mayor facilidad para ser maquinado en comparación con la mayoría de los aceros que incluyen carbono, poseen 0.45% de carbono además es ideal para engranes de maquinaria, árbol de pernos, levas, etc [15], [16].

1.2 Revisión del estado del arte

Las uniones entre diferentes materiales como aceros inoxidables, acero al carbono o aluminios, entre otros, hechas por soldadura por fricción, no han sido investigadas como las de soldadura mediante el uso de arco eléctrico. En la soldadura con fricción, el calor puede cambiar la estructura del material. Es crucial entender estos cambios y cómo afectan las propiedades mecánicas de la unión [2].

1.3 Fundamentación teórica

No se ha dedicado una atención exhaustiva a la investigación de las conexiones entre aceros inoxidables y al carbono mediante técnicas de soldadura o unión mediante fricción rotacional o radial en analogía de las conexiones por arco eléctrico. En el caso de las conexiones mediante fusión de materiales diversos, tanto la energía térmica suministrada como las variaciones de temperatura durante la etapa de unión pueden modificarse las fases conocidas, dando lugar a cambios microestructurales particulares [2], [17].

En investigaciones anteriores, Kawai y su equipo llevaron a cabo el proceso de soldadura mediante fricción empleando dos materiales con propiedades térmicas y físicas diferentes. En su estudio, examinaron cómo las condiciones de soldadura afectan la generación de fuerzas internas y externas en las articulaciones y rebabas, tal como la resistencia o esfuerzo a la tensión de la tubería resultante. Concluye que la zona deformada y unida experimenta un aumento a medida que progresa el tiempo de unión, y la resistencia de tensión de la tubería soldada incrementa en razón a la presión aplicada durante la etapa de soldadura [12].

Clasificación de soldadura

La soldadura (S), que es la técnica más ampliamente utilizado para unir metales, abarca una variedad extensa de técnicas, entre las cuales se destacan las siguientes [6]:

- MAG (Metal Active Gas)
- GMAW (Gas Metal Arc Welding)
- MIG (Metal Inert Gas)
- TIG (Tungsten Inert Gas)

1.3.1.1 Proceso de soldadura

Según Larry Jeffus en su libro “Principio y aplicaciones de soldadura”, explica que existe una diferencia en el modo en que se aplica el calor y la presión, además del equipo utilizado; el proceso empleado en la presente investigación es el de soldadura de estado sólido (SSW), en la Tabla 1 se adjunta los subprocesos derivados del SSW.

Tabla 1. Subprocesos de soldadura sin llegar al estado líquido (SSW)

Subprocesos de soldadura (S)	Siglas
S. coextrucción	CEV
S. fría	CW
S. difusión	DFW
S. explosión	EXW
S. forjado	FOW
S. fricción	FRW
S. presión y calor	HPW
S. laminación	ROW
S. ultrasónica	USW

El subproceso de soldadura para esta investigación se genera por fricción en el cual las piezas a unir se calientan mediante la generación de calor a través de la fricción entre ellas. La soldadura mediante fricción presenta dos perspectivas de aplicación que difieren según el tipo de uniones que se deseen unir. Puede emplearse utilizando una fresadora corriente para ensamblar uniones planas o láminas extensas, o a través de un torno convencional para unir juntas con sección transversal circular, como las que se encuentran en tuberías [18]. Este proceso debe cumplir dos etapas de fricción y el de frenado, más adelante se detalla estas etapas [20].

La soldadura por fricción es una técnica relativamente reciente, desarrollada alrededor de 1991. Existe un interés en incorporar este método en la industria debido a su naturaleza económica, ya que no necesita tanto de elementos de aporte como equipos altamente especializados. Además, destaca por ser técnicamente limpio, que no produce emisión de gases tóxicos al medio ambiente, lo cual sería perjudicial para la salud del operario [6].

1.3.2 Soldadura por fricción

En este procedimiento, se usa el método de unión por fricción, el cual beneficia del calor generado por medio de la frotación o rozamiento entre las dos piezas. La soldadura, como técnica para unir aleaciones metálicas, cuenta con una extensa trayectoria histórica. Su aplicación inmediata fue influenciada por la evolución industrial y la necesidad de construcciones unidas con elevada rigidez y calidad, con el propósito de simplificar el proceso de fabricación y asegurar la reducción de costos, la seguridad, la confiabilidad y la resistencia a las condiciones laborales. Por lo tanto, es fundamental adoptar precauciones adecuadas durante el procedimiento de unión para cautelar cualquier efecto adverso que pueda surgir, preservando el nivel de esfuerzo y resistencia a la corrosión en el área unida o soldada, que constituye una parte esencial del metal base [18],[19].

1.3.2.1 Fundamentación teórica de factores influyente en la soldadura a fricción

Los factores principales que influyen en la soldadura a fricción son: velocidad relativa a la superficie, temperatura superficial, presión aplicada y el tiempo de calentamiento [16].

Velocidad relativa: su velocidad varía según el área superficial y el material, esta entre un rango de 75-105m/min, se recomienda velocidades altas porque producen una amplia zona de soldadura por el calor [16].

Temperatura y presión aplicada: es el parámetro fundamental existen dos tipos de presiones de calentamiento y de forja, para la fase de calentamiento una presión alta ayuda a que el material alcance una temperatura plástica en un tiempo menor y obteniendo eventualmente la unión de los materiales. En la etapa de forja depende la resistencia en temperaturas calientes del material donde la presión debe ser suficiente y mayor para consolidar la soldadura [16].

Tiempo de calentamiento: es el tercer parámetro fundamental, esto define la entrada de energía en la soldadura ligada a deformación plástica [16].

Además de los parámetros especificados anteriormente también existe el comportamiento mecánico con respecto al oxígeno existente en la soldadura, la Figura 1 indica el diagrama de comportamiento mecánico [21].

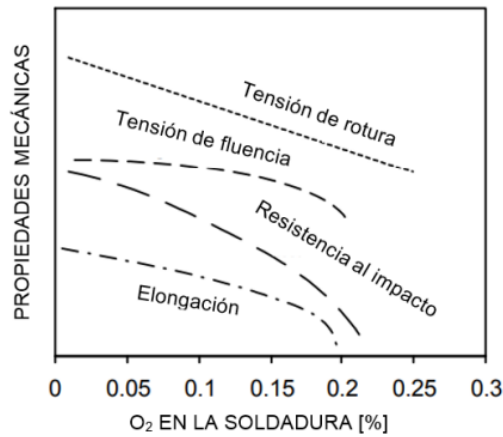


Figura 1. Comportamiento mecánico con respecto al oxígeno en la soldadura

En relación al porcentaje, las propiedades disminuyen, por lo tanto, se ve afectado directamente el óxido de hierro.

1.3.2.2 Soldadura por fricción rotativa

La dinámica física de este procedimiento implica la generación de calor en el material mediante la fricción inducida por una herramienta que exhibe una dureza y resistencia de fatiga superiores al del material base. El aumento de temperatura ocasiona que el material se eleve a su punto de derretimiento y se unan a través de la agitación generada por la geometría específica de la herramienta. En el extremo inferior de esta herramienta, que es la parte en contacto directo con el material base, se presentan anillos [19].

1.3.2.3 Tipos de movimientos rotativos

Cualquiera de las dos piezas gira entorno a un eje simétrico, con el área de contacto dispuestas de manera perpendicular a dicho eje. En términos generales, ya sea una única pieza o varias, una de las 2 piezas comprometido en el proceso de soldadura puede adoptar la configuración representada en la Figura 2 [7].

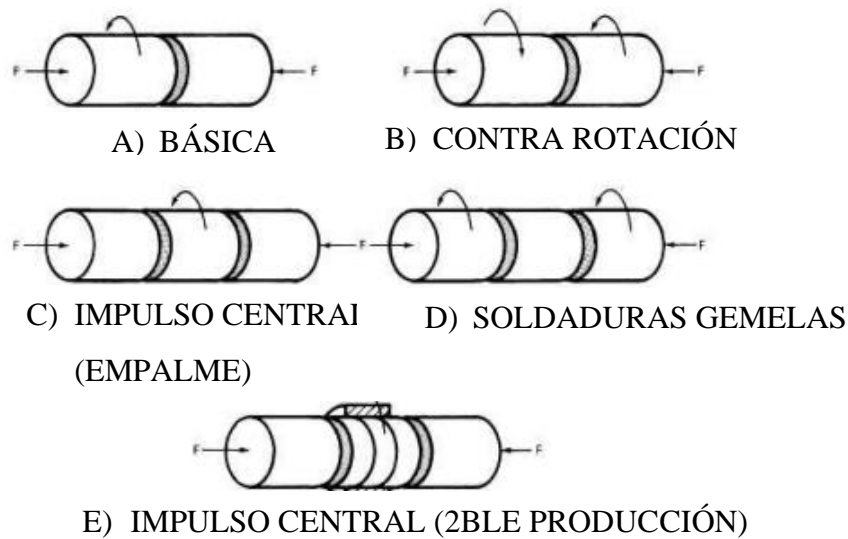


Figura 2. Disposiciones típicas de soldadura mediante fricción [7].

La disposición de la unión soldada, se determina a partir de la velocidad rotativa y su presión axial aplicada, en la Figura 2 tenemos la básica (A), Contra rotación (B), Impulso central (C), soldaduras gemelas (D) e impulso central de doble producción (E). En este estudio, la disposición básica de la soldadura es fundamental. Es esencial determinar qué tipo de disposición utilizar para garantizar la formación de una unión sólida y uniforme. La expansión radial del material caliente en la interfaz desempeña un papel crucial al eliminar agentes oxidantes y otras impurezas en esta área. La soldadura mediante fricción es altamente adaptable y puede emplearse para unir diversos materiales, siempre que al menos uno de los elementos presente cierta proporción rotacional. Esta técnica permite la unión de piezas tubulares o sólidas, obteniendo una resistencia satisfactoria en la conexión. Se ha logrado con éxito unir las barras sólidas de acero con diámetros menores de 100 mm y tubos con diámetros exteriores menores a 250 mm mediante este enfoque [20].

1.3.2.4 Fases del desarrollo de soldadura mediante fricción

La soldadura mediante fricción rotativa es realizada principalmente por 3 parámetros; presión, velocidad y desplazamiento o encogimiento del material. En la Figura 3 se indica las Fases a lo largo del tiempo durante un ciclo completo de soldadura [9].

- Dirección de rotación, en la Figura 3a) se indica la etapa donde comienza desde la rotación, el cual influye la velocidad rotacional y dirección de giro del material a soldarse

- Etapa de fricción, la Figura 3b) indica que se generan dos niveles el de empuje aplicado y el de desplazamiento del material, además es la más larga en el tiempo.
- Etapa de recalado o frenado y forja, en la Figura 3c) aquí se realiza un frenado brusco y se ejerce una presión que es de dos a tres veces mayor que la aplicada en la fase anterior.

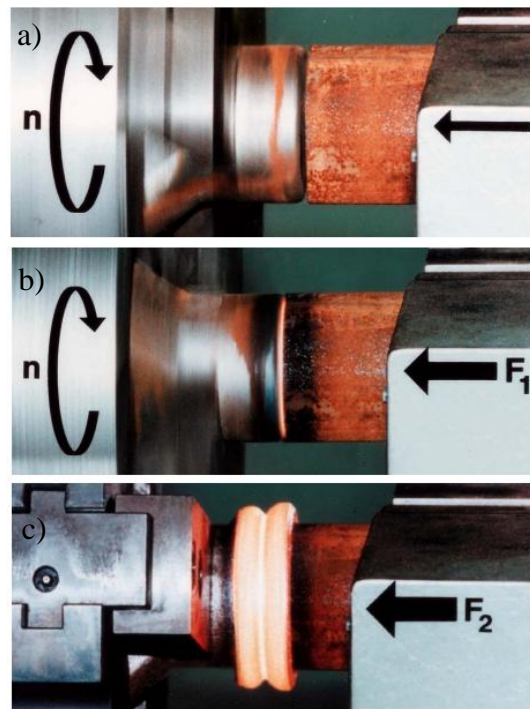


Figura 3. Fases del desarrollo de unión mediante fricción [9].

Es importante destacar que, según los autores Pedro Cabot y Alberto Moglioni en su artículo “soldadura por fricción”, indican que la fase de recalado o forja es considerablemente más breve en comparación con la fase de fricción. En tan solo 3s desde que se detiene el cabezal giratorio, el material baja su temperatura y deja de estar en estado plástico, independientemente de la presión aplicada. En la Figura 4 se detallan los parámetros clave, incluyendo la velocidad rotacional de la máquina y la presión ejercida, el a) indica la gráfica de velocidad rotacional Vs tiempo, en el b) se muestra de presión vs tiempo y en el c) una gráfica adicional de trabajo generado vs tiempo. Se debe mencionar que estas graficas dan los resultados del comportamiento del material a lo largo de las dos etapas principales en la de fricción y forja [9].

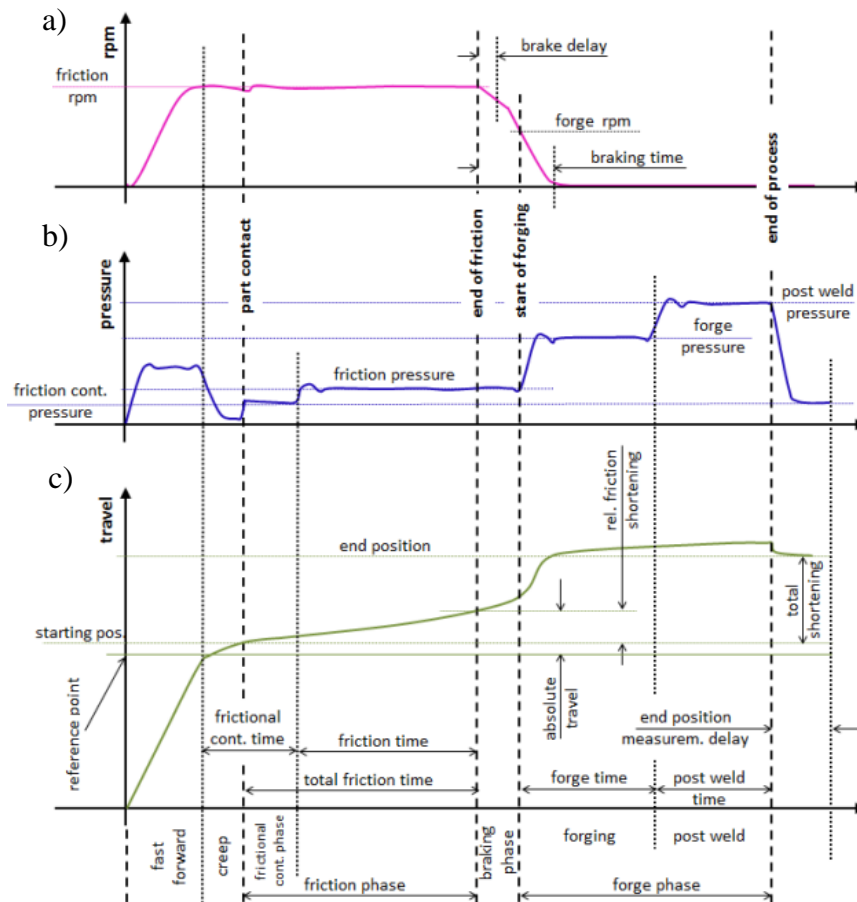


Figura 4. Diagrama de soldadura a fricción rotacional [21].

La esencia fundamental de la soldadura mediante fricción radica en aprovechar el calor generado mediante la fricción de la pieza para crear una unión sin la formación de una fase líquida. Inicialmente, la fuerza de contacto genera calor en la interfaz. Una vez que el material se ha ablandado lo suficiente, la presión ejercida sobre los dos componentes provoca una fuerza dentro del material caliente en la interfaz, generando el destello que elimina cualquier contaminante de la superficie y resulta en una unión sin impurezas [21].

1.3.3 Propiedades físicas del acero AISI 1045

Hace referencia a una mezcla de aluminio de alta resistencia que se lamina en caliente y se suministra en forma de placas tratadas térmicamente. Estas placas son sometidas a una operación específica de estiramiento en frío para lograr el máximo alivio de tensiones. Además, esta aleación exhibe características destacadas como: bajo peso, excelente mecanizado, alta conductividad térmica, resistencia a la corrosión, buena estabilidad y es adecuada para tratamientos superficiales. La Tabla 2 detalla las principales características físicas del AISI

1045 [22].

Tabla 2. Características físicas

DETALLE	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Densidad	g/cm ²	7.87
Módulo elástico	GPa	200
Resistencia máxima a tracción	MPa	655
Coefficiente térmico de expansión	°C	23e10-4
Conducción térmica	W/m°C	52
Capacidad calórica específica	J/kg°C	460

El acero AISI 1045 se clasifica como un acero con contenido medio de carbono y exhibe una microestructura compuesta principalmente por ferrita-perlita. La sustancia de carbono no es el excepcional factor determinante de la soldabilidad, un incremento en el porcentaje de este elemento está asociado a un mayor riesgo de agrietamiento. En situaciones donde el contenido de carbono tiene un alcance de 0,30 hasta 0,35%, se deben tomar cuidados adicionales, como el precalentamiento, la regulación del calor entrante y de tratamientos térmicos posteriores a la soldadura [3].

1.3.3.1 Constitución química del acero AISI 1045

Este tipo de acero puede ser empleado en condiciones de suministro directo, ya sea sometido a tratamiento térmico o laminado en caliente. Su composición química comprende un 0.43-0.50% de carbono (C), un 0.6-0.9% de manganeso (Mn), un máximo de 0.05% de azufre (S), un máximo de 0.04% de fósforo (P), y un 0.2-0.4% de silicio (Si). La resistencia de los materiales disminuye conforme aumenta la temperatura, ya que el calentamiento mejora la adaptabilidad de los átomos. En situaciones de temperaturas elevadas, la deformación se ve influenciada por la expansión del material, lo que impacta de manera radical en las propiedades del elemento. Las propiedades generales del AISI 1045 se describen en detalle con la Tabla 3 [2], [23].

Tabla 3. Parámetros del AISI 1045

Propiedades	UNIDAD	AISI 1045
Resistividad eléctrica específica	Ohm cm	1.7 e-0.05
Punto de fusión	°C	1400
Capacidad térmica	J/g °C	0.486

A pesar de las propiedades indicadas, es crucial destacar que todos los metales son susceptibles de soldarse siempre que se empleen los procedimientos y técnicas adecuados. La comprensión de la composición, propiedades y estructura de un metal proporciona la capacidad de diseñar y realizar soldaduras más efectivas. Esto subraya la conexión estrecha entre la metalurgia de un metal y su capacidad de ser soldado, o sea, su soldabilidad [2].

1.3.3.2 Parámetros de soldabilidad mediante fricción del AISI 1045

El AISI 1045 exhibe propiedades favorables en cuanto a resistencia mecánica y ductilidad, aunque presenta baja facilidad de soldadura, al mismo tiempo que muestra una buena capacidad para ser maquinado, la Tabla 4 se indica los parámetros del acero AISI 1045, donde se detalla los rangos de velocidades, tiempo y presión en la soldabilidad mediante fricción[16].

Tabla 4. Parámetros de acero AISI 1045

DETALLE	UNIDAD	AISI 1045
Diámetro	mm	12
velocidad	m/s	1.27-1.78
tiempo	s	10-14
Presión de calentamiento	Kg/mm ²	3.17-6.13
Encogimiento axial	mm	5

Debido a su combinación de dureza y tenacidad, se emplea este acero en la producción de componentes para maquinaria. El acero no aleado se usa en la confección de flechas y diversas piezas de maquinaria, siendo apto para el temple superficial. Se encuentra aplicado en la fabricación de flechas, piñones, engranajes, pernos, tornillos, semiejes, ejes, cigüeñales, entre otros [16], [24].

1.3.4 Equipo empleado para la unión

Esta máquina se utiliza en la etapa de producción de piezas con forma circular, permitiendo tolerancias reducidas y logrando acabados superficiales precisos. Su diseño incorpora una mezcla de cajas angulares y elementos internos, lo que le confiere versatilidad para diversas aplicaciones. Está equipada con husillos que permiten movimientos de avance y retroceso, y cuenta con un sistema de frenado hidráulico controlado. La utilización del freno manual brinda al operador una herramienta práctica, gracias a su freno sensible, seguro y fiable. Destaca por su rigidez, tanto en la estructura como en la facultad de transmisión en su potencia. En la Figura 5, se representa esquemáticamente los elementos fundamentales del equipo utilizado en el

proceso de unión o soldadura rotativa por fricción [25].

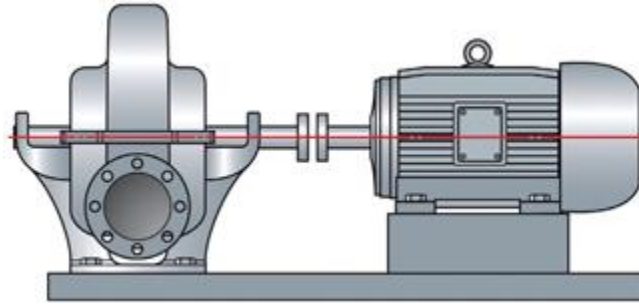


Figura 5. Máquina de soldadura rotativa [25].

Para realizar la soldadura mediante fricción de torque, se posiciona el elemento estacionario en una mordaza montado en la parte móvil, mientras que el elemento que rotara se ubica en un plato centrante equipado con cuatro insertos sujetadores. La elección de esta máquina se basa en su constante precisión y su habilidad para efectuar cortes exigentes en piezas a altas velocidades. Se selecciona porque cumple con las especificaciones necesarias para operar como una máquina rotacional de soldadura por fricción y también debido a los costos elevados asociados a las máquinas específicamente diseñadas para este tipo de soldadura. Esto la convierte en una elección apropiada para la aplicación de este proceso, especialmente en el contexto de la investigación [25].

1.3.4.1 Parámetros operativos para el procedimiento de unión

En el contexto de la soldadura mediante fricción del acero AISI 1045, la relación entre los factores del proceso en la soldadura con torque continuo está condicionada por la velocidad de la pieza en movimiento. La velocidad experimenta un incremento progresivo hasta alcanzar la rapidez de soldadura, indicando el comienzo de la fase de calentura. La presión axial aumenta hasta alcanzar el valor de la presión de calentamiento, y aunque la velocidad rotacional permanece igual, la potencia suministrada por el motor crece proporcionalmente a la presión axial. Durante la etapa de calentamiento, la interfaz entra en un estado plástico, lo que resulta en una contracción de las piezas [26].

La fase de transición o recalado comienza con la desconexión del motor y la activación del freno, lo que resulta en una disminución abrupta de la velocidad, simultáneamente, la fuerza axial aumenta hasta llegar al valor de forja.

La reducción en la longitud de los elementos también se incrementa. La fase de forjado empieza

al detener la pieza en movimiento, y la presión axial alcanza el valor predefinido, provocando una mayor contracción de los elementos y expulsando la materia en estado plástico de la zona de interfaz. La unión soldada se forma cuando se finaliza el proceso de contracción [26].

Velocidad de soldadura: La rotación tiene como propósito crear una velocidad relativa entre las superficies que se están uniendo. En lo que respecta a la calidad de la soldadura, la velocidad raramente se considera como una variable crítica. En el caso de los ensayos de acero AISI 1045 con diámetros de hasta 25 milímetros utilizadas en el estudio mencionado, se aplica una velocidad de 1,400RPM [26].

Presión de soldadura: La presión desempeña un papel crucial en la regulación del gradiente de temperatura focalizado en la unión, el acortamiento axial y la potencia de impulso requerida. La presión focalizada varía según los materiales que se están uniendo y la geometría de la unión. Debe ser lo suficientemente elevada para asegurar que las superficie o área de unión permanezcan en contacto cercano y para prevenir la oxidación. En el estudio, se emplea una presión de fricción de 75 MPa [26], [1].

Tiempo de calentamiento: en una aplicación específica, se define el tiempo de calentura durante la preparación o basándose en experiencias previas. Un período de calor prolongado puede disminuir la eficiencia productiva y resultar en desperdicio de material, mientras que un tiempo insuficiente podría provocar un calentamiento desigual y la retención de óxidos en áreas no unidas de la interfaz. La determinación de este parámetro está relacionada con las velocidades y presiones aplicadas al material que se va a soldar [26], [1].

Dureza: Este parámetro, esencial para los materiales, juega un papel crucial en la resistencia a desgastes abrasivos, adhesivos y a la fatiga por contacto superficial. Su valor determina el comportamiento del proceso y se evaluará al finalizar la soldadura de la aleación [26], [1].

CAPÍTULO II

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se propone la descripción de las propiedades mecánicas de los efectos del post calentamiento de una junta soldada mediante el proceso de soldadura FSW al acero AISI 1045, considerando ensayos con y sin post calentamiento.

2.1 Propuesta de solución

El desarrollo de esta propuesta tecnológica se lo hace mediante los siguientes hitos metodológicos:

- Se establece las especificaciones técnicas de velocidad rotativa, presión de forja, presión de calentamiento, y tiempo de soldadura.
- Posteriormente con el diagrama TTT del acero AISI 1045 se propone los parámetros de temperatura y tiempo para el post calentamiento en la junta soldada.
- Finalmente se evalúa las propiedades principales del acero AISI 1045 soldado por el proceso FSW con y sin post calentamiento mediante los respectivos ensayos mecánicos bajo las normas.

2.2 Metodología

El desarrollo de las propiedades mecánicas resultadas por la soldadura mediante fricción (FSW) de probetas AISI 1045 con la aplicación de post calentamiento y sin post calentamiento, se empieza mecanizando las probetas dejando en las mismas dimensiones cada uno, luego se coloca en la máquina de soldadura por fricción rotacional donde se va ir variando los parámetros de velocidad, tiempo y presión de calentamiento, además se mecaniza las piezas soldadas dejando en un mismo diámetro bajo norma para el ensayo a tracción, finalmente se realiza una comparación para analizar la eficacia de la soldadura con respecto a la aplicación de post calentamiento frente a la soldadura sin post calentamiento. En la Figura 6 se presenta el flujograma metodológico hasta la obtención de las probetas mediante soldadura a fricción rotativa sin y con post calentamiento.

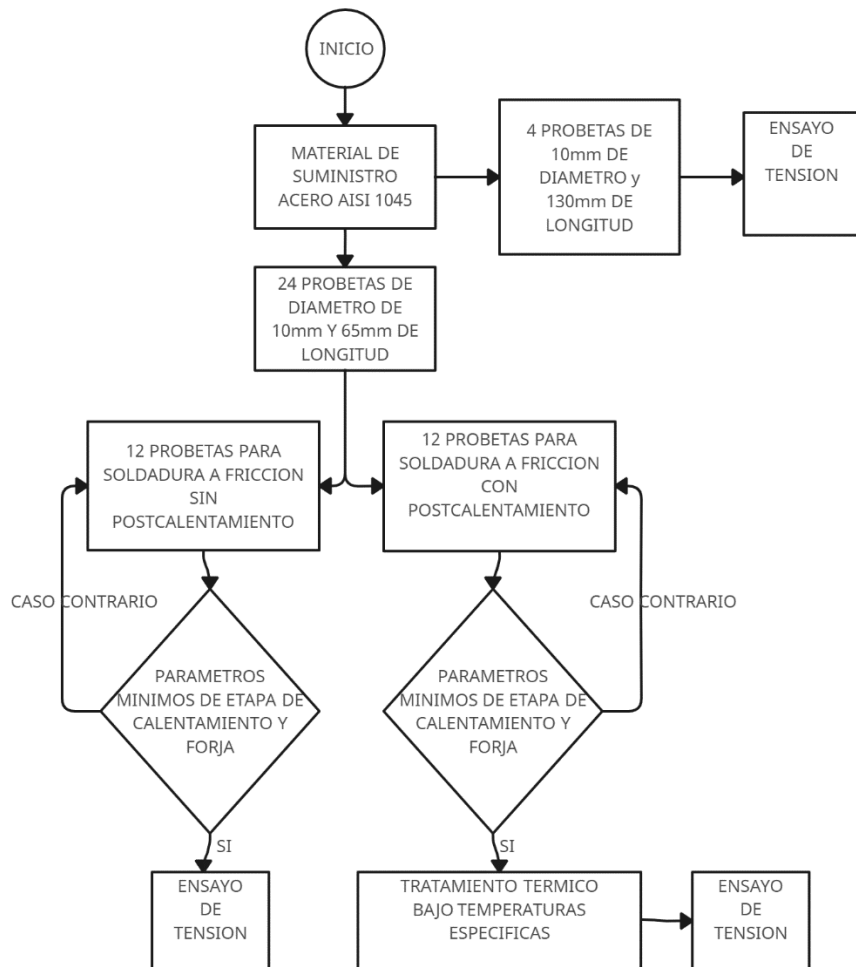


Figura 6. Flujograma metodológico desde la materia prima hasta la obtención de las probetas, sin y con post calentamiento.

2.3 Parámetros de diseño

La soldadura será óptima si la consistencia y la calidad están libres de impurezas, incrustaciones, etc. Las probetas tienen que ser torneadas hasta llegar a las dimensiones indicadas en la Figura 7, se debe tener en cuenta que el diámetro máximo de la máquina de soldadura mediante fricción de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) es de 15mm.

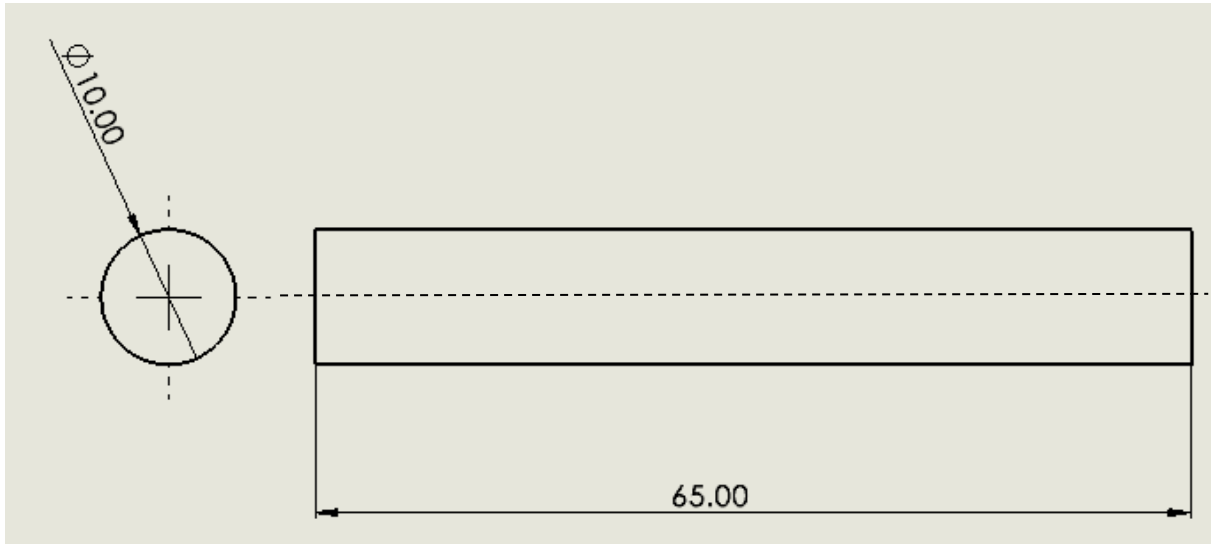


Figura 7. Dimensionamiento de muestras para soldar mediante FSW.

los parámetros de maquinabilidad para el acero AISI 1045 se indica en la Tabla 5, el acero exhibe un acabado superficial eficaz y se distingue por la prolongada duración de la herramienta de corte. Estos parámetros serán utilizados para la maquinabilidad de las probetas, facilitando en primera instancia una buena adherencia entre caras al momento de que ejerzan fricción, y luego para quitar las rebabas existentes por la soldadura antes de realizar el ensayo de tracción.

Tabla 5. Parámetros de maquinabilidad del AISI 1045.

Profundidad de corte [mm]	Acero rápido		Herramienta de carburo		
	Velocidad [m/min]	Avance [mm/rev]	Soldado velocidad [m/mm]	Insertado velocidad [m/min]	Avance [mm/rev]
Dureza, 125 a 175 HB					
1	43	0.18	140	180	0.18
4	35	0.40	110	140	0.50
8	27	0.50	85	110	0.75
16	11	0.75	67	85	1.00

Dureza, 175 a 225 HB					
1	40	0.18	130	160	0.18
4	30	0.40	100	125	0.50
8	26	0.50	78	100	0.75
16	20	0.75	60	78	1.00

Para esta investigación se ha decidido en realizar 12 ensayos, los cuales está comprendido por 24 cilindros de 10mm de diámetro y 65mm de longitud, los parámetros de maquinabilidad empleados para un corte de desbaste es una profundidad de avance de 1mm, con una rapidez de avance de 43m/min.

2.4 Equipo de torneado

La máquina utilizada es un Torno EMCO MAT-17D, del laboratorio de la universidad politécnica salesiana, En la Figura 8 se indica el torno empleado para la maquinabilidad de las probetas de esta investigación.



Figura 8. Torno EMCO MAT-17D

Es un torno paralelo de alta precisión, cuenta con un motor principal de 5.3kW, de control variable, cuya dimensión es de 1950X1060X1635mm.

2.5 Equipo de proceso de soldadura

La especificación técnica de esta máquina cuenta de un motor trifásico con potencia de 3Hp y 3490rpm, se encuentra en la Universidad Politécnica Salesiana. Esta máquina permite la variación de parámetros tales son: la velocidad rotacional, las presiones en cada etapa como el

de calentamiento y el de forja, en la Figura 9 se indica la máquina de soldadura mediante fricción.



Figura 9. Máquina de soldadura a Fricción de torque continuo.

El sistema mecánico cuenta con motor trifásico con potencia de 3Hp y 3490rpm, y unas poleas que permite regular la velocidad rotacional, contiene mandriles de sujeción los cuales se encargan en sujetar las probetas para tener una correcta soldabilidad [14].

El ensayo se realiza en la máquina que existe en los laboratorios de mecánica de la UPS, Los parámetros para soldabilidad son de un diámetro de 15mm como máximo, y velocidad tangencial en un rango de 1.27 a 1.78 m/s. La presión de soldadura en la etapa de calentamiento es entre el rango 3.17 a 6.13 kg/mm² y en la etapa de forja va desde 7.75 a 15.5 kg/mm² [14]. Cabe mencionar que la velocidad de soldadura si son barras solidas mientras la velocidad sea menor el calentamiento en el centro es insuficiente para unirse entre sí y en la presión de soldadura un exceso de presión produce una soldabilidad inestable en el centro.

Para que no exista desalineación en la unión, las superficies a soldar deben estar perpendiculares al eje de rotación. Estas pruebas se realizan variando el tiempo de la etapa de calentamiento con la presión constante, además se toma la temperatura de cada probeta antes de ser soldado.

2.6 Horno de tratamientos térmicos

El horno que se utiliza es de uso investigativo para tratamientos térmicos, mediante revenido, la marca es Nabetherm, maquina alemana, cuya temperatura va desde los 30 a 3000°C, cuenta

con un panel de control, para supervisar los parámetros que requiere el investigador, en la Figura 10 se indica dos hornos de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS).

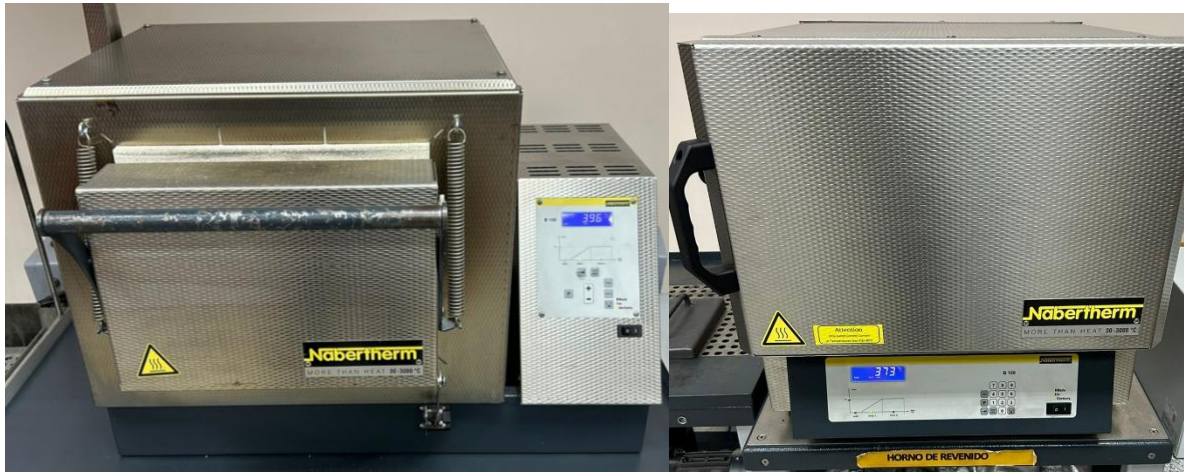


Figura 10. Horno de tratamiento térmicos Nabetherm.

Este horno se debe emplear para el TTT de los aceros, el cual se debe controlar con dos parámetros principales temperatura y tiempo.

2.7 Parámetros iniciales de soldadura a fricción

Los parámetros de soldadura mediante el proceso FSW son indistintamente, según C. Lisentuña [16] describe que con un diámetro de 10mm en acero AISI 1018 los parámetros óptimos como velocidad y presión de calentamiento son de 1800 RPM y 50kg/cm² respectivamente, en cambio C. Sanguña [14] cita que para un diámetro de 12mm para un acero AISI 1045 los parámetros han sido de 2400RPM y 100kg/cm², en velocidad y presión de calentamiento según corresponda, la Tabla 6 muestra los parámetros de soldadura del AISI 1018 y AISI 1045.

Tabla 6. Parámetros de soldadura mediante el proceso FSW.

Material	Diámetro [mm]	velocidad [rev/min]	Tiempo [s]	Presión de calentamiento [Kg/cm ²]
AISI 1018	10	1800	16	50
AISI 1045	12	2400	20	100

Los parámetros de soldadura a fricción más importantes se divide en dos partes, fase de calentamiento y de forja, por lo tanto, se ha determinado la longitud inicial de cada probeta, para luego determinar su longitud final, también se tomara nota de los tiempos en cada fase,

según la fundamentación teórica para el acero AISI 1045 se emplea una presión de 100kg/cm², una velocidad de rotación de 2400RPM, y las 2 fases dan un tiempo aproximado de 20 segundos, estos datos serán verificados, en la Figura 11 se indica las probetas con sus respectivas iniciales.



Figura 11. Denominación de cada probeta

Las longitudes iniciales de cada probeta se indica en la Tabla 7, estos valores serán necesarios para luego de la soldadura comparar su encogimiento, la nomenclatura I da como detalle de probeta izquierda y D como derecha, con fin de que no exista confusiones al momento de soldar.

Tabla 7. Longitud de probetas

Probeta N°	Longitud Inicial [mm]		Longitud Total
	I	D	
1	64.8	64.6	129.4
2	63.9	66.9	130.8
3	65.0	64.9	129.9
4	64.7	65.0	129.7

5	66.8	64.2	131.0
6	65.8	64.0	129.8
7	62.6	62.0	124.6
8	65.3	65.8	131.1
9	65.2	64.4	129.6
10	67.0	64.8	131.8
11	65.0	65.4	130.4
12	65.1	64.8	129.9

2.8 Soldadura a fricción sin calentamiento

Luego de haber seguido la ficha técnica se obtiene los siguientes resultados, como presión y tiempo de cada fase, en la Figura 12 se indica el ensayo soldada a fricción.



Figura 12. Ensayo de unión a fricción.

En la Tabla 8 se indica los parámetros principales de cada ensayo, cabe mencionar que la velocidad rotacional es de 2400RPM constante y la misma para todas.

Tabla 8. Parámetros obtenidos de la soldadura a fricción.

Probeta N°	Presión de Calentamiento kg/cm2	Tiempo de fricción [s]	Presión de Forja kg/cm2	Tiempo de forja [s]
1	30	17.15	75	9.25
2	25	17.10	65	9.10
3	30	17.25	70	9.30

4	30	17.45	70	8.90
5	25	17.40	70	9.80
6	30	17.20	75	8.80

En la Tabla 9 se indica el encogimiento axial obtenida al restar la longitud inicial menos la longitud final.

Tabla 9. Encogimiento Axial

Probeta N°	Longitud Inicio mm	Longitud Fin mm	Contracción axial mm
1	129.4	125.6	3.8
2	130.8	125.3	5.5
3	129.9	126.1	3.8
4	129.7	125.1	4.6
5	131.0	126.0	5
6	129.8	127.1	2.7

En la Figura 13 se indica la probeta 1, soldado a fricción (a) cuya rebaba es el material fundido al generarse la fricción, luego se mecaniza la pieza (b) mediante el torno para eliminar la rebaba y dejar con un diámetro de 10mm.

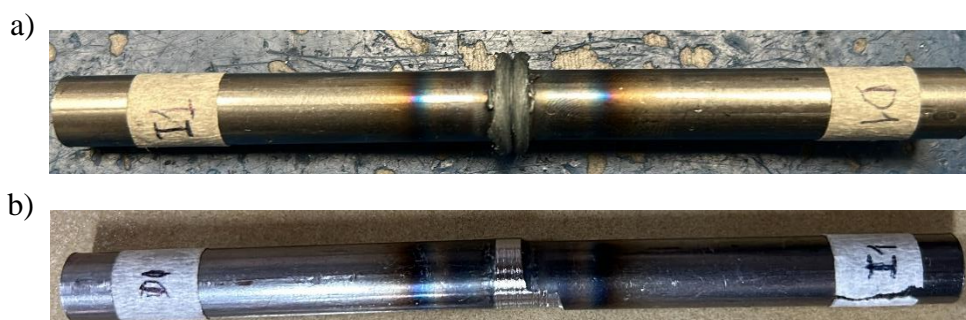


Figura 13. Soldadura a fricción, a) con rebaba, b) mecanizado

De esta manera se deja todas las probetas antes de realizar el ensayo a tracción, En a Figura 14 se observa las probetas con una capa visco plástica entre la unión de los dos materiales AISI 1045.



Figura 14. Probetas sin post calentamiento soldadas a fricción

2.8.1 Ensayo a fricción con post calentamiento

El ensayo de soldadura mediante fricción debe tener los mismo pasos y parámetros con la diferencia de que estos 6 ensayos serán sometidos a un tratamiento térmico media post calentamiento, en un horno de revenido.

En la Tabla 10 se muestra los parámetros principales de cada ensayo, cabe mencionar que la velocidad rotacional es de 2400RPM constante y la misma para todas.

Tabla 10. Parámetros obtenidos de la soldadura a fricción antes del post calentamiento.

Probeta N°	Presión de Calentamiento kg/cm2	Tiempo de fricción [s]	Presión de Forja kg/cm2	Tiempo de forja [s]
7	30	17.23	70	9.15
8	30	17.24	65	9.10
9	30	17.71	70	9.20
10	30	17.60	70	8.90
11	30	16.79	70	9.90
12	30	17.30	70	8.90

En la Tabla 11 se indica el encogimiento axial obtenida al restar la longitud inicial menos la longitud final.

Tabla 11. Encogimiento Axial antes del post calentamiento.

Probeta N°	Longitud Inicial mm	Longitud Final mm	Encogimiento axial mm
7	124.6	120.1	4.5
8	131.1	126.8	4.3
9	129.6	124.3	5.3
10	131.8	126.6	5.2
11	130.4	126.9	3.5
12	129.9	125.5	4.4

Los cambios ocurridos en cada una de las probetas son estructurales, donde la dimensión de grano se puede haber reducido a medida a que se acerca la unión. La temperatura de plastificación es de 1392°C siendo este la misma temperatura de fricción, el cual está por encima de la fase de austenización [29] y según Oney Borges en su investigación "Comportamiento microestructural de una unión disímil realizada por el proceso de soldadura de rotación continua" menciona que la soldadura del AISI 1045 con el AISI 316 L, la temperatura de forja ha sido de 743-731°C, por lo tanto, se puede distinguir su cambio de temperatura a medida que transcurre el tiempo [30].

El diagrama que relaciona el tiempo, temperatura y transformación (TTT) es necesario para la transformación del acero cuando se enfría isotérmicamente. Para continuar con el proceso de post calentamiento, nos fijamos en el diagrama TTT del acero AISI 1045 como se indica en la Figura 15. La fase para fortalecer el acero AISI 1045 en propiedades como resistencia y tenacidad es Bainita [31].

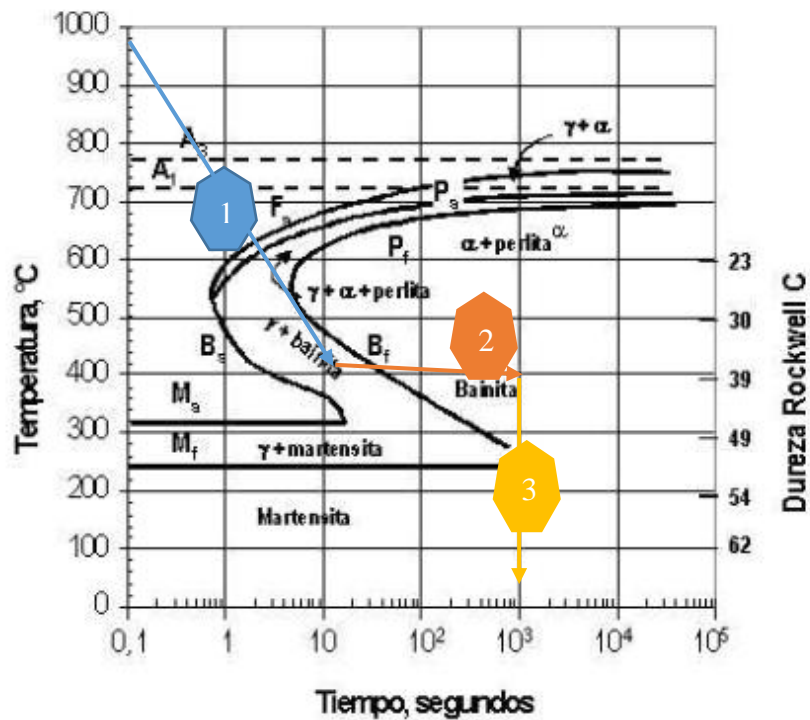


Figura 15. Diagrama TTT del acero AISI 1045 [31]

Se menciona que la temperatura de fricción esta alrededor de los 1392°C superior a la temperatura de austenización donde tiene un 100% de A3, por lo tanto, en el diagrama TTT del acero AISI 1045 en la primera etapa se tiene un tiempo de 10 a 15 segundos donde ocurre el enfriamiento a temperatura ambiente hasta llegar a los 400°C llegando al 50% austenita y 50% bainita en la segunda etapa se le introduce al horno precalentado a una temperatura constante de 400°C a 20min, siendo este en un 100% bainita, para finalizar, en la tercera etapa se retira y se le deja enfriar a temperatura ambiente. En la figura 16 se indica las probetas con post calentamiento.



Figura 16. Probetas sin post calentamiento soldadas a fricción

Las probetas al ser sometido a un tratamiento térmico de 400°C , tornaron a cambiar el color en un gris oscuro, estas probetas luego son mecanizadas quitando la capa visco plástica.

2.9 Ensayos de caracterización mecánica

Se usa una variedad de ensayos mecánicos para determinar las características del material como: ensayo de tracción, compresión, impacto y flexión, sin embargo, para esta propuesta tecnológica se ha determinado en realizar el estudio mediante el ensayo a tracción.

2.9.1 Normativa ASTM E8

Es el método de ensayo a tensión para materiales metálicos con temperatura ambiental (entre 10 hasta 38°C) donde se determina el límite elástico. ASTM E8 / E8M, el procedimiento estándar principal para evaluar las características de tracción de materiales metálicos, ha sido una referencia desde su introducción en 1924 con el nombre inicial de ASTM E8-24T. Esta norma, actualmente en uso para ensayos de metales, ha experimentado ajustes periódicos y pequeñas modificaciones, como es común en la evolución de los estándares. Sin embargo, en el 2011, ASTM E8/E8M se divide en 2 estándares: E8M para la unidad métrica, y E8 para la unidad internacional [27].

Los ensayos redondos necesitan la longitud de experimento para E8 que debe ser 4 veces el diámetro (4D), y E8M debe ser 5 veces el diámetro (5D). En la propuesta tecnológica se emplea El ensayo ASTM E8, en la Figura 17 se puede observar las dimensiones solicitadas para los respectivos ensayos.

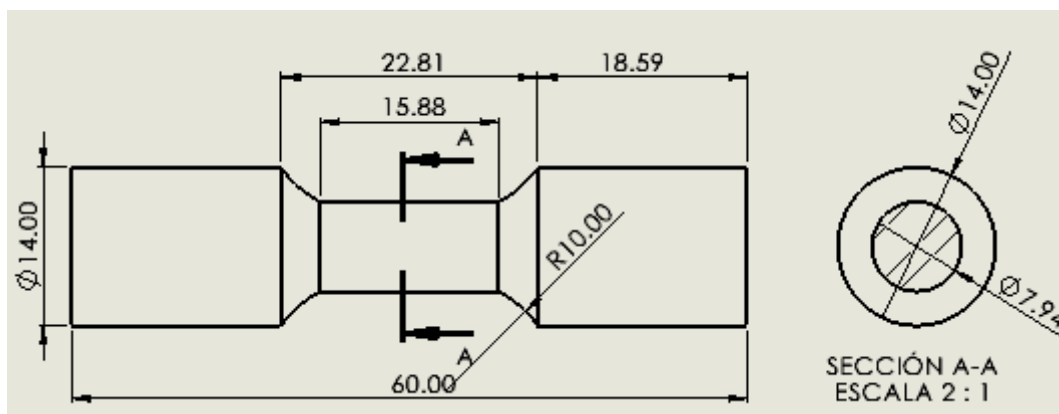


Figura 17. Dimensionamiento de probetas cilíndricas para ensayo a tensión o tracción bajo la normativa ASTM E8.

El diámetro de las probetas está ajustado de tal manera que al mecanizar las que fueron soldadas tenga las dimensiones necesarias y pueda ser evaluada bajo la normativa ASTM E8.

2.10 Equipo de ensayo de tracción

Los ensayos a tracción son evaluados en la maquina universal TESTRESIST de la Universidad

Politécnica Salesiana campus sur, como se indica en la Figura 18. El propósito de este ensayo, conocido como ensayo de tracción o tensión, es verificar la resistencia elástica, última y plástica de un material sometiéndolo a esfuerzos uniaxiales hasta que se produce la rotura. Las muestras a examinar se ajustan a las especificaciones de ASTM E8 y pueden tener figura cilíndrica o plana, tal como se indica en la Figura 18. Armas et al.[28] explican que el ensayo de tracción implica la aplicación progresiva de fuerzas de tracción a lo largo del eje del material hasta que este se rompe, evaluando tanto la rotura como la deformación. En el caso del ensayo de tensión, la deformación unitaria se expresa mediante la variación en la longitud, ya que se registra la longitud inicial y final de la muestra.



Figura 18. Maquina universal TESTRESIST.

2.10.1 Ensayo a Tracción o tensión

La ejecución de la carga se lleva a cabo después de un período y a una velocidad constante, lo que conduce a la ruptura y permite determinar la carga máxima de fractura. Con las dimensiones de las muestras, es posible calcular la sección del área transversal y, por ende, establecer el esfuerzo máximo.

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

σ_{\max} : Esfuerzo máximo a tracción; [MPa]

F: Carga de tensión o máxima; [N]

A: Área o sección transversal; [mm²]

Deformación

Se mide antes y después que ocurre su fractura

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i} \quad (2)$$

Donde:

ε : Elongación

l_i : Longitud principal o inicial; [mm]

l_f : Longitud ultima o final; [mm]

Módulo de Young

La relación de Hooke que se establece con la norma ASTM D638 se obtiene el módulo de elasticidad.

$$E = \frac{\sigma_{elastico}}{\varepsilon_{elastico}} \quad (3)$$

Donde:

E: Modulo elástico o de Young; [MPa]

$\sigma_{elastico}$: Esfuerzo elástico

$\varepsilon_{elastico}$: Elongación elástica

2.11 Probetas de ensayo a tensión

El ensayo a tensión se lo realiza en base a las probetas con post calentamiento, sin post calentamiento y del material en suministro. Para los diagramas de esfuerzo vs deformación, se debe tener en cuenta la separación de agarre existente como dato de longitud inicial. En la Figura 19 se indica las probetas sin post calentamiento mecanizadas sin la capa visco plástica, para que el ensayo se pueda efectuar de la mejor manera.



Figura 19. Probetas sin post calentamiento soldado a fricción

En la Figura 20 se indica la cara de rotura de las probetas sin post calentamiento, dependiendo el tipo de fractura en función de la deformación plástica, donde 1) PROBETA 1, 2) PROBETA 2, 3) PROBETA 3, 4) PROBETA 4, 5) PROBETA 5 y 6) PROBETA 6. Las probetas 1, 3, y 6 su fractura se dio a 1/4 de la longitud total, presentan una propagación rápida de grietas, mientras que las probetas 2, 4 y 5 su ruptura fue en la mitad, se observa una pequeña deformación, por lo tanto, es un material de tendencia a fractura dúctil.



Figura 20. Caras de rotura de probetas sin post calentamiento.

En la Figura 21 se indica las probetas mecanizadas ya sin capa visco plástica de las probetas con post calentamiento, se nota que el color ha cambiado debido a que se realizó el tratamiento térmico a 400°C y su color a tornado a oscurecerse.



Figura 21., Probetas con post calentamiento soldado a fricción

En la Figura 22 se indica la cara de rotura después de haber alcanzado el esfuerzo de fractura de las probetas con post calentamiento, donde 7) PROBETA 7, 8) PROBETA 8, 9) PROBETA 9, 10) PROBETA 10, 11) PROBETA 11 y 12) PROBETA 12, Todas las probetas se fracturaron en la mitad, donde ocurrió la soldadura fricción, esto se debe a que el tratamiento térmico en toda la pieza se dio desde la mitad con la temperatura de austenización, cumpliendo el tratamiento focalizado en esa zona de soldadura. Además, se observa una propagación de grietas y una leve deformación, por lo tanto, su tendencia también fue una fractura dúctil.

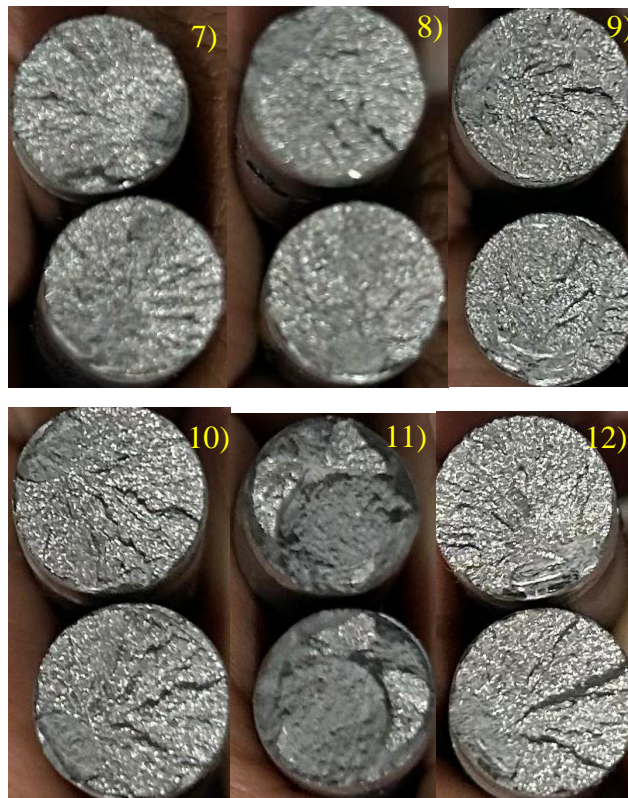


Figura 22. Caras de rotura de probetas con post calentamiento.

En la Figura 23 se indica las probetas mecanizadas del material en suministro del acero AISI 1045.



Figura 23. Probetas de suministro del AISI 1045.

En la Figura 24 se indica la cara de rotura de las probetas en suministro después de haber alcanzado el esfuerzo de fractura, donde 13) PROB SUM1, 14) PROB SUM2, 15) PROB SUM3 y 16) PROB SUM4.



Figura 24. Caras de rotura de probetas de suministro.

Analizando el comportamiento del material se observa una deformación significativa antes de llegar a la rotura; en las probetas PROB SUM1 Y PROB SUM3 se observa un adelgazamiento progresivo antes de la ruptura final, y las probetas PROB SUM2 y PROB SUM4 presentan un estiramiento en la cara de rotura, por lo tanto, es una fractura tipo dúctil ya que además presentan un cuello donde la sección transversal se estrecha.

CAPÍTULO III

3 RESULTADOS

Este capítulo detalla los resultados adquiridos; los parámetros de la soldadura a fricción del acero AISI 1045 tales son: la presión de forja y calentamiento, encogimiento axial; luego se detalla las propiedades del material sin post calentamiento y con post calentamiento como el esfuerzo máximo (σ_{max}), esfuerzo de fluencia (σ_u), carga máxima (P_{max}), porcentaje de deformación (ϵ), y módulo de Young (E), finalmente se discute los resultados obtenidos.

3.1 Parámetros de soldadura mediante fricción rotativa

Con la ayuda de un manómetro y con el uso del cronometro se obtienen las presiones y tiempos de cada etapa como el de calentamiento y de forja. La Tabla 12 indica los datos adquiridos en cada una de las etapas.

Tabla 12. Parámetros de soldadura a fricción

Probeta N°	Presión de Fricción kg/cm2	Presión de Forja kg/cm2	Tiempo de fricción [s]	Tiempo de forja [s]	Tiempo total de soldadura [s]
1	30.00	75.00	17.15	9.25	26.40
2	25.00	65.00	17.10	9.10	26.20
3	30.00	70.00	17.25	9.30	26.55
4	30.00	70.00	17.45	8.90	26.35
5	25.00	70.00	17.40	9.80	27.20
6	30.00	75.00	17.20	8.80	26.00
Promedio	28.33	70.83	17.26	9.19	26.45

Mediante el método estadístico de desviación estándar se obtiene la dispersión de datos para separar los valores atípicos que están lejos del promedio, por lo tanto, los parámetros usados son los siguientes: presión de fricción 30kg/cm^2 , tiempo de fricción 17.26s, presión de forja 70kg/cm^2 , tiempo de forja 9.19s, tiempo total de soldadura es de 26.45s. En la Figura 25 se indica el diagrama de presión vs tiempo de cada una de las probetas, este diagrama consta de dos etapas de fricción y forja cada una de ellas tiene dos fases, en la 1era etapa se puede observar la fase de rozamiento y de calentamiento, y en la 2da etapa tenemos las fases de frenado y de unión.

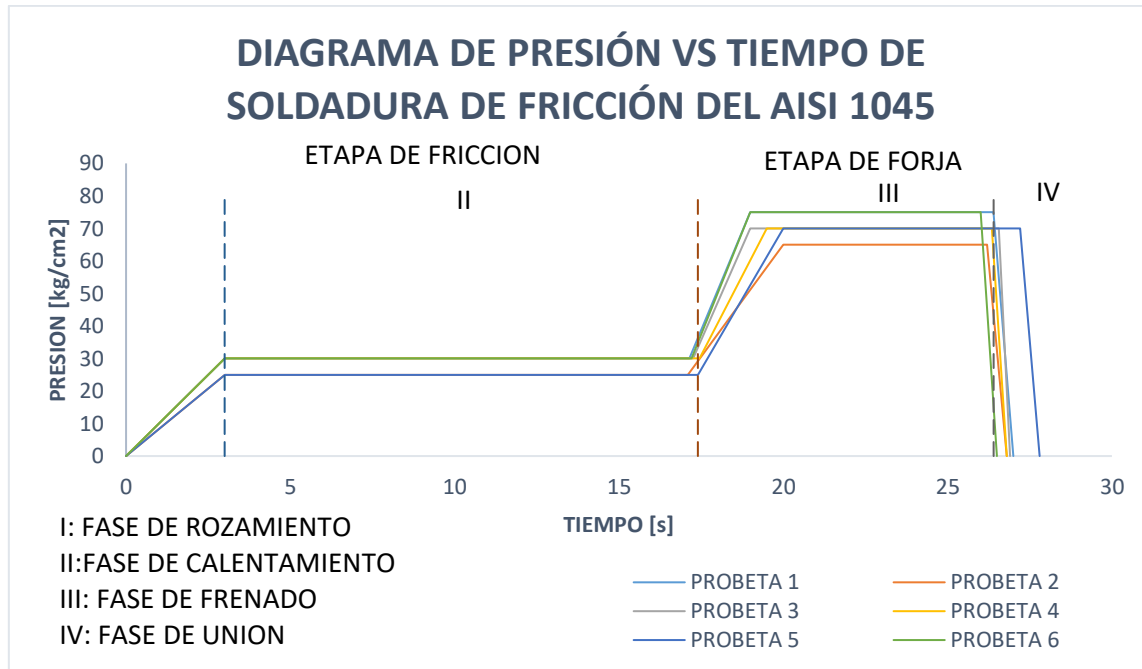


Figura 25. Diagrama de presión vs tiempo mediante soldadura a fricción.

En la etapa de fricción contamos con la fase de rozamiento en un tiempo de 3s donde la presión va aumentando hasta llegar a la fase de calentamiento donde la presión es de 30kg/cm^2 y se mantiene constante por 17.26s, luego se pasa a la fase de frenado el cual se apaga en seco la maquina y finalmente pasamos a la fase de unión donde inmediatamente se ejerce presión por 2s hasta llegar a una presión 70kg/cm^2 y mantener constante por 7.19s.

3.2 Encogimiento axial

La pérdida de longitud nominado como encogimiento o contracción axial se obtiene de la diferencia entre las longitudes iniciales y finales del AISI 1045, la Tabla 13 se indica las longitudes finales de encogimiento axial.

Tabla 13. Encogimiento axial

Probeta N°	Longitud Inicial mm	Longitud Final mm	Contracción axial mm
1	130.8	125.3	5.5
2	129.8	127.1	2.7
3	129.9	126.1	3.8
4	129.7	125.1	4.6
5	129.4	125.6	3.8
6	131.0	126.0	5

Luego de medir sus longitudes se procedió a calcular el encogimiento axial, para cada parámetro prefijada, obteniendo un valor mayor para la probeta 1 seguido del 5 con un valor de 5.5mm y 5mm respectivamente cuya presión y tiempo es de $75kg/cm^2$ y, mientras que la probeta 2 tiene un encogimiento de 2.7mm con una presión de $65kg/cm^2$. Finalmente, para las probetas 2,3,4 se tiene un encogimiento de 3.8, 4.6 y 3.8mm con una presión de $70kg/cm^2$. Se presume que el valor difiere debido a la variación de la presión ejercida por el operador en la etapa de forjado. Los materiales que indican mayor acortamiento se logra una mejor adherencia entre materiales debido a que se logra mayor área de material plastificado.

3.3 Ensayo a tracción sin post calentamiento

Los ensayos a tracción son obtenidos con el objetivo de conocer las principales características mecánicas de las probetas, en la Tabla 14 se indica las propiedades mediante soldadura sin post calentamiento, se analiza el esfuerzo máximo (σ_{max}), esfuerzo de fluencia (σ_y), la carga máxima (P_{max}), porcentaje de elongación (ϵ) y módulo de Young (E) el cual fue calculado sacando la pendiente de la zona elástica.

Tabla 14. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción sin post calentamiento

Muestra	A [m ²]	P _{max} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_y [MPa]	E [MPa]	% ϵ [m/m]
PROBETA 1	7.85E-05	69486.426	884.729	672.291	9554.350	24.70
PROBETA 2	7.85E-05	65390.038	832.571	596.388	9618.797	19.20
PROBETA 3	7.85E-05	66633.397	848.403	622.828	10052.828	24.60
PROBETA 4	7.85E-05	68297.236	869.587	599.869	8764.190	15.60
PROBETA 5	7.85E-05	69811.455	888.867	618.788	10107.968	15.30
PROBETA 6	7.85E-05	69783.078	888.506	631.236	9594.362	23.90
Promedio		68233.605	868.777	623.567	9615.416	20.60
Desviación estándar		1849.899	23.554	27.410	482.225	4.44

La Figura 26 indica el diagrama esfuerzo vs deformación del acero AISI 1045 mediante soldadura a fricción rotativa sin post calentamiento, para las probetas 1 y 6 que fueron soldadas a una presión de forja de $75kg/cm^2$ se puede observar que la deformación está por encima del promedio llegando a 24.73 y 23.88% respectivamente, cuyo esfuerzo máximo es de 884.73 y 888.51MPa de cada una, sobrepasando el promedio. La probeta 2 con una presión de forja de $65kg/cm^2$ la deformación y el esfuerzo máximo están por debajo del valor promedio con

valores de 19.20% y 832.57MPa respectivamente. La probeta 3 con una presión de forja de $70\text{kg}/\text{cm}^2$ la deformación está por encima del promedio con un valor de 24.63% y el esfuerzo máximo se encuentra por debajo del promedio con 848.40MPa, finalmente las probetas 4 y 5 con presión de calentamiento de $70\text{kg}/\text{cm}^2$ llegan a una deformación por debajo del promedio con valores de 15.61 y 15.30% sin embargo el esfuerzo máximo a mejorado sobrepasado el promedio con un valor de 869.59 y 888.87MPa, la discrepancia de valores se debe a los tiempos de fricción y forja. Además, se toma en consideración que la pendiente de la zona elástica o módulo de Young de la probeta 4 está por debajo de la dispersión, donde el valor sobrepasa al rango mínimo, cuyo valor se calcula entre la diferencia del promedio y la desviación estándar siendo este 9133.191MPa.

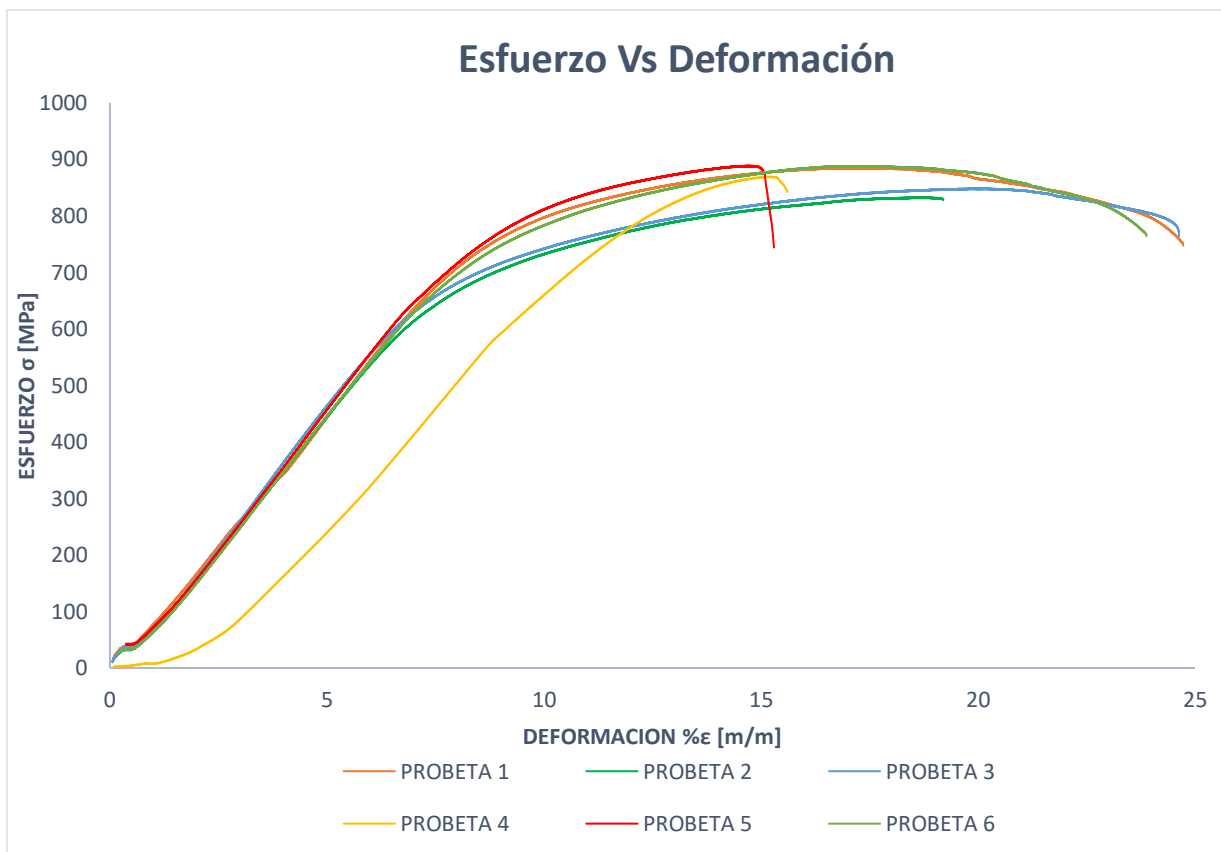


Figura 26. Diagrama Esfuerzo deformación del acero AISI 1045 con soldadura a fricción sin post calentamiento

En el diagrama esfuerzo deformación de las probetas sin post calentamiento se observa las probetas 4 y 5 que han llegado a la zona de endurecimiento por deformación, habiendo una ruptura repentina, la misma que se da por un fallo en la soldadura, se puede observar la Figura 27 que en estas probetas existen un punto de inicio de falla, por ello su alargamiento es menor.



Figura 27. Análisis de falla probetas 4 y 5 sin post calentamiento

A continuación en la Figura 28 se indica la relación del esfuerzo de fluencia o limite elástico y el porcentaje de elongación o deformación o de elongación de las probetas soldadas sin post calentamiento, en el orden y parámetros de soldadura indicados anteriormente, mientras menor es el esfuerzo de fluencia quiere decir que se minimiza la resistencia elástica del material, las probetas 1 y 6 tienen un esfuerzo de fluencia de 672.29 y 631.24MPa por encima del promedio, la probeta 2 tiene un valor de 596.39MPa por debajo del promedio del esfuerzo de fluencia, la probeta 3 y 5 tienen un esfuerzo de fluencia de 622.83 y 618.79MPa, mientras que la probeta 4 tiene un valor de 599.87MPa.

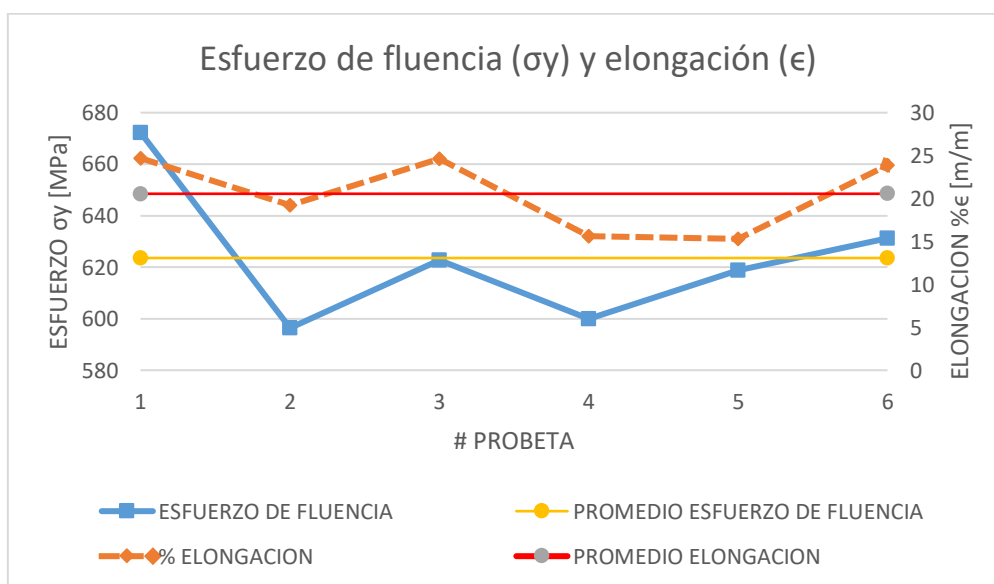


Figura 28. Esfuerzo de fluencia y elongación del AISI 1045 sin post calentamiento.

El promedio de las probetas sin post calentamiento como el esfuerzo máximo es de 868.78MPa y el porcentaje de elongación de 20.60 m/m, cuya desviación estándar tanto en esfuerzo y elongación son de 23.55MPa y 4.44m/m. Estas probetas presentan una propagación rápida de

grietas y una pequeña deformación, por lo tanto, es un material de tendencia a fractura dúctil.

3.4 Ensayo a tracción con post calentamiento

A partir de la experiencia obtenida en los ensayos de soldadura mediante fricción rotativa se determinó los parámetros los cuales fueron usados para el ensayo de soldadura con post calentamiento, con una velocidad rotativa de 2400rpm, una presión de fricción de 30kg/cm^2 a lo largo de 17.26s, y finalmente una presión de forja de 70kg/cm^2 con un tiempo de 9.19s, estos datos fueron los que se usaron para soldar todas las probetas, luego se realiza el post calentamiento al finalizar la soldadura se obtenido una temperatura de plastificación de 1392°C superior a la temperatura de austenización, por lo tanto, en el diagrama TTT del acero AISI 1045 en la primera etapa se tiene un tiempo de 10 a 15 segundos donde ocurre el enfriamiento a temperatura ambiente hasta llegar a los 400°C , en la segunda etapa se le introduce al horno precalentado a una temperatura constante de 400°C a 20min, para finalizar, en la tercera etapa se retira y se le deja enfriar a temperatura ambiente. En la Tabla 15 se indica las principales características mecánicas del AISI 1045 mediante soldadura a fricción con post calentamiento.

Tabla 15. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción con post calentamiento

Muestra	A [m^2]	P_{max} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_y [MPa]	E[MPa]	% ϵ [m/m]
PROBETA 7	7.85E-05	67412.435	858.322	624.043	13917.753	9.80
PROBETA 8	7.85E-05	66042.672	840.881	605.157	14605.556	8.70
PROBETA 9	7.85E-05	66612.760	848.139	589.885	13818.068	10.20
PROBETA 10	7.85E-05	68934.398	877.700	567.091	14175.948	12.20
PROBETA 11	7.85E-05	66813.970	850.702	617.014	14989.007	9.80
PROBETA 12	7.85E-05	69759.865	888.210	645.819	14924.755	9.50
Promedio		67596.017	860.659	608.168	14405.181	10.03
Desviación estándar		1449.033	18.450	27.490	507.109	1.17

La Figura 29 indica la gráfica de esfuerzo vs deformación del AISI 1045 mediante soldadura a fricción con post calentamiento, la probeta 10 y 12 se encuentran por encima del promedio del esfuerzo máximo con valores de 877.7 y 888.21MPa respectivamente y las probetas 7, 8, 9 y 11 se encuentran por debajo del promedio cuyos valores son 858.32, 840.88, 848.14 y 850.70MPa respectivamente.

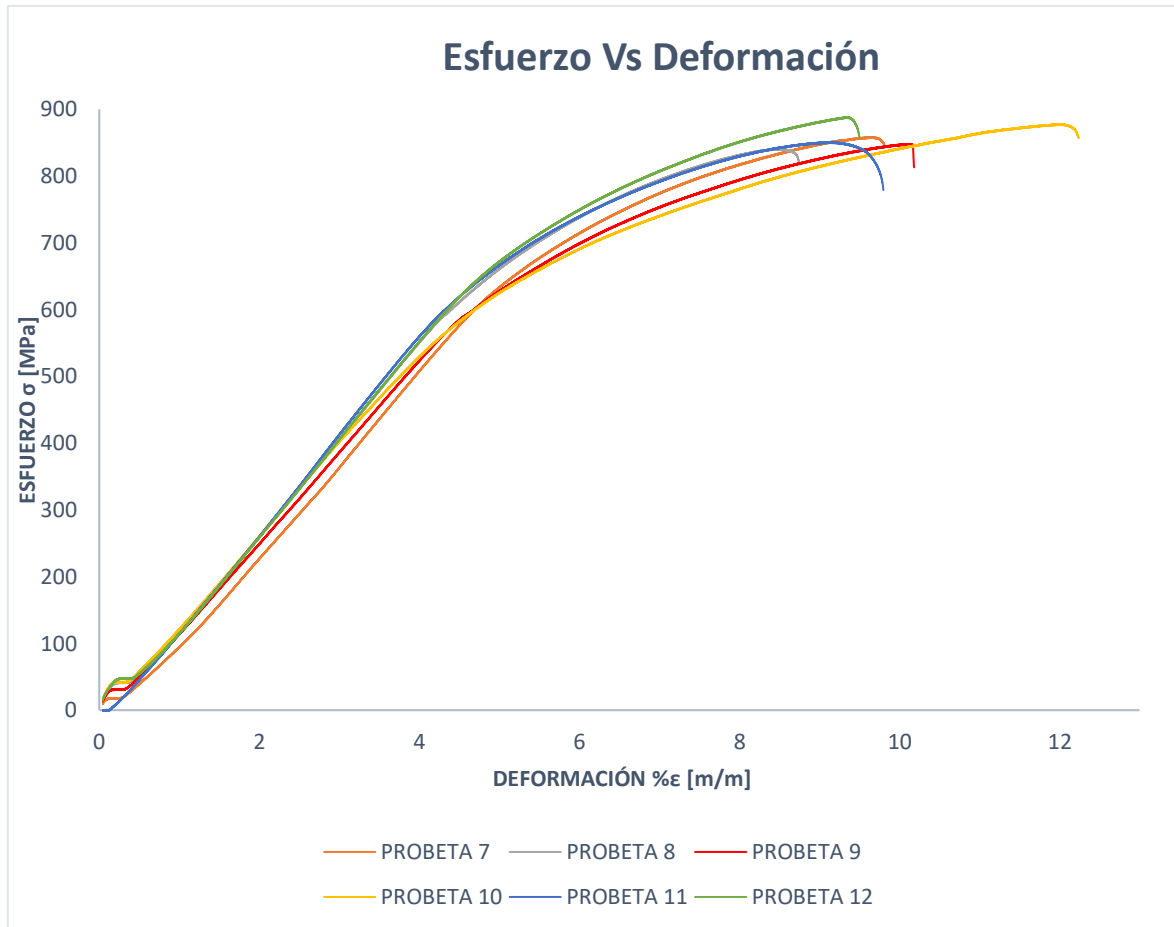


Figura 29. Diagrama Esfuerzo deformación del acero AISI 1045 con soldadura a fricción con post calentamiento

Se realiza una comparación del esfuerzo de fluencia y el % de elongación del acero AISI 1045 mediante soldadura a fricción con post calentamiento, como se indica en la Figura 30, el esfuerzo de fluencia de las probetas 7, 11 y 12 se encuentran por encima del promedio con valores de 624.04, 617.01 y 645.82MPa respectivamente, mientras que por debajo del promedio se encuentran las probetas 8, 9 y 10 cuyos valores son 605.16, 589.89 y 567.09MPa respectivamente. El porcentaje de elongación o de deformación de las probetas 9 y 10 se encuentran arriba del promedio con valores de 10.18 y 12.24% respectivamente, mientras que las probetas 7, 8, 11, 12, se encuentran por debajo del promedio, cuyos valores son de 9.80, 8.74, 9.80 y 9.50% respectivamente.

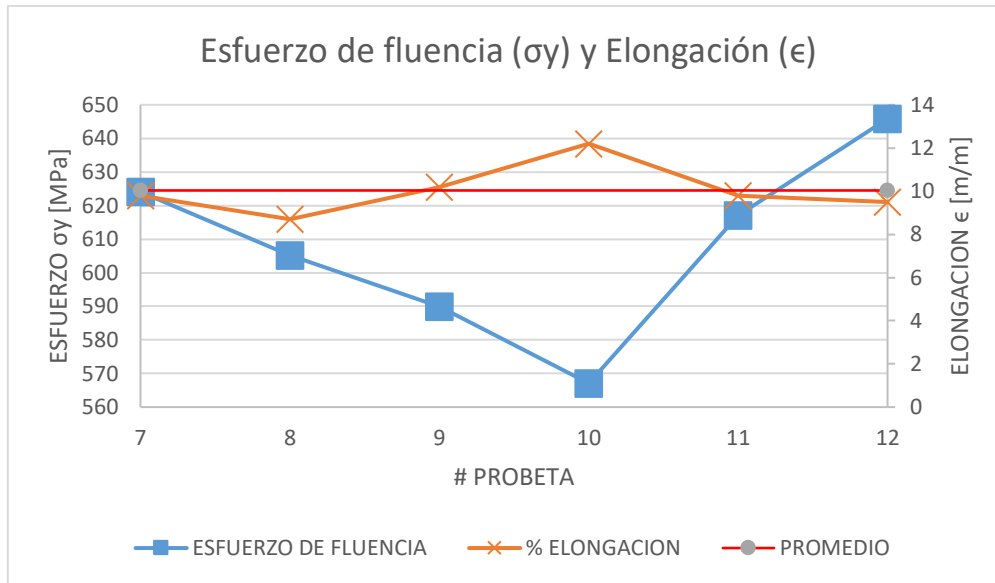


Figura 30. Esfuerzo ultimo de ruptura y % de elongación del AISI 1045 con post calentamiento.

El promedio de las probetas con post calentamiento como el esfuerzo máximo es de 860.66MPa y el porcentaje de elongación de 10.03 m/m, cuya desviación estándar tanto en esfuerzo y elongación son de 18.45MPa y 1.17m/m.

Además, se observa que la probeta 10 tiene mayor elongación ya que su plano de falla fue distinto a las demás ya que ha obtenido una fractura dúctil de mayor alcanza con respecto a las demás probetas con post calentamiento por lo que su deformación ha sido mayor.

3.5 Ensayo a tracción sin soldadura del AISI 1045

El ensayo en estado de suministro es necesario para la contrastar los resultados obtenidos después de la soldadura, en la Tabla 16 se indica las principales propiedades mecánicas del AISI 1045 en estado de suministro.

Tabla 16. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción del AISI 1045 en suministro.

Muestra	A [m ²]	P _{max} [N]	σ _{max} [MPa]	σ _y [MPa]	E[MPa]	% ε [m/m]
PROB SUM1	7.85E-05	74338.636	946.509	806.493	10469.244	18.60
PROB SUM2	7.85E-05	75747.090	964.442	807.150	10306.629	19.40
PROB SUM3	7.85E-05	76686.059	976.397	803.833	10678.515	19.10
PROB SUM4	7.85E-05	77062.685	981.192	814.376	10520.811	18.70
Promedio		75958.618	967.135	807.963	10493.800	18.95
Desviación estándar		1213.428	15.450	4.509	153.281	0.37

La Figura 31 se aprecia la gráfica de esfuerzo vs deformación del acero AISI 1045 en estado de

suministro, a continuación, se detalla los valores de esfuerzos máximos de cada probeta de suministro, para las probetas que se encuentran por encima del promedio son la 3 y 4 con valores de 976.40 y 981.19MPa respectivamente, mientras que las probetas 1 y 2 están por debajo del promedio, cuyos valores consecutivos son 946.51 y 964.44MPa.

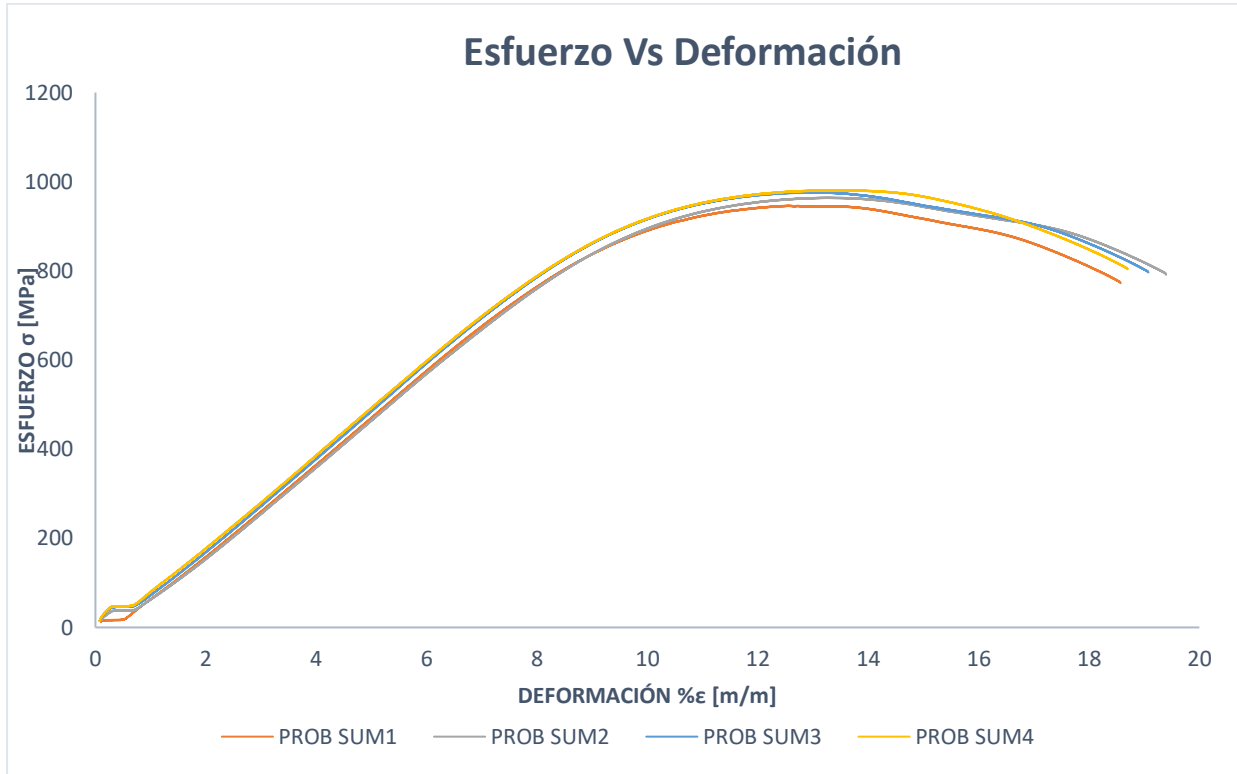


Figura 31. Diagrama esfuerzo deformación del acero AISI 1045 en estado de suministro.

La Figura 32 indica los valores de esfuerzo de fluencia y porcentaje de deformación del AISI 1045 en estado de suministro, el esfuerzo de fluencia de la probeta 4 se encuentran por encima del promedio con un valor de 814.38MPa respectivamente, mientras que por debajo del promedio se encuentran la probeta 1, 2 y 3 cuyos valores son 806.49, 807.150 y 803.83MPa. El porcentaje de deformación de las probetas 2 y 3 se encuentran arriba del promedio con valores de 19.40 y 19.08% respectivamente, mientras que las probetas 1 y 4, se encuentran por debajo del promedio, cuyos valores son de 18.57 y 18.70% respectivamente.

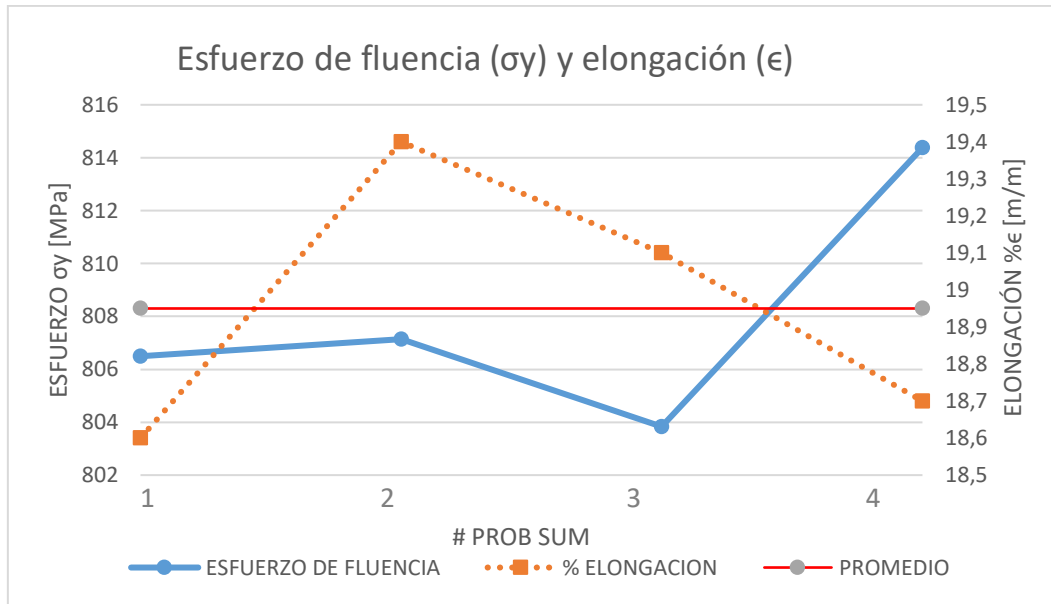


Figura 32. Esfuerzo ultimo de ruptura y % de elongación del AISI 1045 en suministro

El promedio de las probetas con post calentamiento como el esfuerzo máximo es de 967.14MPa y el porcentaje de elongación de 18.95m/m, cuya desviación estándar tanto en esfuerzo y elongación son de 15.45MPa y 0.37m/m. Todas las propiedades mecánicas en estado de suministro se encuentran muy cerca del promedio, dando fiabilidad a todos los ensayos obtenidos.

3.6 Discusión de propiedades mecánicas en estado de suministro y soldadura a fricción con y sin post calentamiento

Luego de haber detallado todas las características mecánicas de cada una, se realiza una comparación entre las principales propiedades mecánicas de los ensayos. En Tabla 17 se indica los promedios de las propiedades mecánicas, donde PSP representa al ensayo a tracción mediante soldadura a fricción sin post calentamiento, PCP representa al ensayo mediante soldadura con post calentamiento y la PSU representa el AISI 1045 en estado de suministro.

Tabla 17. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción del AISI 1045 en suministro y mediante soldadura a fricción con y sin post calentamiento.

Muestra	A [m ²]	P _{max} [N]	σ _{max} [MPa]	σ _y [MPa]	E[MPa]	% ε [m/m]
PSP	7.85E-05	68233.777	868.777	623.567	9615.41	20.60
PCP	7.85E-05	67596.017	860.659	608.168	14405.181	10.00
PSU	7.85E-05	75958.618	967.135	807.963	10493.800	19.00
Desviación estándar						0.064

En la Figura 33 se indica el diagrama esfuerzo vs demarcación de las probetas con y sin post

calentamiento y de suministro, en 1era instancia se hace una comparación de la pendiente que no es más que el módulo de Young de las probetas, con post calentamiento es 14405.18MPa siendo este mayor incluso al de suministro, de la misma manera le sigue el de suministro con un valor de 10493.80MPa y el de sin post calentamiento con un valor menor de 9615.41MPa. Además, se hace el análisis de esfuerzos de fluencia, máximo y el porcentaje de elongación.

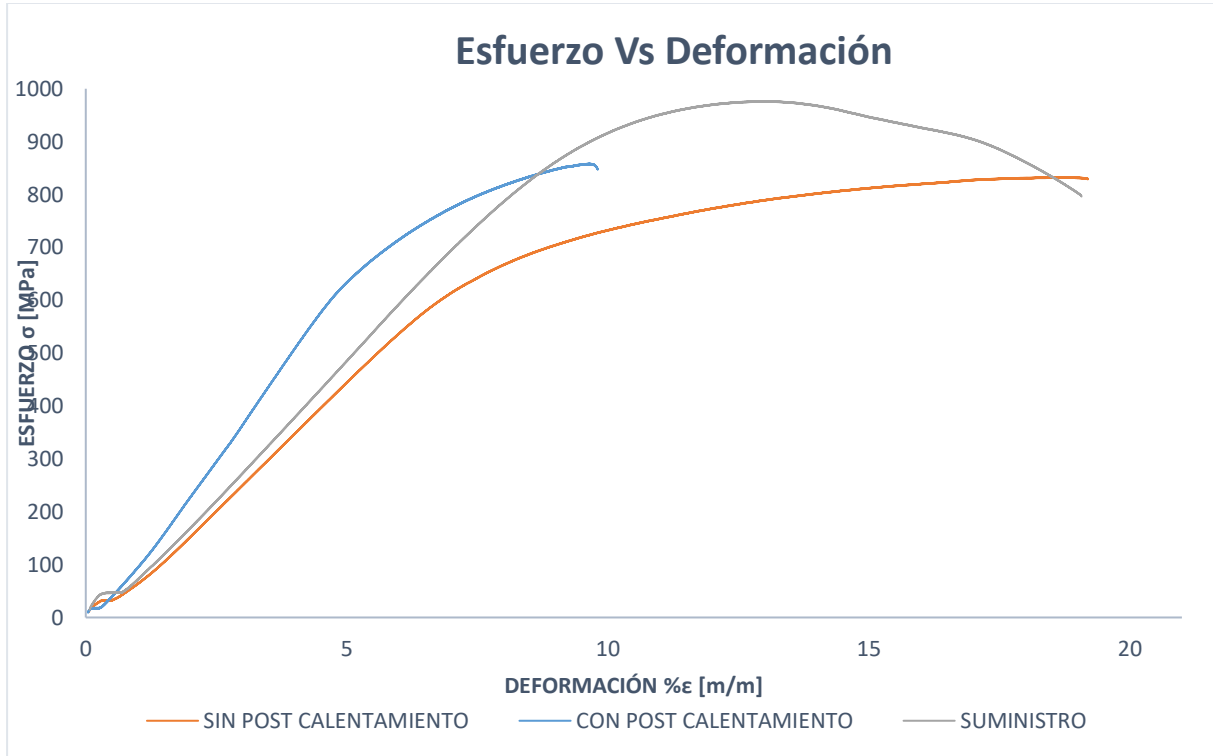


Figura 33. Diagrama esfuerzo vs deformación de las probetas sin post calentamiento, con post calentamiento y suministro

En la Figura 34 se indica el esfuerzo máximo o de tensión del AISI 1045 en estado de suministro y soldado mediante fricción rotativa sin post calentamiento y con post calentamiento, cuyos valores son de 807.96, 623.57 y 608.17MPa respectivamente.

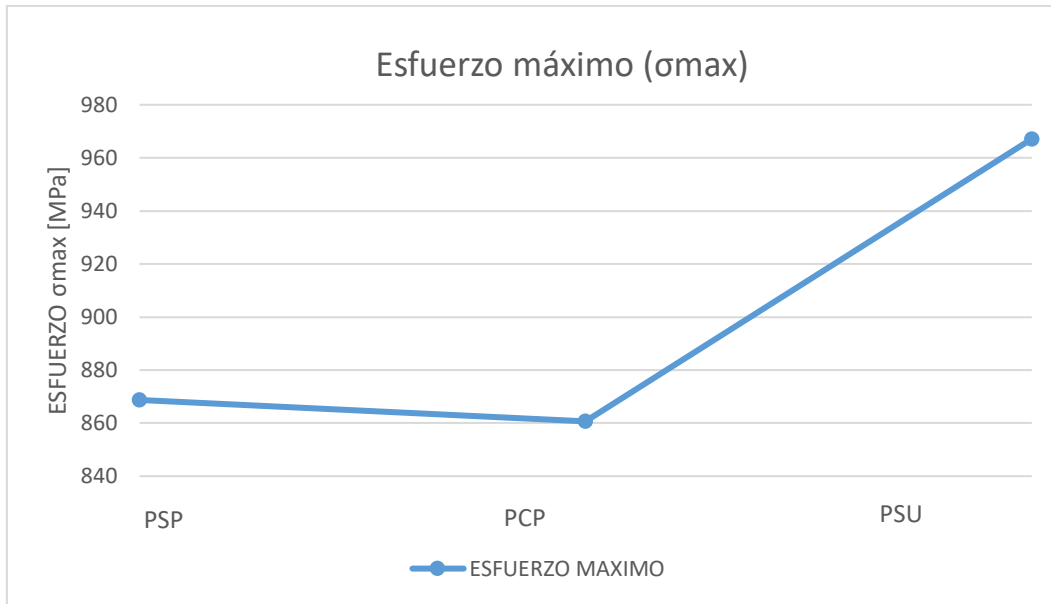


Figura 34. Diagrama esfuerzo máximo y módulo de Young del AISI 1045 en estado de suministro y mediante soldadura a fricción con y sin post calentamiento.

La Figura 35 se indica el diagrama elongación y esfuerzo de fluencia, haciendo una comparación el esfuerzo de fluencia no varía mucho entre: sin y con post calentamiento cuyos valores son 623.57 y 608.17MPa y el resultado de suministro está muy por encima de los soldados a fricción con un valor de 807.96MPa. En cuanto al porcentaje de elongación del material sin post calentamiento está por encima de los demás con un valor de 20.60m/m.

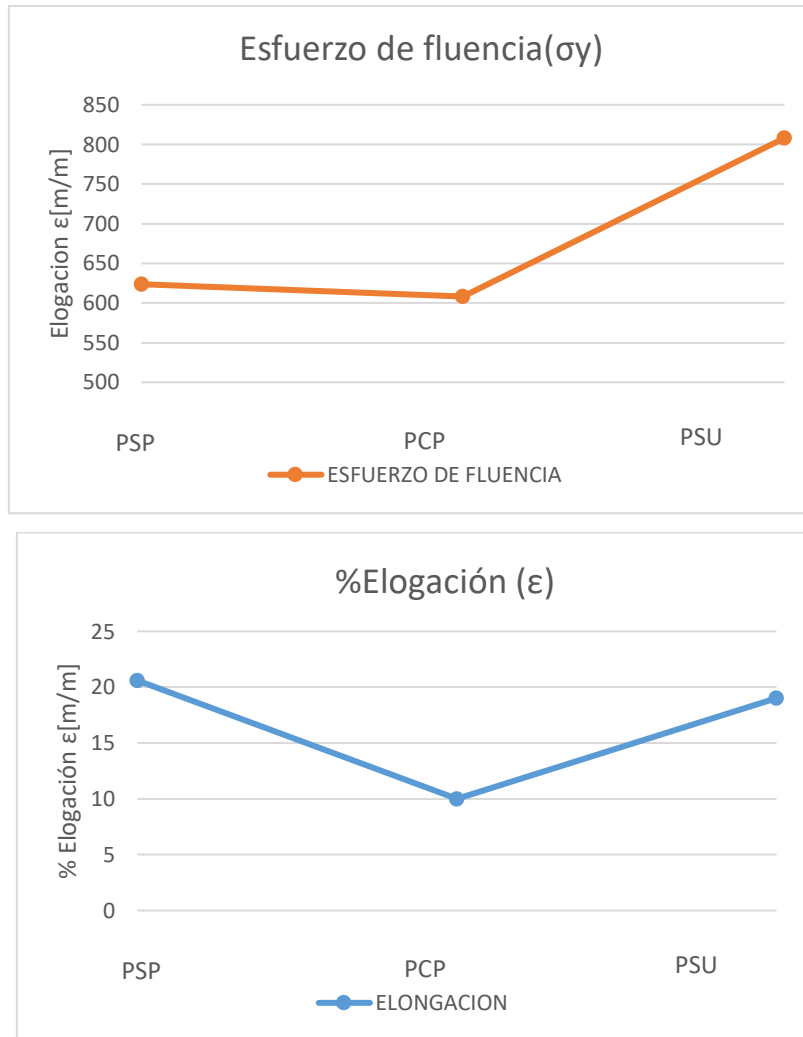


Figura 35. Diagrama y esfuerzo de fluencia y % de elongación del acero AISI 1045 en estado de suministro y mediante soldadura a fricción con y sin post calentamiento.

Se puede observar que el acero tiene una conducta elástico y plástico, en la zona elástica para la probeta con post calentamiento respecto al de suministro se aprecia un aumento del módulo de Young en 37.27%, pero la deformación plástica se ha reducido en 46.15%, sin embargo, para la probeta sin post calentamiento con respecto al de suministro en la zona plástica la elongación aumenta en 8.21% pero el módulo de Young disminuye en 8.37%. El comportamiento plástico de la probeta con post calentamiento con respecto al de suministro el esfuerzo máximo disminuye en un 11.01% y sin post calentamiento también tiene una disminución del 10.17%.

CONCLUSIONES

- Las especificaciones técnicas establecidas para la soldadura del acero AISI 1045 mediante soldadura a fricción rotativa, primero en la etapa de fricción contamos con la fase de rozamiento en un tiempo de 3s donde la presión va aumentando hasta llegar a la fase de calentamiento donde la presión es de $30\text{kg}/\text{cm}^2$ y se mantiene constante por 17.26s, luego se pasa a la fase de frenado el cual se apaga en seco la maquina y finalmente pasamos a la fase de unión donde inmediatamente se ejerce presión por 2s hasta llegar a una presión $70\text{kg}/\text{cm}^2$ y mantener constante por 7.19s aproximadamente.
- El diagrama TTT del acero AISI 1045 indica la fase Bainita para cambiar las propiedades del acero AISI 1045 en resistencia y tenacidad. La temperatura de fricción esta alrededor de los 1392°C superior a la temperatura de austenización en esta etapa se obtiene 100% austenita, por lo tanto, en el diagrama TTT en la primera etapa se tiene un tiempo de 10 a 15 segundos donde ocurre el enfriamiento a temperatura ambiente hasta llegar a los 400°C obteniendo 50% austenita y 50% bainita en la segunda etapa se le introduce al horno precalentado a una temperatura constante de 400°C a 20min resultando 100% bainita, para finalizar, en la tercera etapa se retira y se le deja enfriar a temperatura ambiente.
- Se realiza la comparación de las propiedades mecánicas entre los ensayos sin y con post calentamiento, respecto a los de suministro, enfocándose en los valores que han ayudado de cierta manera a los materiales soldados. El diagrama de esfuerzo vs deformación del acero AISI 1045 en estado de suministro y soldado mediante fricción rotativa sin post calentamiento y con post calentamiento, donde se puede apreciar que la mayor pendiente en la zona elástica es el de con post calentamiento con un módulo de Young de 14405.18MPa , le sigue el de suministro con 10493.80MPa y el de sin post calentamiento con 9615.41MPa ; de la misma manera el esfuerzo máximo de mayor a menor esta, el de suministro, luego el de sin post calentamiento y finalmente el de con post calentamiento con valores de 967.14 , 757.78 y 860.56MPa respectivamente; finalmente se aprecia el porcentaje de elongación siendo el de sin post calentamiento con mayor elongación, precedida del de suministro y el de con post calentamiento con valores de 20.60 , 19.00 y $10.00\text{m}/\text{m}$ respectivamente.
- Finalmente se puede observar que el acero posee un comportamiento elástico y plástico, en la zona elástica para la probeta con post calentamiento respecto al de suministro se

aprecia un aumento del módulo de Young en 37.27%, pero la deformación plástica se ha reducido en 46.15%, sin embargo, para la probeta sin post calentamiento con respecto al de suministro en la zona plástica la elongación aumenta en 8.21% pero el módulo de Young disminuye en 8.37%. El comportamiento plástico de la probeta con post calentamiento con respecto al de suministro el esfuerzo máximo disminuye en un 11.01% y sin post calentamiento también tiene una disminución del 10.17%.

RECOMENDACIONES

- Para nuevas investigaciones sobre soldadura a fricción se recomienda utilizar un manómetro y sustitutos de medición de control con mayor exactitud, en varias pruebas piloto del ensayo a fricción rotativa para ajustar los diferentes factores como velocidad rotacional, presión de calentamiento y forja y finalmente los tiempos de cada fase.
- Se recomienda en las probetas 4, 5 y 10 realizar un ensayo metalográfico para determinar su microestructura como las causas por la cual fallaron las probetas sin post calentamiento, además para evaluar el tratamiento térmico de la probeta con post calentamiento, y verificar que tipo de fase han obtenido cada una de ellas.
- Se recomienda buscar otro tipo de sujeción para la máquina de soldadura a fricción de tal manera que queden centradas las probetas y unirse de la forma correcta. Así se evitan desalineaciones, defectos estructurales, se obtiene mayor eficiencia del proceso y seguridad.

LISTA DE REFERENCIAS

- [1] R. Q. Mejias, soldadura disímil rotación continua entre una plancha de acero inoxidable y una barra de aisi 1045, moa: facultad de metalurgia electromecánica departamento de mecánica, 2020.
- [2] H. M. S. Kangonjo, determinación de una unión disímil mediante soldadura por fricción radial de las aleaciones 1045 y 316l, moa: ministerio de educación superior minero metalúrgico de moa, 2019.
- [3] T. F. C. Y. M. H. E. G. R. Ledennus Torres Suarez, «empleo del fenómeno de la fricción rotativa en maquina torno para la unión de aleaciones disimiles,» *ciencia y futuro*, vol. 12, n° 3, pp. 1-13, 2022.
- [4] N. V. A. Andrés, calificación de un proceso de soldadura por fricción para aluminios 2024, universidad libre, 2020.
- [5] J. Mullo, asistencia de un haz de laser como método de tratamiento térmico en un proceso de soldadura por fricción, Santiago de Chile: pontifica universidad católica de Chile escuela de ingeniería, 2021.
- [6] P. L. Y. A. E. Durgesh d, «friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding,» *journal of adhesion science and technology*, vol. 34, n° 24, 2020.
- [7] E. Moreno, soldadura por fricción, Medellín: universidad eafit, 2008.
- [8] A. Pupiales, estudio y caracterización de la soldabilidad en materiales disimiles aluminio 6061- laton c38500 mediante el proceso de soldadura por fricción, Quito: escuela politécnica nacional, 2018.
- [9] A. M. E. C. Pedro Cabot, soldadura por fricción agitación (fsw) de aa 6061 t6, Buenos Aires: issn 1517-7076, 2018.
- [10] R. B. Zabalo, soldadura por fricción rotativa, escuela politécnica de San Sebastián, 2015.
- [11] F. Correa, análisis micrográfico de una unión soldada con post calentamiento en un acero aisi/sae 1045 en doble fase, Bogotá: universidad distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [12] R. R. L. P. Grisel Cordero, «determinación del tiempo en la etapa de calentamiento para obtener la unión de un aluminio aa6063 soldado por fricción,» *dialnet*, vol. 2, p. 16, 2012.
- [13] I. C. F. Javier, experimentación de las estrategias de mecanizado adaptativas en el fresado

- a alta velocidad en aluminio prodax, Sangolquí: espe, 2019.
- [14] C. Sanguña, diseño y construcción de un equipo para soldadura por fricción de torque continuo para el laboratorio de soldadura de la carrera de ingeniería mecánica de la ups campus Kennedy, quito: ups, 2012.
- [15] P. H. R. D. M. A. Alberto Cardona, «influencia del tratamiento térmico desde temperaturas inter críticas en las propiedades mecánicas del acero sae 1045,» *asociación argentina de mecánica computacional*, vol. 1, p. 11, 2012.
- [16] C. D. C. Lisintuña, caracterización de las probetas soldadas por fricción mediante pruebas de tracción y torsión para materiales: acero aisi 1018, acero aisi 1045, aluminio y bronce sae 40 de 10 mm de diámetro, quito: ups, 2018.
- [17] S. C. S. A. Y. D. M. el-oualid bouarroudj, «thermal analysis during a rotational friction welding,» *elsevier*, vol. 110, pp. 1543-1553, 2017.
- [18] M. Maalekian, «friction welding – critical assessment of literature,» *science and technology of welding and joinning* , vol. 12, 2007.
- [19] Q. F. Y. Z. S. Claro Luana, proceso y tipos de soldadura, costa rica: universidad de costa rica.
- [20] M. N. A. H. Z. Y. A. B. I. M. B. Uday, «advances in friction welding process: a review,» *science and technology of welding and joining*, vol. 15, n° 7, 2010.
- [21] N. Ozdemir, «effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded aisi 304l to 4340 steel,» *elsevier*, vol. 28, n° 1, pp. 301-307, 2007.
- [22] J. A. R. G. Y. G. O. B. José Luis Mull, «effect of laser heat treatment on the mechanical performance and microstructural evolution of aisi 1045 steel-2017-t4 aluminum alloy joints during rotary friction welding,» *journal of materials engineering and performance*, vol. 30, pp. 2617-2631, 2021.
- [23] uhb-prodax, «aluminio de alta resistencia prodax,» *assab*, p. 4.
- [24] S. A. Y. D. M. el- Oualid Bouarroudj, «improved performance of a heterogeneous weld joint of copper-steel aisi 1045 obtained by rotary friction using a metal powder insert,» *the international journal of advanced manufactueing technology*, vol. 124, pp. 1905-1924, 2023.
- [25] M. Ruíz, soldadura del acero inoxidable 304 con electrodo 308 con precalentamiento y

post calentamiento a 350°C, cautitlan, estado de México: universidad nacional autónoma de México, 2019.

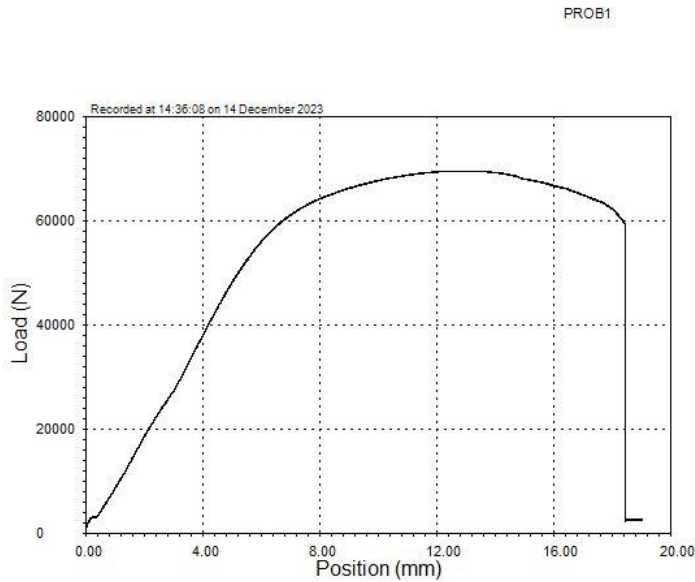
- [26] V. A. Alza, «mechanical properties and microstructure, in welded joints of low and medium carbon steels, applying rotary friction,» vol. 8, n° 6, pp. 2277-3878, 2020.
- [27] S. A. B. gawhar ibraheem khidhir, «efficiency of dissimilar friction welded 1045 medium carbon steel and 316l austenitic stainless steel joints,» *journal of materials reseach and tchnology*, vol. 8, n° 2, pp. 1926-1932, 2019.
- [28] Y. L. Q. R. Anhelo Brandon Córdor Luna, diseño de una máquina de ensayos a tracción standard bajo la norma astm e8 para la facultad de ingeniería de la universidad continental, Huancayo: escuela académico profesional de ingeniería mecánica, 2021.
- [29] S. R. M. P. Y. C. D. Armas, caracterización de propiedades mecánicas de las fibras de banano de la corteza y el cuerpo del tallo, 2016.

ANEXOS

Diagramas de esfuerzo vs deformación de la máquina de ensayo a tensión

Sin post calentamiento:

PROBETA 1 con Lo de 74.7mm

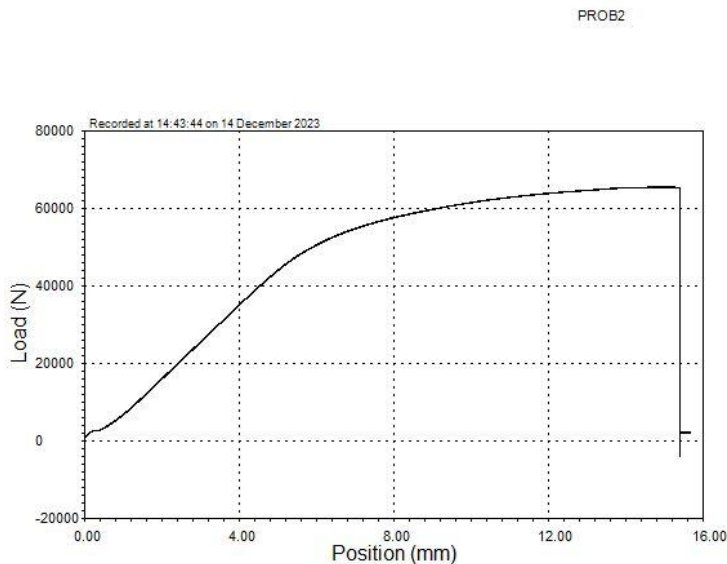


Specimen Identifier:	PROB1
Test Date:	14 December 2023
Start Time:	14:36:08
End Time:	14:38:01
Geometry:	Round
Diameter:	10.0 mm
Area:	78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	12.63 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	69486.273 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	884.72656 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	46001.730 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	585.71222 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 2 con Lo de 80.3mm



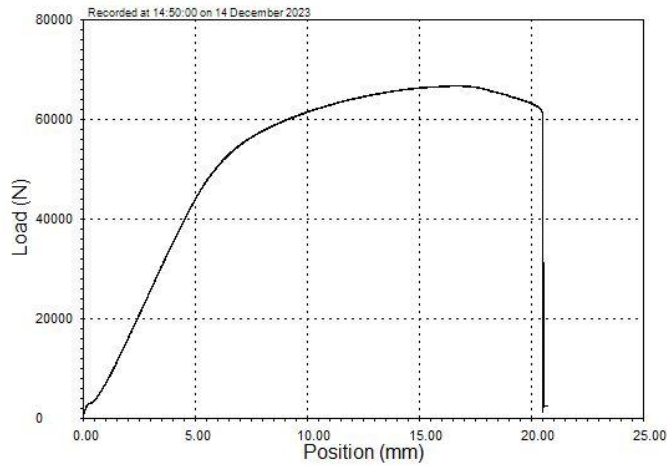
Specimen Identifier:	PROB2
Test Date:	14 December 2023
Start Time:	14:43:44
End Time:	14:45:17
Geometry:	Round
Diameter:	10.0 mm
Area:	78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	14.96 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	65389.891 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	832.56989 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	41043.770 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	522.58551 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 3 con Lo de 83.43mm

PROB3



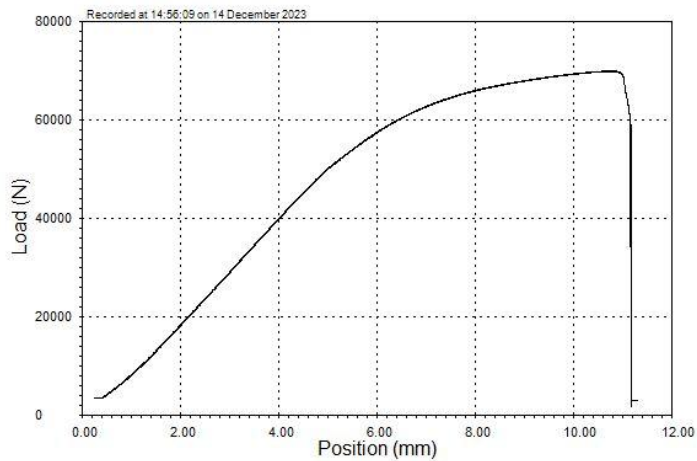
Specimen Identifier:	PROB3
Test Date:	14 December 2023
Start Time:	14:50:00
End Time:	14:52:04
Geometry:	Round
Diameter:	10.0 mm
Area:	78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	16.55 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	66633.250 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	848.40076 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	36627.520 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	466.35605 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 5 con Lo de 73.10mm

PROB5

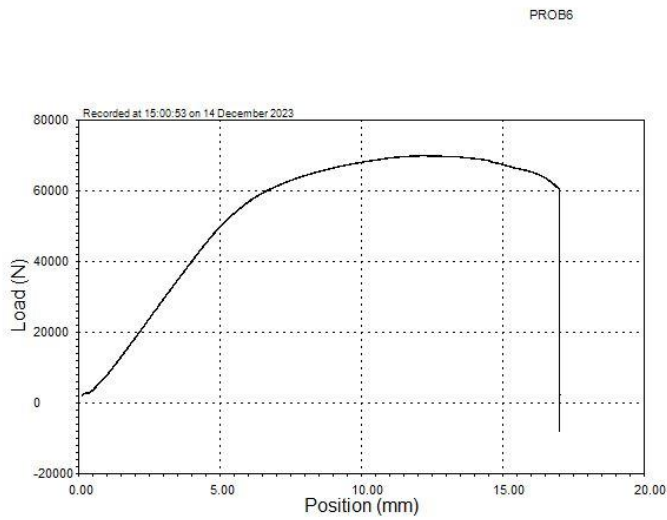


Specimen Identifier:	PROB5
Test Date:	14 December 2023
Start Time:	14:56:09
End Time:	14:57:15
Geometry:	Round
Diameter:	10.0 mm
Area:	78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	10.75 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	69811.297 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	888.86499 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	45834.055 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	583.57727 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 6 con Lo de 71.27mm



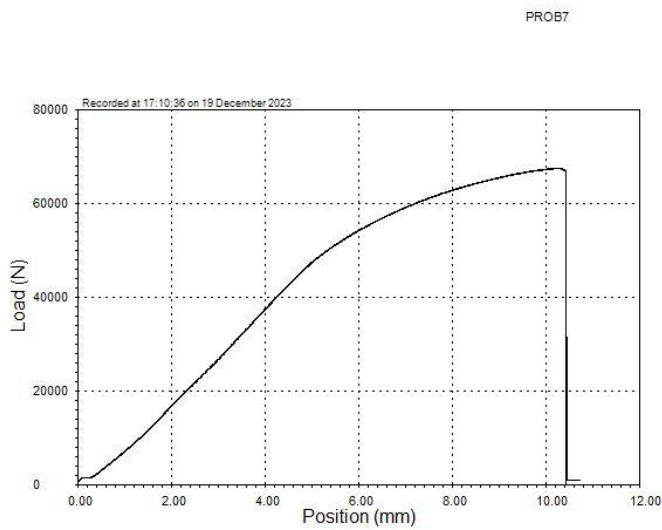
Specimen Identifier:	PROB6
Test Date:	14 December 2023
Start Time:	15:00:53
End Time:	15:02:34
Geometry:	Round
Diameter:	10.0 mm
Area:	78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	12.29 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	69782.922 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	888.50372 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	40375.660 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	514.07886 MPa
Offset	0.200 %

Con post calentamiento:

PROBETA 7 con Lo de 106.48mm

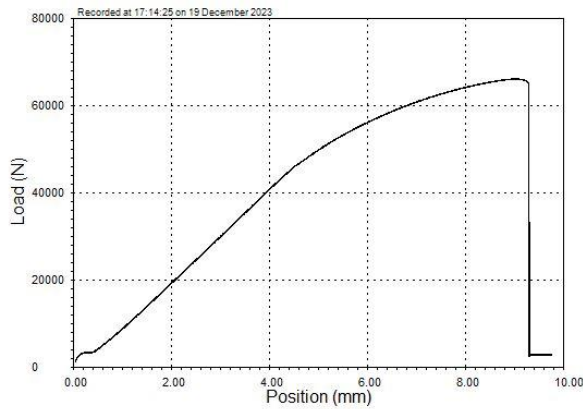


Specimen Identifier:	PROB7
Test Date:	19 December 2023
Start Time:	17:10:36
End Time:	17:11:40
Geometry:	Round
Diameter:	10.0 mm
Area:	78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	10.26 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	67412.281 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	858.31976 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	43042.949 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	548.03986 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 8 con Lo de 106.48mm



Test Date: 19 December 2023
 Start Time: 17:14:25
 End Time: 17:15:23

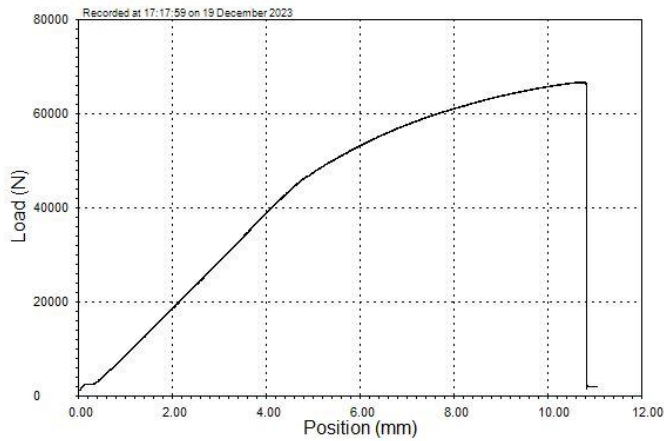
Geometry: Round
 Diameter: 10.0 mm
 Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	9.04 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	66042.523 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	840.87946 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	46275.168 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	569.19373 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 9 con Lo de 106.48mm

PROB9



Specimen Identifier: PROB9

Test Date: 19 December 2023
 Start Time: 17:17:59
 End Time: 17:19:05

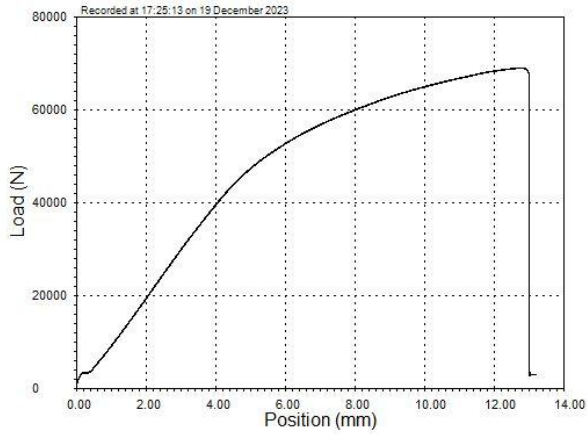
Geometry: Round
 Diameter: 10.0 mm
 Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	10.78 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	66612.609 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	848.13806 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	43499.531 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	553.85321 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 10 con Lo de 106.48mm

PROB10

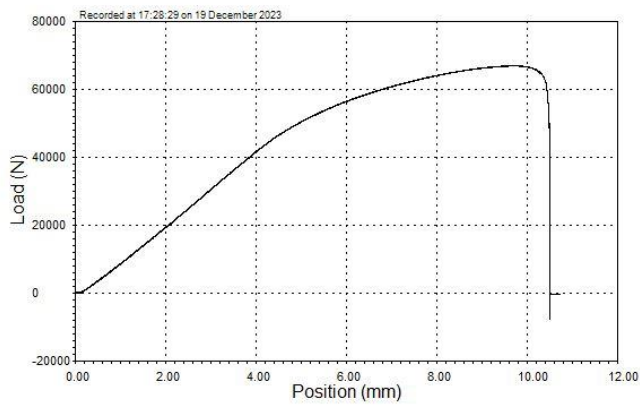


Specimen Identifier: PROB10
 Test Date: 19 December 2023
 Start Time: 17:25:13
 End Time: 17:26:31
 Geometry: Round
 Diameter: 10.0 mm
 Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	12.78 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	68934.242 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	877.69794 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	33366.926 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	424.84088 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 11 con Lo de 106.48mm



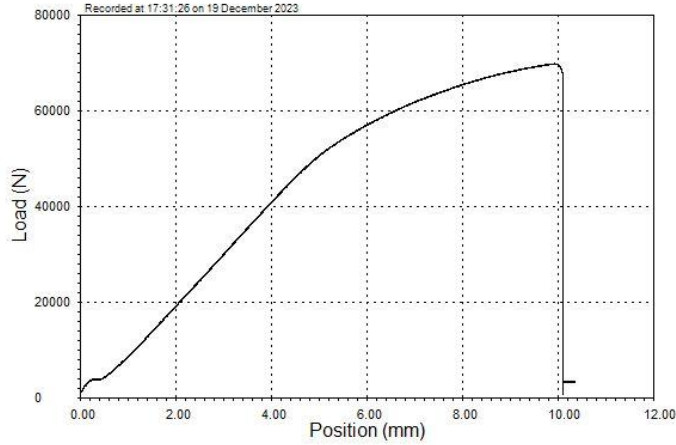
Test Date: 19 December 2023
 Start Time: 17:28:29
 End Time: 17:29:33
 Geometry: Round
 Diameter: 10.0 mm
 Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	9.74 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	66813.820 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	850.69995 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	41683.508 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	530.73083 MPa
Offset	0.200 %

PROBETA 12 con Lo de 106.48mm

PROB12



Specimen Identifier: PROB12
 Test Date: 19 December 2023
 Start Time: 17:31:26
 End Time: 17:32:27
 Geometry: Round
 Diameter: 10.0 mm
 Area: 78.5 sq mm

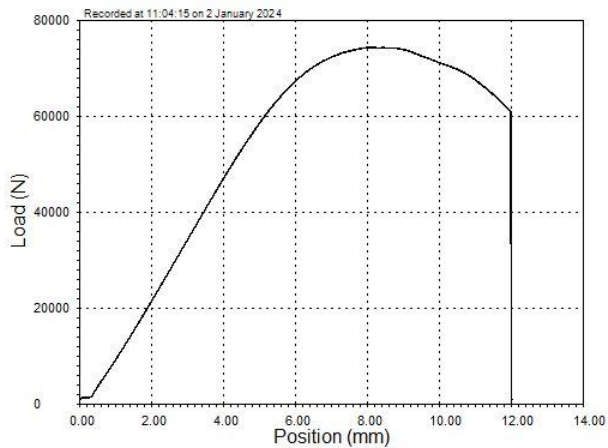
Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	9.94 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	69759.703 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	888.20807 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	1135.017 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	14.45149 MPa
Offset	0.200 %

Suministro:

PROB SUM1 con Lo de 64.64mm

prob1 sum

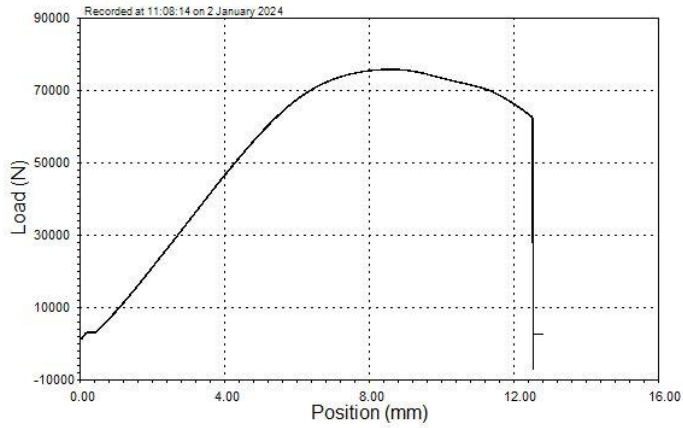


Specimen Identifier: prob1 sum 1
 Test Date: 2 January 2024
 Start Time: 11:04:15
 End Time: 11:05:27
 Geometry: Round
 Diameter: 10.0 mm
 Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	8.12 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	74338.469 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	946.50677 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	53405.141 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	679.97534 MPa
Offset	0.200 %

PROB SUM2 con Lo de 64.64mm



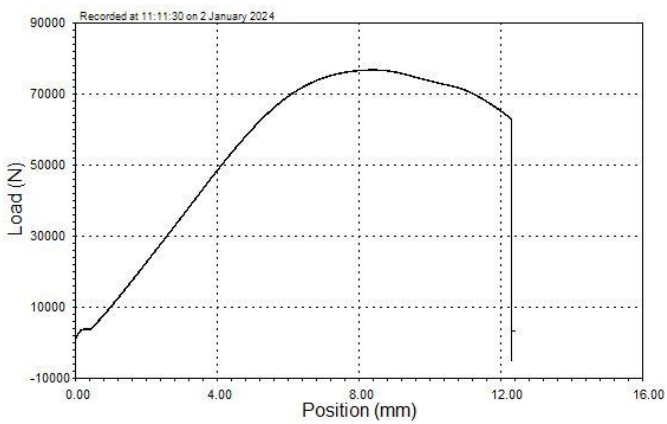
Specimen Identifier: prob2 sum 1
 Test Date: 2 January 2024
 Start Time: 11:08:14
 End Time: 11:09:30
 Geometry: Round
 Diameter: 10.0 mm
 Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

Extension at Maximum Load	8.58 mm
Extension at Maximum Load	
Maximum Load	
Load	75746.922 N
Maximum Stress	
Maximum Stress	964.43964 MPa
Yield by Offset (Load)	
Yield	51184.117 N
Offset	0.200 %
Yield by Offset (Stress)	
Yield	651.69635 MPa
Offset	0.200 %

PROB SUM3 con Lo de 64.64mm

prob3sum

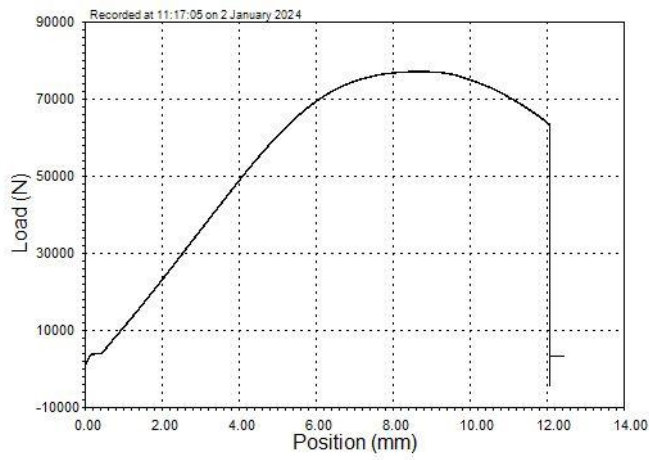


Specimen Identifier: prob3 sum 1
 Test Date: 2 January 2024
 Start Time: 11:11:30
 End Time: 11:12:44
 Geometry: Round
 Diameter: 10.0 mm
 Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

Extension at Maximum Load	8.39 mm
Extension at Maximum Load	
Maximum Load	
Load	76685.891 N
Maximum Stress	
Maximum Stress	976.39496 MPa
Yield by Offset (Load)	
Yield	53815.297 N
Offset	0.200 %
Yield by Offset (Stress)	
Yield	685.19757 MPa
Offset	0.200 %


PROB SUM4 con Lo de 64.64mm



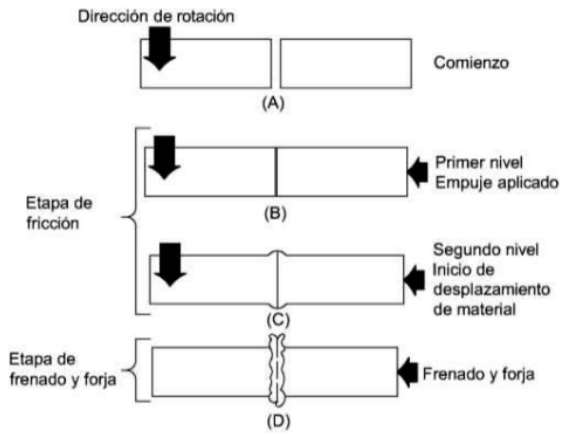
Specimen Identifier: prob4 sum 1
Test Date: 2 January 2024
Start Time: 11:17:05
End Time: 11:18:19
Geometry: Round
Diameter: 10.0 mm
Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Extension at Maximum Load</u>	
Extension at Maximum Load	8.58 mm
<u>Maximum Load</u>	
Load	77062.508 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	981.19031 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	51617.484 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	657.21423 MPa
Offset	0.200 %

	Universidad Politécnica salesiana Carrera de Ingeniería Mecánica (Soldadura a Fricción)																														
	$T_{probeta}$																														
Maquina	Equipo de soldadura por fricción de torque continuo																														
Material	Acero AISI 1045-AISI 1045																														
Dimensión de probetas	10mm de diámetro y 65mm de longitud																														
Numero de probetas	12																														
Datos de soldadura a fricción: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Diámetro [mm]</th> <th style="text-align: center;">velocidad [RPM]</th> <th style="text-align: center;">Tiempo [s]</th> <th style="text-align: center;">Presión de calentamiento [Kg/cm2]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">2400</td> <td style="text-align: center;">17</td> <td style="text-align: center;">100</td> </tr> </tbody> </table>				Diámetro [mm]	velocidad [RPM]	Tiempo [s]	Presión de calentamiento [Kg/cm2]	10	2400	17	100																				
Diámetro [mm]	velocidad [RPM]	Tiempo [s]	Presión de calentamiento [Kg/cm2]																												
10	2400	17	100																												
<p>Encogimiento axial de las probetas de acero AISI 1045, en este apartado se toma la suma de las dos piezas a unir como longitud inicial, y una vez soldado las dos piezas se toma la medida de longitud final, para luego obtener mediante resta el encogimiento axial.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Probeta N°</th> <th style="text-align: center;">Longitud Inicial mm</th> <th style="text-align: center;">Longitud Final mm</th> <th style="text-align: center;">Encogimiento axial mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">129.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">130.8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">129.9</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">129.7</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">131.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">129.8</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Probeta N°	Longitud Inicial mm	Longitud Final mm	Encogimiento axial mm	1	129.4			2	130.8			3	129.9			4	129.7			5	131.0			6	129.8		
Probeta N°	Longitud Inicial mm	Longitud Final mm	Encogimiento axial mm																												
1	129.4																														
2	130.8																														
3	129.9																														
4	129.7																														
5	131.0																														
6	129.8																														

Secuencia básica de soldadura por fricción directa



Comienzo: Velocidad de rotación a 2400RPM.

Etapa de fricción:

Primer nivel de empuje aplicado: Con una presión constante de 100kg/cm²

Segundo nivel de desplazamiento de material: con la misma presión, y un desplazamiento que este alrededor de los 0.1– 0.3 mm

Etapa de frenado y forja:

Frenado y Forja: Luego de que se detenga, ejercer la misma presión, pero con un desplazamiento mayor, llegando a un desplazamiento total de entre 0.6-0.9mm.

Los tiempos son dependiendo a la etapa, dando así un total aproximado de 16 segundos.

Probeta N°	Tiempo de fricción s	Tiempo de forja s	Tiempo total s
1			
2			
3			
4			
5			
6			