

Unión metalúrgica de tuberías disímiles con el empleo de soldadura por fricción radial

Joining metallic pipes of different sizes using radial friction welding

Elís Efraín Guzmán Romero* eeгуzman@ismm.edu.cu ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0000-0003-4906-8009>

Ledennis Suárez Torres lstorres@ismm.edu.cu ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0000-0002-2202-2169>

Marlon Antonio Leyva Tarafa mtarafa@ismm.edu.cu ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0000-0002-4081-4442>

⁽¹⁾ Universidad de Moa, Moa, Cuba

* Autor para la correspondencia

Resumen: El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la unión metalúrgica de tuberías disímiles de acero AISI 1045 y AISI 316L mediante soldadura por fricción radial. Para ello, se emplearon parámetros de soldadura de 1000 y 1200 r/min, con presiones de 0,9 y 1,9 MPa, obteniéndose un total de seis muestras. En las muestras soldadas a 1000 r/min, las microestructuras de la Zona Termomecánicamente Afectada (ZTMA) están compuestas por ferrita y perlita; en el AISI 1045 se identificaron fases de ferrita dendrítica y austenita, mientras que en el AISI 316L se observó ferrita dendrítica, ferrita lathy y austenita, con una solidificación ferrita-austenita. Por otro lado, a 1200 r/min, las estructuras corresponden a ferrita con formación de austenita dendrítica y austenita en los límites de grano de la ferrita en el AISI 1045, y a fase austenítica con una franja de ferrita en el AISI 316L, también con solidificación ferrita-austenita. La temperatura de fricción requerida osciló entre 780 y 738 °C, y en función de esta, la dureza varió entre 250 y 236,5 HV, dependiendo de los números de revoluciones empleados.

Palabras claves: acero, tratamiento de metal, tecnología de materiales, ensayo de materiales

Abstract: This work aims to characterize the metallurgical joint of dissimilar AISI 1045 and AISI 316L pipes using radial friction welding. Welding parameters of 1000 and 1200 r/min with pressures of 0.9 and 1.9 MPa were used to obtain six samples. The microstructures of the Thermomechanically Affected Zone (HAZ) at 1000 r/min are composed of ferrite and pearlite, with dendritic ferrite and austenite present in the first, and dendritic ferrite, lathy ferrite, and austenite in the second, with ferrite–austenite solidification. At 1200 r/min, the structures consist of ferrite with the formation of dendritic austenite and austenite at the ferrite grain boundaries in AISI 1045, and an austenitic phase with a ferrite band in AISI 316L, with ferrite–austenite solidification. The required friction temperature ranged from 780 to 738 °C, at which the hardness fluctuates between 250 and 236.5 HV, depending on the rotational speeds used.

Key words: steel, metal treatment, materials technology, materials testing

1. Introducción

La soldadura de materiales disímiles impone un reto para los ingenieros relacionado con la integridad estructural de estas uniones debido a la diferencia en términos de microestructura, propiedades mecánicas, térmicas y de fractura (López *et al.*, 2007; Hosseini *et al.*, 2022; Fernández-Columbié *et al.*, 2024; Galindo *et al.*, 2026; Haider *et al.*, 2026).

La soldadura por fricción es un proceso de unión en estado sólido y de penetración completa. Su principio de funcionamiento se basa en transformar la energía mecánica en térmica mediante la fricción entre las piezas a unir bajo una fuerza de compresión. Al no alcanzar la temperatura de fusión del metal, no se genera dilución entre los materiales en el análisis microscópico. Este proceso se lleva a cabo, de forma secuencial, a través de distintas fases o etapas (Arun *et al.*, 2017; Dellepiane *et al.*, 2025; Salman, 2026) (Figura 1).

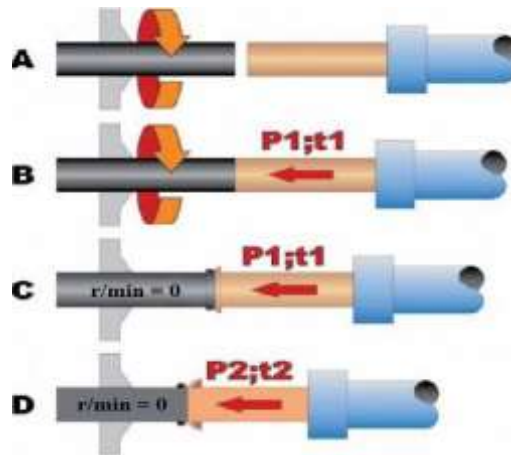


Figura 1. Fases de la soldadura por fricción. (A) Periodo de aproximación, (B) P1, t1 aplicación, (C) fin de P1, t1 aplicación, y frenado de la máquina ($r/min = 0$), (D) P2, t2 aplicación y fin de la soldadura (Arun *et al.*, 2017).

La velocidad de rotación y la presión axial que se aplica determinan la forma de la unión soldada, por lo que es necesario controlar estos factores para obtener una unión fuerte y uniforme. El movimiento radial hacia fuera del material caliente en la interfase ayuda a eliminar los óxidos y otros contaminantes fuera de esta (Mercan *et al.*, 2015).

El principio de la soldadura por fricción se basa en aprovechar el calor generado entre dos piezas para lograr una unión metalúrgica en estado sólido, evitando la formación de una fase líquida. Inicialmente, la fuerza de contacto produce calentamiento en la interfaz por fricción. Al plastificarse el material, la presión ejercida sobre ambos componentes desplaza térmicamente el exceso de material, lo que remueve las impurezas superficiales y da lugar a una junta limpia y homogénea (Guzmán-Romero *et al.*, 2017; Sathishkumar *et al.*, 2023; Farbakhti *et al.*, 2025; Ruiz Pedraza & Mosquera Laguna, 2026).

En este proceso de estado sólido, el material de la junta se mezcla por deformación plástica sin alcanzar el punto de fusión debido al calor generado por el rozamiento relativo entre las piezas (Yurievich *et al.*, 2026). Entre sus principales ventajas destaca que no requiere material de aporte, fundente ni gas de protección, garantiza elevadas propiedades mecánicas y admite su automatización mediante maquinaria existente. Asimismo, constituye una tecnología sostenible, pues no emite gases tóxicos, radiaciones ni chispas. No obstante, al tratarse de una técnica en constante desarrollo, resulta clave el estudio de sus parámetros operativos, siendo el tiempo de la etapa de calentamiento un factor determinante en la integridad y calidad de la unión.

La soldadura por fricción tiene la finalidad de lograr uniones en materiales con perfiles cilíndricos que no pueden soldarse de forma convencional (Kimura *et al.*, 2010; Cordero *et al.*, 2012; Koteswara *et al.*, 2017). La soldadura por fricción rotativa (*Rotary Friction Welding*, RFW), es un proceso de unión de dos piezas en un estado sólido y es utilizado en diversos procesos industriales (López Escobar *et al.*, 2022; Castro *et al.*, 2025; Requelme Vega *et al.*, 2025). Se puede utilizar para unir variedad de materiales, siempre y cuando uno de los componentes tenga alguna simetría rotacional. Mediante este método es posible unir las partes sólidas o tubulares con una buena resistencia en la unión. Así se han unido con éxito barras sólidas de acero de hasta 100 mm de diámetro y tubos de hasta 250 mm de diámetro exterior (Ravi & Ramadoss, 2015).

La soldadura por fricción está concebida para unir materiales de perfil cilíndrico difíciles de procesar mediante soldadura convencional (Kimura *et al.*, 2010; Cordero *et al.*, 2012; Koteswara *et al.*, 2017). Dentro de esta categoría, la soldadura por fricción rotativa es una técnica en estado sólido de alto uso industrial (López Escobar *et al.*, 2022; Castro *et al.*, 2025; Requelme Vega *et al.*, 2025), idónea para combinar diversos materiales siempre que una de las piezas posea simetría de revolución. El proceso proporciona uniones de elevada resistencia en elementos sólidos o tubulares, habiéndose reportado el ensamble exitoso de barras de acero de hasta 100 mm de diámetro y tuberías con un diámetro exterior de hasta 250 mm (Ravi & Ramadoss, 2015). El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la unión metalúrgica de tuberías disímiles mediante el empleo de soldadura por fricción radial.

2. Materiales y métodos

2.1. Composición química de las aleaciones

El análisis químico del acero AISI 1045 se realizó en un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón (Tabla 1). El AISI 316L se realizó con el empleo de un espectrómetro de masa PMI MASTER PRO con electrodo de base tungsteno bajo arco sumergido en atmósfera de argón (Tabla 2).

Tabla 1. Composición química del acero AISI 1045, % en masa

Tipo	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	Fe
AISI 1045	0,46	0,65	0,01	0,019	0,25	0,40	0,40	0,10	0,16	0,01	97,75

El AISI 1045 está considerado como un acero de medio contenido de carbono, aunque este elemento no es el único factor que afecta la soldabilidad; alto niveles conducen al fenómeno de agrietamiento durante la soldadura. Al ser unido con acero inoxidable de la serie 300, como el AISI 316L, puede provocar la precipitación de carburos de cromo. La tabla 2 muestra la composición química del acero AISI 316L.

Tabla 2. Composición química del acero AISI 316L, % en masa

Tipo	C	Si	Cr	Ni	Cu	Mn	Mo
AISI 316 L	0,03	0,34	16,22	10,27	0,29	1,60	2,12

El cromo proporciona una resistencia a la oxidación y a la corrosión hasta temperaturas aproximadas de 650 °C en una variedad de ambientes, sin embargo, al combinarse con el carbono durante la soldadura forman fases frágiles como la sigma.

2.2. Variables operativas utilizadas para el proceso de unión

Varios parámetros se pueden controlar en la soldadura por fricción rotativa. En la tabla 3 se muestra los parámetros del proceso de soldadura para la unión disímil por fricción.

Tabla 3. Parámetros de soldadura en función de la temperatura de fricción

Niveles	Variables		Salida
	Número rev (r/min)	Presión (MPa)	Temperatura de fricción (°C)
(-1)	1 000	0,9	
(+1)	1 200	1,9	
Ensayo			
1	1 000	0,9	Tf ₁
2	1 200	0,9	Tf ₂
3	1 000	1,9	Tf ₃
4	1 200	1,9	Tf ₄

Estos parámetros incluyen el diámetro de la pieza a soldar, la velocidad de rotación, tiempo de fricción, tiempo de forja, presión de fricción y presión de forja, así como la geometría de las piezas y las propiedades del material.

2.3. Preparación de la unión para la soldadura

En la soldadura por fricción deben considerarse varias funciones fundamentales para garantizar la calidad del proceso: unión, compresión, desacople de las partes, rotación y fricción bajo presión de las partes, frenado y ajustes de los tiempos de

procesamiento requeridos, así como las fuerzas radiales y axiales. La figura 2 muestra esquemáticamente la forma en que se ejecuta la soldadura por fricción.

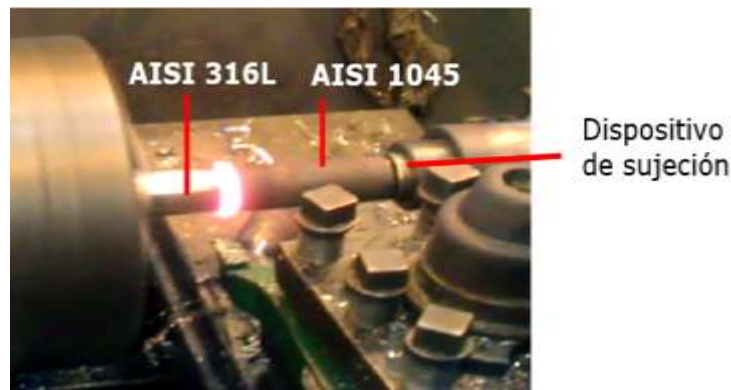


Figura 2. Ejecución de la unión de soldadura AISI 1045/316L.

El proceso de soldadura se realizó con tuberías de 32 mm de diámetro. El AISI 1045 se instaló en un dispositivo ubicado en el carro móvil y el AISI 316L que rota en el plato autocentrante de tres muelas. La máquina herramienta empleada fue el torno C 11 MT.

2.4. Preparación metalográfica de la probeta

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: desbaste, pulido, desengrasado y lavado (ASTM E 3 – 95 y Norma NC 10 – 56: 86). En la figura 3 se muestra la unión luego de haber realizado la soldadura y de donde se obtendrán las muestras para la preparación metalográfica.



Figura 3. Unión disímil obtenida de la soldadura por fricción.

Se realizaron seis muestras según los parámetros establecidos (1000 y 1200 r/min), lo cual permitió evaluar la unión metalúrgica mediante la soldadura por fricción radial.

2.5. Preparación metalográfica de las probetas

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: desbaste, pulido, desengrasado y lavado. El corte se realizó considerando la cara interna de las probetas, priorizando al área cercana a la raíz de la soldadura. Se consideraron tres probetas de cada sección de tubería a analizar.

La operación de desbaste y pulido se realizó variando la granulometría de los papeles abrasivos aplicados a la pieza, desde la más gruesa a la más fina, de los tipos No. 400, 600, 800 y 1 000. Las muestras se pulieron en una pulidora metalográfica; como sustancia abrasiva se utilizó el óxido de cromo. Pulida las muestras se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro. Para la medición de dureza se empleó una pirámide de diamante, con un ángulo de 136° según la ASTM E 92-82.

Para atacar el AISI 316L se empleó como reactivo químico una mezcla de 10 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 30 mL de ácido clorhídrico a temperatura ambiente y durante 5 min. Para el AISI 1045, mezcla de 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 100 mL de alcohol etanol de 3 a 5 s.

3.1. Resultados y discusión

3.2. Análisis de los parámetros de soldadura

En la soldadura por fricción del AISI 1045 con el AISI 316L, los parámetros de soldadura y el aporte de calor pueden ajustarse para controlar la descarburación, la formación de carburos y de martensita, de modo similar a los procesos extensivos de soldadura por fusión. La tabla 4 recoge las temperaturas obtenidas según los parámetros empleados.

Tabla 4. Resultados de los parámetros de soldadura			
Niveles	Variables		Salida
	Número revol. (r/min)	Presión (MPa)	Temperatura de fricción (°C)
(-1)	1 000	0,9	
(+1)	1 200	1,9	
Ensayo			
1	1 000	0,9	780
2	1 200	0,9	765
3	1 000	1,9	760
4	1 200	1,9	740

Los resultados obtenidos para las temperaturas, correspondientes a las distintas variaciones de los parámetros de soldadura, representan el 50 % de la temperatura de fusión de las aleaciones. La temperatura máxima se alcanza al disminuir la velocidad de rotación; asimismo, una menor fuerza axial sobre la junta ejerce un ligero efecto sobre el pico de dicha temperatura.

3.3. Análisis de la microestructura de la ZTMA para 1 000 r/min

Para realizar el análisis microestructural, se consideraron las diferentes condiciones de soldadura aplicadas a las muestras. La Figura 3 muestra la zona termomecánicamente afectada correspondiente a una velocidad de rotación de 1 000 r/min. En esta región se observan granos con distintas orientaciones cristalográficas, producto de la deformación plástica y del ciclo térmico generado durante el proceso de soldadura.

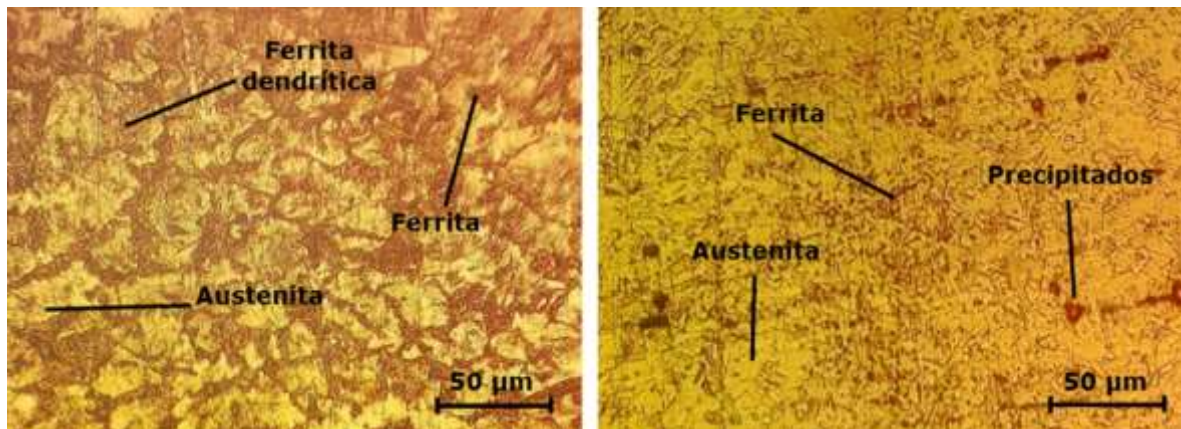


Figura 4 (a). ZTMA en el acero AISI 1045. (b). ZTMA en el acero AISI 316L.

La Figura 4(a), correspondiente a la zona termomecánicamente afectada del acero AISI 1045, muestra una distribución de granos compuesta por ferrita, ferrita dendrítica y austenita. Por su parte, la Figura 4(b), asociada al acero AISI 316L, evidencia transformaciones constituidas por ferrita dendrítica, ferrita y austenita. Estos resultados permiten establecer que, durante el proceso de soldadura por fricción a una velocidad de 1 000 r/min, ambas aleaciones presentan un modo de solidificación ferrita-austenita (FA).

Cuando la solidificación se produce como ferrita primaria, también pueden darse dos escenarios. Si se forma algo de austenita al final de la solidificación, el modo se denomina tipo FA. Esta austenita se genera mediante una reacción peritética-

eutéctica y se localiza en los límites de la ferrita solidificada, al final del proceso, de acuerdo con el criterio de Shrikrishna et al. (2015).

3.3.1. Análisis de la microestructura de la ZTMA para 1 200 r/min

Se analizan los efectos de los parámetros de soldadura empleados en los aceros AISI 1045 y AISI 316L mediante la soldadura por fricción radial continua. En la figura 5 se muestra el comportamiento microestructural obtenido.

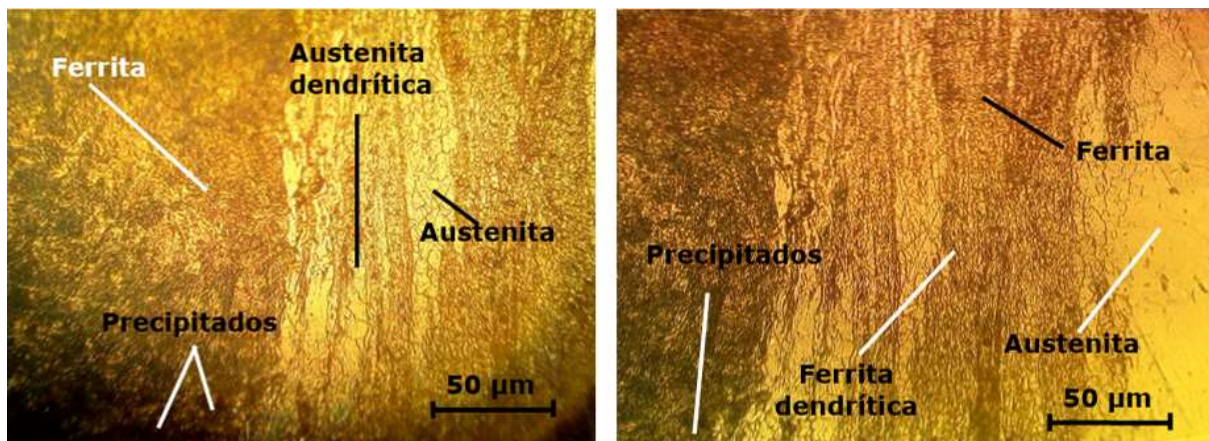


Figura 5(a). ZTMA del acero AISI 1045. (b). ZTMA del acero AISI 316L.

Tras el proceso de soldadura de ambas aleaciones a 1 200 r/min, las figuras 5 (a) y (b) muestran la zona termomecánicamente afectada (ZTMA), en la que se distingue una línea de granos claros que la divide. En el lado correspondiente al acero AISI 1045 se identifica ferrita con austenita dendrítica y austenita en los límites de grano de la ferrita, junto con la formación de precipitados. En el lado del acero AISI 316L se observa la fase austenítica acompañada de una franja de ferrita próxima a la ZTMA. De acuerdo con las estructuras resultantes, la solidificación se clasifica como ferrita-austenita (FA).

En este tipo de soldadura, las uniones soldadas por fricción rotativa presentan una transición desde el material base, a través de una zona afectada termomecánicamente, en la que se aprecia una deformación de los granos, sin observarse crecimiento reseñable de los mismos, hasta una zona de forja, en el centro, con granos más pequeños, con configuración equiaxial, ocasionados probablemente por la recrystalización del material deformado.

3.3.2. Análisis de la microestructura de la ZTA

Se realizó el análisis de la microestructura de la ZTA para el acero AISI 1045 y para el AISI 316L, como muestra la figura 6. Se consideraron solo los parámetros de 1200 r/min.

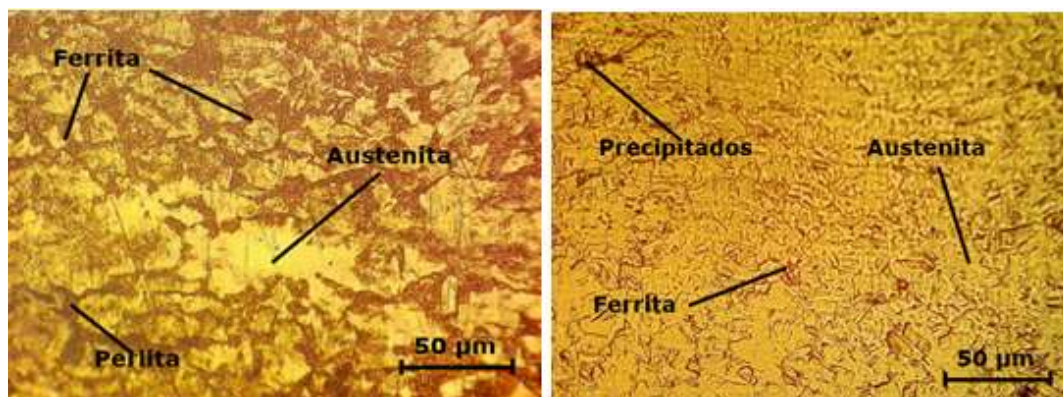


Figura 6. (a) ZTA del AISI 1045. (b) ZTA del AISI 316.

En la microestructura de la zona afectada térmicamente del lado del acero AISI 1045 se observa una estructura de ferrita con austenita en los límites de grano. A partir de ello, puede plantearse que el tipo de solidificación que ocurre durante la soldadura disímil es del tipo ferrita. Por su parte, el lado del AISI 316L está compuesto por granos de ferrita en una matriz austenítica, junto con la presencia de algunos precipitados; en este lado se presenta una solidificación del tipo austenítico (A). La estructura de solidificación está determinada por la morfología de los cristales sólidos, la cual es resultado de la estabilidad de la interfase sólido-líquido.

3.4. Análisis de la dureza en las diferentes zonas

En la tabla 5 se muestran los resultados de los ensayos de dureza realizado en las diferentes zonas obtenidas del proceso de soldadura por fricción radial de las aleaciones AISI 1045 y AISI 316L. Los perfiles de dureza fueron realizados en las diferentes zonas obtenidas para las diferentes condiciones de soldadura.

Tabla 5. Resultados de la dureza

Probet a	Número rev. (r/min)	Presión (MPa)	Dureza MB (HV)	Dureza ZAT (HV) 1045	Dureza ZAT (HV) 316L	Dureza ZTMA (HV)
1	1 000	0,9	180/217	198	237	250
2	1 200	0,9	180/217	190	225	247
3	1 000	1,9	180/217	193,7	235	240
4	1 200	1,9	180/217	189	227	236,5

Se observa la variación de la dureza que experimentan las uniones soldadas de las probetas con diferentes velocidades de rotación y de presiones. Partiendo desde el metal base, la dureza se reduce más en la ZAT con respecto a la ZTMA donde presenta un ligero incremento cerca de la periferia. Para la 4ta condición de soldadura se indica una ligera tendencia a la disminución de la microdureza por el incremento en la velocidad de rotación.

Los perfiles de microdureza de las zonas soldadas (ZTMA) mostraron, en todos los casos, una dureza mayor como resultado del endurecimiento por precipitación que se produce en la aleación debido a la presencia del silicio. Esta zona presenta una estructura de grano más fina, debido al rápido enfriamiento del pozo de soldadura.

4. Conclusiones

El análisis microestructural de la zona termomecánicamente afectada ZTMA en la soldadura disímil AISI 1045 – AISI 316L reveló que, a 1 000 r/min, la zona está constituida por ferrita y perlita, junto con ferrita dendrítica y austenita en el AISI 1045, y por ferrita dendrítica, ferrita lathy y austenita en el AISI 316L, con un modo de solidificación ferrita–austenita (FA).

A 1 200 r/min, en el AISI 1045 se observa una estructura de ferrita con formación de austenita dendrítica y austenita en los límites de grano de la ferrita, mientras que en el AISI 316L predomina la fase austenítica con una franja de ferrita; en ambos casos, la solidificación sigue el modo ferrita–austenita (FA).

La unión de la tubería disímil AISI 1045 – AISI 316L requiere una temperatura de fricción entre 780 y 738 °C; en correspondencia con este intervalo, la dureza fluctúa entre 250 y 236,5 HV, en función de los números de revoluciones empleados.

Referencias bibliográficas

Arun, P., Yadhu, V., & Sanalkumar, C. (2017). To design and construct a friction welding attachment on lathe, conduct experiment and to study about mechanical behavior of friction welded joints of aluminum rods. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6, 150-158. (IJERT). <https://doi.org/10.17577/ijertv6is070113>

- Castro, J., Espinel, F., & Castro-Verdezoto, P. (2025). Análisis Comparativo en los Procesos de Soldadura en la Industria Naval: Caso Experimental de Soldadura por Arco Eléctrico SMAW, GMAW, GTAW y FCAW. *Revista Digital Científica Causalidad (caui3)*, 1(1), 12-39. <https://doi.org/10.70929/caui3.v1i1.1zazzp73>
- Cordero, G., Rodríguez, R., & Piña, L. (2012). Determinación del tiempo en la etapa de calentamiento para obtener la unión de un aluminio AA6063 soldado por fricción. *Revista Digital de Investigación y Postgrado*, 2(4), 347-362. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4208380>
- Dellepiane, M., Da Silva, L., & Toumpis, A. (2025). Design and development of a bespoke rotary friction welding machine in exploration of joining dissimilar materials for nuclear applications. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(1), 27. <https://doi.org/10.3390/jmmp9010027>
- Elmi Hosseini, S.R., Fernandes, F.A., Pereira, A.B., & Li, Z. (2022). Welding of dissimilar materials in aerospace systems. In *Materials, structures and manufacturing for aircraft* (pp. 317-344). Cham: Springer International Publishing. https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-91873-6_13
- Farbakhti, M., Hosseini, S.R.E., Mohammadi, S.A.M., Sadatabhari, S., Yuan-Ming, H., & Li, R. (2025). Similar and dissimilar rotary friction welding of steels: A review of microstructural evolution and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 8777-8803. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.079>
- Fernández-Columbié, T., Suárez-Torres, L., Rodríguez-González, I., & Rodríguez-Piñeiro, A.J. (2024). Determinar microestructuras en interfase y propiedades mecánicas de soldadura por explosión de acero inoxidable al carbono. *Ingeniería Mecánica*, 27(2), 26-33. <https://www.redalyc.org/journal/2251/225180453004/225180453004.pdf>
- Galindo, R.S., Rentería, M.G., & Hernández, V.L.C. (2026). Metalurgia de las uniones disímiles entre aceros inoxidables. *Cienciacierta*, 22(87), 116-128. <https://doi.org/10.68038/7f5e0297>

- Guzmán-Romero, E.E., Fernández-Columbié, T., Alcántara-Borges, D., & Rodríguez-González, I. (2017). Efecto de la velocidad angular y la presión en el proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754. *Minería y Geología*, 33(3), 312-325. <https://www.redalyc.org/journal/2235/223551846005/>
- Haider, S.F., Khan, S.A., Shah, A., Bashir, M. N., Mansoor, A., Hussain, A., Mahmood Ali, M. & Nisar, S. (2026). Estudio termomecánico mediante el método de elementos finitos de los efectos de los parámetros de la soldadura SMAW en uniones de aceros disímiles S355J2+ N/ASTM A572 Gr. 50. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (30), 30-55. <https://doi.org/10.36561/ING.30.4>
- Kimura, M., Inoue, H., Kusaka, M., Kaizu, K., & Fuji, A. (2010). Analysis method of friction torque and weld interface temperature during friction process of steel friction welding. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 4(3), 401-413. <https://doi.org/10.1299/jmmp.4.401>
- Koteswara, P., Mohan, V., Surya, N., & Prasad, S.K. (2017). Effect of speed on hardness in rotary friction welding process. *International Journal of Materials Science*, 12(4), 635-41. https://www.ripublication.com/ijoms17/ijomsv12n4_12.pdf
- López Escobar, I.P., Ortiz-Méndez, T.M., & Cruz-Crespo, A. (2022). Desarrollo de un equipo de ensayo microabrasivo con esfera rotativa libre para la evaluación de depósitos de recargue. *Centro Azúcar Journal*, 49(4), 80-90. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/728
- López, R.O., Corrales, H.A., & Parra, H. (2007). Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disímiles. *Scientia et technica*, 13(34), 273-278. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934046>
- Mercan, S., Aydin, S., & Özdemir, N. (2015). Effect of welding parameters on the fatigue properties of dissimilar AISI 2205-AISI 1020 joined by friction welding. *International Journal of Fatigue*, 81, 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.023>

- Ravi, S., & Ramadoss, R. (2015). A Study on Mechanical and Metallurgical Properties of Friction Welded Dissimilar Materials. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 3(II), 32-38. <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=2745>
- Requelme Vega, J.U., Barreno Flores, C.F., & Morales Tamayo, Y. (2025). Soldadura de Alta resistencia, Desafíos y Avances en Materiales y Procesos. *Revista Ingenio Global*, 4(1), 21-36. <https://doi.org/10.62943/rig.v4n1.2025.152>
- Ruiz Pedraza, K.N., & Mosquera Laguna, J. (2026). Transición hacia Procesos de Manufactura Sostenibles: Una Revisión Crítica de la Soldadura por Fricción Frente a los Métodos por Fusión desde la Perspectiva Técnico-Ambiental. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, 6(3), 329-349. <https://doi.org/10.61384/r.c.a..v6i3.2024>
- Salman, N.J. (2026). Revisión metalúrgica de uniones soldadas por fricción de Al-Cu. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-science and engineering*, 70(1), 13-24. <https://doi.org/10.36842/jomase.v70i1.581>
- Sathishkumar, G.B., Sethuraman, P., Chanakyan, C., Sundaraselvan, S., Arockiam, A.J., Alagarsamy, S.V., Elmariung, A., Meignanammoorthy, M., Ravichandran, M., & Jayasathyakawin, S. (2023). Friction welding of similar and dissimilar materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 81, 208-211. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.089>
- Shrikrishna, K.A., Sathiya, P., & Goel, S. (2015). The impact of heat input on the strength, toughness, microhardness, microstructure and corrosion aspects of friction welded duplex stainless steel joints. *Journal of manufacturing processes*, 18, 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.01.004>
- Yurievich Piirainen, V., Suarez-Torres, L., & Fernández-Columbie, T.H. (2026). Three-dimensional thermomechanical analysis of radial friction welding of dissimilar copper-aluminum alloys: finite element modelling and experimental validation. *International Journal of Engineering*, e244736. https://www.ije.ir/article_244736.html

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no poseen intereses financieros, ni relaciones personales que puedan haber influido en los resultados presentados en este artículo.

Contribución de autoría según taxonomía CRediT

Elís Efraín Guzmán Romero: Conceptualización/Investigación/Supervisión/Redacción-borrador original

Ledennis Suárez Torres: Curación de contenidos/Metodología/Validación

Marlon Antonio Leyva Tarafa: Análisis formal de los datos/Visualización/Redacción-revisión y edición