

Unión de riel ferroviario mediante soldadura SMAW utilizando AWS E7018 y AW NIQ MANG como aporte (I)

Martín Dario Castillo Sánchez, Pedro Alcántara Ramírez, María de Jesús Velázquez Vázquez

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco, UPALM, Edificio 2, Primer piso C2101, Academia de Mecánica, Colonia Lindavista, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México, CP. 07380.

Resumen

En este trabajo de investigación se realizó y caracterizó la soldadura de riel de ferrocarril (acero R350HT), mediante la técnica de electrodo revestido (SMAW), se seleccionaron dos electrodos revestidos, AWS E7018 AW NIQ MANG de 3 mm respectivamente. Comúnmente este riel ferroviario se suelda mediante la técnica de aluminotermia, en la literatura abierta se encuentran muy pocos trabajos sobre otras técnicas de soldadura del mismo. Se diseñó y fabricó un tipo de junta en V a 60°, para facilitar la unión y la penetración de la soldadura, se caracterizó la junta utilizando ultrasonido, se examinó la zona de soldadura y zona afectada por el calor (ZAC) mediante microscopía óptica, se midió la dureza HRC y microdureza HV en el material base, soldadura y zona afectada por el calor, se obtuvo una junta homogénea en ambos casos y las pruebas de ultrasonido demuestran que la cantidad de discontinuidades son menores y aceptables de acuerdo con la norma AWS D1.1/D1.1M:2020, se observó que la dureza es constante y muy cercana a la dureza del acero soldado (45 HRC), las fases observadas son consistentes de la soldadura con el acero, se observó cementita y perlita (E7018), en el caso de AW NIQ MANG, se aprecia cementita en matriz perlítica y la formación de carburos en la zona afectada por el calor, en ambos casos se observó que la dureza aumenta, esto como consecuencia de la formación de carburos aportados por ambas aleaciones. La unión soldada requirió el aporte de 1 kilogramo de soldadura en ambos casos y la aplicación requirió de 2 horas en tiempo para ser realizada, con estos datos se demuestra que es posible sustituir la soldadura aluminotérmica con soldadura de electrodo revestido, aunque aún se requieren más pruebas mecánicas que puedan confirmarlo.

Palabras clave: Riel ferroviario, soldadura, zona afectada por el calor, discontinuidad.

Abstract

In this research work, the welding of railway rail (R350HT steel) was carried out and characterized, using the coated electrode technique (SMAW), two coated electrodes were selected, AWS E7018 AW NIQ MANG of 3 mm respectively. This railway rail is commonly welded using the aluminothermal technique; very few works on other welding techniques are found in the open literature. A type of 60° V joint was designed and manufactured to facilitate the union and penetration of the weld, the joint was characterized using ultrasound, the weld zone and heat affected zone (HAZ) were examined using optical microscopy. The HRC hardness and HV microhardness were measured in the base material, weld and heat-affected zone, a homogeneous joint was obtained in both cases and the ultrasound tests show that the number of discontinuities are minor and acceptable according to the AWS D1.1/D1.1M:2020 standard, it was observed that the hardness is constant and very close to the hardness of the welded steel (45 HRC). The observed phases are consistent with the weld with the steel, cementite and perlite were observed (E7018), in the case of AW NIQ MANG, cementite is seen in a perlitic matrix and the formation of carbides in the heat-affected zone. In both cases, it was observed that the hardness increases, this as a consequence of the formation of added carbides for both alloys. The welded joint required the contribution of 1 kilogram of solder in both cases and the application required 2 hours in time to be carried out. These data show that it is possible to replace aluminothermic welding with covered electrode welding, although more is still required mechanical tests that can confirm it.

Keywords: Railway rail, welding, heat affected zone, discontinuity

1. Introducción

Los metales poseen propiedades mecánicas que pueden resistir grandes impactos sin sufrir deformaciones o fracturas en su estructura, pero también se tiene que considerar que hay metales que son tan frágiles que con un poco de calor o un pequeño impacto puede presentar deformaciones o fracturas. En los metales de ingeniería utilizados en procesos de soldadura se considera la resistencia a la compresión, la resistencia a la torsión, la resistencia elástica y la dureza. Las propiedades mecánicas son las que se muestran a través del comportamiento de un metal cuando se aplican fuerzas en uno o varios sentidos de manera permanente o intermitente, se pueden expresar en términos de cantidades, que son valores obtenidos del análisis del esfuerzo aplicado el cual origina una deformación plástica o deformación elástica o ambas manifestadas en un metal y se pueden analizar mediante un ensayo mecánico de laboratorio, para poder realizar estos ensayos es necesario tener una probeta con dimensiones específicas y formas establecidas por normativa y modelo de máquina de ensayo, para posteriormente someter la probeta a las pruebas requeridas. Las propiedades Mecánicas fundamentales son las estáticas, dinámicas y térmicas en los metales para procesos de soldadura.

1.1 Generalidades de los rieles ferroviarios

Los rieles de ferrocarril tienen como objetivo desempeñar funciones de soporte de carga y guía de rodaje sometidos a condiciones estáticas y dinámicas exigentes. Para que un riel desempeñe un servicio de eficiencia dentro de su rango de vida útil debe cumplir las siguientes características. [1]

- Alta resistencia al desgaste.
- Alta resistencia a la compresión.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Alto límite elástico, una alta resistencia a la tracción y elevada dureza.
- Alta resistencia a la rotura.
- Buena soldabilidad.
- Elevada homogeneidad del material en los componentes.
- Buena calidad de la banda de rodadura.

1.2 Antecedentes generales de la soldadura

El proceso de soldadura que se ha utilizado durante muchos años en la unión de rieles ferroviarios, específicamente en líneas del metro o trenes en ciudades y países de todo el mundo, desempeña un papel muy importante en cuanto a la seguridad, calidad, infraestructura y economía para la construcción de los tramos de comunicación donde se utiliza la tecnología de la soldadura. Las juntas soldadas de un riel son las unidades más débiles en la estructura de las vías férreas. Los rieles de ferrocarril se fabrican en varias longitudes. En el pasado, el método más común para unir secciones era mediante pernos, en la vía tradicional con unión atornillada. Hay un movimiento

diferencial de la superficie de rodadura en los extremos del riel que crea condiciones severas de desgaste y rebozado bajo el tráfico de trenes.

Los rieles de ferrocarril se unen mediante soldadura ya que es un proceso confiable, produciendo una unión de calidad por lo que se considera la técnica más común para unir los rieles de vías férreas e incluida una alineación más fácil en el sitio, garantizando los siguientes factores, sencillez, portabilidad y economía, siendo uno de los procesos más utilizados la soldadura por termita o soldadura aluminotérmica.

La soldadura aluminotérmica de rieles se realiza utilizando procedimientos estándar de muy alta confiabilidad, sin embargo, no se puede descartar la existencia de fallas, por lo tanto, este procedimiento se debe seguir estudiando para su optimización y mejora. Antiguamente el proceso para la unión de los rieles de las vías férreas se realizaba mediante atornillado, y debido a las altas exigencias físicas y mecánicas que ejercen las vías al pasar las ruedas del ferrocarril sobre ellas, requería una supervisión rigurosa, y un mantenimiento periódico, ocasionando altos gastos debido a la falla continua de los tornillos y las diferentes deformaciones y fallas en las uniones de los rieles al perder la alineación, ocasionando fracturas, fatiga y fallas prematuras en las vías, así mismo, se consideraba una responsabilidad eminente por parte del área de mantenimiento, ya que era impredecible el momento que los elementos de sujeción fallarían [2, 3]. Se realizaron ensayos para soldar los rieles a través de un molde de hierro fundido que, al enfriarse, lograba la unión de los dos rieles, este proceso resultó muy poco económico y poco amigable para ejecutar el trabajo, sin embargo, el proceso dio inicio al desarrollo de la soldadura de rieles de ferrocarril, y a mediados del siglo XX se inició la fabricación de secciones continuas de rieles, aplicando procesos de soldadura, con ésta práctica se alcanzó a reducir considerablemente los costos de mantenimiento en las vías férreas [2].

El químico Alemán Dr. Goldschmidt a fines del siglo XIX descubrió que el polvo de aluminio y los óxidos metálicos pueden ser provocados por una fuente de calor externa para lograr una reacción exotérmica, después de hacer varias experimentaciones sobre el proceso, patentó en 1895 la reacción llamada reacción de Goldschmidt, en 1899 realizó la primera aplicación industrial para soldar tramos de vías ferroviarias. Degussa®, es una corporación descendiente de la firma Goldschmidt, que permanece hoy en día como uno de los mayores productores de soldadura aluminotérmica [2].

Soldadura SMAW. El proceso de soldadura Shielded Metal Arc Welding y sus siglas en inglés SMAW que significa Soldadura Eléctrica con Electrodo Revestido, fue uno de los primeros procesos en utilizarse por la facilidad de adaptación económica y técnica para utilizar este proceso. El proceso de soldadura SMAW es uno de los procesos por fusión más aplicados en los diversos campos industriales y en áreas metal

mecánicas actuales, por medio de la aplicación de un calor intenso el metal base es fundido con el metal de aporte, logrando un charco de fundición a grandes temperaturas, luego del enfriamiento y la solidificación del metal fundido se obtiene una unión mecánicamente resistente a la tensión y a la ruptura, que es mayor al del metal base, este proceso se logra entre los metales de conveniencia a unir y el electrodo el cual es manipulado por el soldador. En el proceso de soldadura por arco existen varios factores de importancia que el soldador en campo debe considerar para realizar un trabajo de calidad y que la aplicación del proceso cumpla con las características mecánicas requeridas en la industria, el soldador debe tener conocimiento de las características del metal base, del metal de aporte, del voltaje y la corriente adecuados de la maquina soldadora. Para este proceso se toma en cuenta dos tensiones, la primera es la tensión de vacío que se refiere a la tensión sin soldar y la tensión bajo carga, esta se refiere a la tensión cuando se está soldando, estas características se consideran de acuerdo con los materiales y maquina soldadora en específico.

1.3 Soldadura por Termita o Aluminotermia

La soldadura térmica o aluminotérmica, básicamente es un proceso que se utiliza para la fusión de metales, y es usualmente aplicada en los rieles de vías férreas, la temperatura que se requiere para este proceso de soldadura se desarrolla por medio de una mezcla de aluminio en polvo y óxido de hierro, los extremos de la pieza a soldar se construyen inicialmente en un molde de arena o grafito, mientras que la mezcla se vierte en un crisol revestido con refractario, que producen una reacción química exotérmica, que se acciona con polvo de aluminio y óxido de hierro generando un proceso aluminotérmico [2].

La soldadura por termita (Figura 1), es un proceso de soldadura muy utilizado para soldar rieles de vías férreas, es un procedimiento exotérmico, de reducción de óxido de hierro por polvo de aluminio, el calor necesario lo produce la reacción química exotérmica que provoca el óxido de hierro y el aluminio componente de la termita, la mezcla del óxido de hierro y el polvo de aluminio en una proporción 1:3 en peso genera una temperatura aproximada de hasta 3000°C, Se requiere un precalentamiento de la mezcla de termita hasta 1300°C para iniciar la reacción, el aluminio reacciona con el oxígeno, esta es la base de la reacción química de la termita, cuando reacciona con el óxido férrico, el acero puro queda asentado y el óxido de aluminio flota como escoria, esto es debido a que sus densidades son diferentes [4].

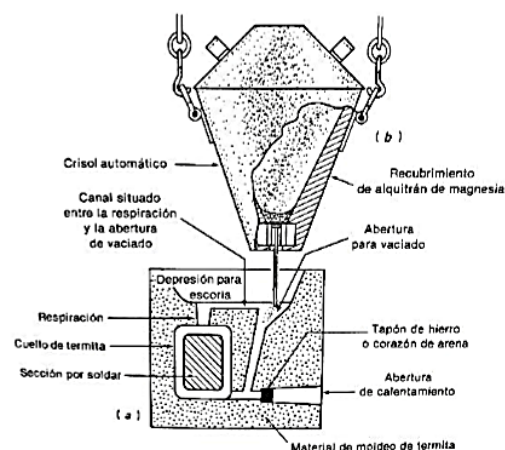


Figura 1. Proceso de soldadura de termita. Fuente Aplicaciones y práctica. Autor Henry Horwitz [3]

1.4 Defectos en soldaduras aluminotérmicas en rieles

Estudios de investigación que ha presentado el Dr. Javier Fava y el Ing. Rodrigo Romero [1] evidencian que generalmente los defectos en las soldaduras que han logrado identificar es por falta de penetración del metal de soldadura entre los extremos de los rieles, falta de fusión entre el metal de soldadura y el metal del extremo del riel, escoria, óxido o arena atrapada (Figura 2 y 3), fisuras en la zona afectada por el calor, fisuras por contracción o fisuración por fatiga. Los defectos de soldadura se pueden originar en la cabeza del riel, alma o patín, y en algunos casos, las fisuras pueden avanzar desde el defecto hacia uno o ambos rieles contiguos [5].



Figura 2. Falla en una soldadura aluminotérmica



Figura 3. Soldadura aluminotérmica mostrando porosidad severa.

Fuente UTN HAEDO Universidad Tecnológica Nacional

1.5 Soldadura SMAW

El proceso de soldadura Shielded Metal Arc Welding y sus siglas en inglés SMAW que significa Soldadura Eléctrica con Electrodo Revestido, fue uno de los primeros procesos en utilizarse por la facilidad de adaptación económica y técnica para utilizar este proceso. El proceso de soldadura SMAW es uno de los procesos por fusión más aplicados en los diversos campos industriales y en áreas metal mecánicas actuales, por medio de la aplicación de un calor intenso el metal base es fundido con el metal de aporte, logrando un charco de fundición a grandes temperaturas, luego del enfriamiento y la solidificación del metal fundido se obtiene una unión mecánicamente resistente a la tensión y a la ruptura, que es mayor al del metal base, este proceso se logra entre los metales de conveniencia a unir y el electrodo el cual es manipulado por el soldador. En el proceso de soldadura por arco existen varios factores de importancia que el soldador en campo debe considerar para realizar un trabajo de calidad y que la aplicación del proceso cumpla con las características mecánicas requeridas en la industria, el soldador debe tener conocimiento de las características del metal base, del metal de aporte, del voltaje y la corriente adecuados de la maquina soldadora. Para este proceso se toma en cuenta dos tensiones, la primera es la tensión de vacío que se refiere a la tensión sin soldar y la tensión bajo carga, esta se refiere a la tensión cuando se está soldando, estas características se consideran de acuerdo con los materiales y maquina soldadora en específico (figura 4).

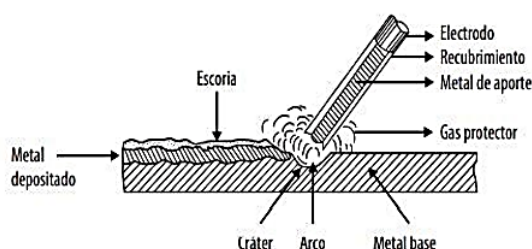


Figura 4. Proceso de soldadura SMAW.
Fuente SIISA grupo Infra®

2. Desarrollo

2.1 Selección del material de aporte

Para la selección adecuada de un electrodo es recomendable que el soldador tenga la pericia y el conocimiento para la interpretación de las propiedades mecánicas del material base y del material de aporte que se utiliza en el proceso de soldadura.

Para la selección adecuada de un electrodo es recomendable que el soldador tenga la pericia y el conocimiento para la interpretación de las propiedades

mecánicas del material base y del material de aporte que se utiliza en el proceso de soldadura.

Para este trabajo de investigación se seleccionan dos electrodos el AWS E 7018 y AW INFRA NIQ MANG®, ambos con un diámetro de 1/8".

Los electrodos AWS E 7018 y AW INFRA NIQ MANG se seleccionan y se utilizan en la experimentación de la unión de dos pares de probetas para observar el comportamiento en el soldeo de un riel ferroviario acero grado R350HT y realizar una inspección superficial (visual) e inspección volumétrica también conocido como PND (Pruebas no destructivas) a través de un test de ultrasonido para analizar posibles discontinuidades en la soldadura, se realizan PD (Pruebas destructivas), test de dureza en la soldadura, así como el análisis del costos de material, tiempo mano de obra, calidad, propiedades mecánicas y reducción de tiempos comparado con el proceso de soldadura aluminotérmica (Tabla 1, 2).

Tabla 1. Propiedades Mecánicas del Electrodo AWS E7018

Propiedades mecánicas del electrodo AWS E7018	
Resistencia a al tensión	490 MPa (70 000 psi)
Límite elástico	390 MPa (57 000 psi)
Elongación en 50.8 mm (2")	22%

Tabla 2. Composición química del Electrodo AWS E7018

Composición química bajo normatividad AWS	
Carbono	0.12 % Máximo
Manganeso	0.90 % Máximo
Silicio	0.80 % Máximo
Fósforo	0.03 % Máximo
Azufre	0.03 % Máximo
Molibdeno	0.40 – 0.65 % Máximo

2.2 Electrodo AW NIQ MANG

El electrodo INFRA AW NIQ MANG® es austenítico con un recubrimiento mineral de fácil aplicación, arco suave y versátil como unión o revestimiento en piezas de acero al manganeso, al alto carbono o de baja aleación y aceros inoxidable [6]. Este electrodo se utiliza con corriente directa electrodo positivo (CDPI), se emplea como base en materiales fatigados para después colocar un colchón elástico, reparación de cruces, agujas y sapos de ferrocarril, aceros herramienta, etc., endurece por impacto y presión (Tablas 3, 4).

Tabla 3. Propiedades Mecánicas del Material depositado

Propiedades mecánicas del material depositado, electrodo INFRA AW NIQ MANG®		
Dureza depósito electrodo Ø1/8"	(0.125mm)	85.8 HRB
Dureza depósito electrodo Ø5/32"	(3.969mm)	86.2 HRB

Tabla 4. Composición química del Electrodo INFRA® AW NIQ MANG

Composición química típica del metal depositado, electrodo INFRA AW NIQ MANG®	
Carbono	0.11% Máximo
Manganeso	6.67% Máximo
Cromo	19.00% Máximo
Níquel	7.50% Máximo

2.3 Temperatura de precalentamiento

La temperatura de precalentamiento tiene variables de acuerdo con el tamaño, forma y características del material base. Cuando se utiliza un electrodo de acero común el precalentamiento oscila en un rango de variable térmica de 177° C (350°F) hasta 370° C (700°F). Para electrodos de bajo hidrogeno es posible aplicar una temperatura de precalentamiento de 149°C (300°F). Para calcular el precalentamiento se toma como dato el espesor del hongo o cabeza del riel que es la parte con el espesor más grande. Se determina el equivalente químico en carbono del acero [7]

$$[C]c = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{[Cr + Mo + V]}{10}$$

$$[C]c = 0.82 + \frac{1.25}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{[0.15 + Mo + 0.03]}{10}$$

$$[C]c = 0.9\%$$

Se determina el equivalente de carbono para el espesor del material base.

S=Espesor del material base en milímetros (mm).

$$[C]t = [1 + 0.005(S)]$$

$$[C]t = [1 + 0.005(30)]$$

$$[C]t = 1.15\%$$

Se determina el equivalente total de carbono.

$$[C]T = [C]c[C]t$$

$$[C]T = (0.9)(1.15)$$

$$[C]T = 1.035\%$$

Cálculo de la temperatura de precalentamiento del riel acero grado R350HT.

$$T = 630 (\sqrt{[C]T - 0.25} + 32)$$

$$T = 630 (\sqrt{1.035 - 0.25} + 32)$$

$$T = 630 \sqrt{0.785} + 32$$

$$T = 630 (0.886) + 32$$

$$T = 558.18 + 32$$

$$T = 590.18^\circ F = 310^\circ C$$

Diseño de la Junta Bisel en V a 60 grados.

En la figura 5, se muestra el diseño de junta utilizado para aplicar la soldadura [8].

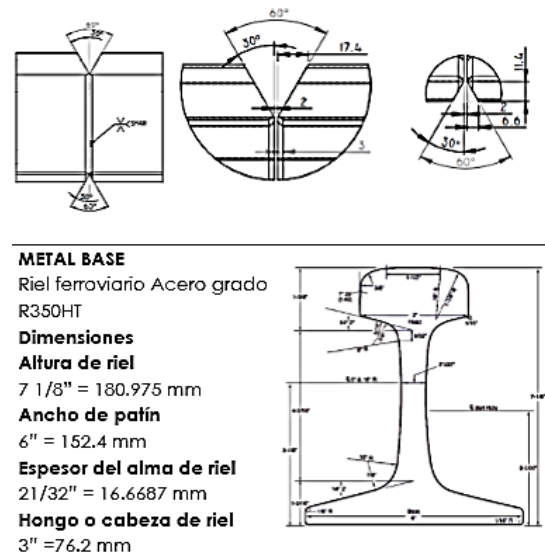


Figura 5. Diseño de junta para soldadura de riel ferroviario.

2.4 Especificaciones de soldadura AWS E7018

Especificaciones de soldadura AWS E7018, probeta (A).

Proceso de Soldadura. SMAW

NCMT-2-04-001/04 CMT.

Tipo de corriente. Corriente directa Polaridad electrodo al positivo + (polaridad invertida) CDPI. Rango de voltaje primario 127-220-440 V.CA. Según características de la máquina de soldar.

Rango de amperaje. De 98-145 Amperes.

Precalentamiento 310 °C, Temperatura entre pases Mínima N/A°C - máxima N/A

Método de precalentamiento. Llama con antorcha de gas.



Figura 6. Pasadas de soldadura y esmerilado en probetas.

2.5 Especificaciones de soldadura AW NIQ MAG en probeta (b).

Características eléctricas

Tipo de corriente. Corriente directa, Polaridad electrodo al positivo + (polaridad invertida) CDPI. Rango de voltaje primario 127-220-440 V.CA. Según características de la máquina de soldar. Rango de amperaje. 90-130 Amperes.

Precalentamiento 310 °C, Temperatura entre pases mínima N/A°C - Máxima N/A Método de precalentamiento. Llama con antorcha de gas.



Figura 7. Pasadas de soldadura y esmerilado en probetas.

2.6 Pruebas no destructivas (PND) de ultrasonido (UT) en soldadura

Equipo utilizado en el ensayo de UT en el proceso de experimentación.

Especificaciones: Equipo Ultrasonido Industrial para medición de espesores y detección de fallas. Marca General Electric® Modelo USM Go+ Tamaño de

Pantalla 5 pulgadas diagonal, Rango de Conectores 14,016 mm para onda longitudinal en acero. Velocidad del Sonido: De 1000 a 16000 m/s Configuraciones AWS, DAC, DGS, PRF, etc. (Figura 8).

Pulsador Pico, onda cuadrada Voltaje del Pulsador Onda cuadrada 120 a 300 V con pasos de 10V, tolerancia 10%, Temperatura de operación 0 a 55° C (32 a 131° F) [9].



Figura 8. Equipo de medición de espesores y detección de fallas por UT. Fuente del autor.

Tabla 5. Especificaciones de aplicación prueba de ultrasonido

Especificaciones	
Equipo	Ultrasonido Industrial para medición de espesores y detección de fallas
Marca	General Electric® USM Go+
Modelo Tamaño de la pantalla	5 pulgadas diagonal
Rango de Conectores	14.016 mm para onda longitudinal en acero
Velocidad del sonido	De 1000 a 16000 m/s
Configuraciones	AWS, DAC, DGS, PRF, etc.
Pulsador	Pico, onda cuadrada
Voltaje del pulsador	Onda cuadrada 120 a 300 V con pasos de 10V, tolerancia 10%
Temperatura de operación	0 a 55°C (32 a 131 °F)

Transductor o palpador utilizado en el ensayo de UT en el proceso de experimentación.

Especificaciones Equipo Transductor de haz recto Frecuencia 1.0 MHZ Diámetro 0.750" - 19.05mm Rango de temperatura 10-160F -12-70C Conector Micro Dot en ángulo recto (figura 9, tabla 6).



Figura 9. Transductor o palpador recto para equipo de ensayos de UT

Tabla 6. Especificaciones uso de transductor

Especificaciones	
Equipo	Transductor de haz recto
Frecuencia	1.0 MHZ
Diámetro	0.750 – 19.05mm
Rango de temperatura	10 – 160°F, -12 – 70 °C
Conector	Micro Dot en ángulo recto

Valores de Calibración del Equipo de UT para ensayo en probetas

Valores de Calibración del Equipo Ganancia 02-46.8 dB Inicio PTA.A 20.00mm Reflexión 1 25.40mm Referencia 2 101.60mm Distancia 25.50mm (figura 10, Tabla 7).

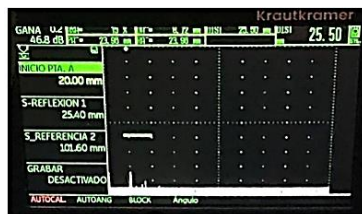


Figura 10. Parámetros de Calibración del Equipo de Ultrasonido

Tabla 7. Valores de calibración del equipo ultrasonido

Valores de calibración del equipo	
Ganancia	02-46.8.dB
Inicio PTA.A	20.00mm
Reflexión 1	25.40mm
Referencia 2	101.60mm
Distancia	25.50mm

Solución para el ataque químico

Ácido pícrico 4 g Alcohol etílico 100 ml.

Revelar límites de grano de austenita en estructuras martensíticas. Ennegrecer perlita. Ácido pícrico 4 g Alcohol etílico 100 ml.

Revelar límites de grano de austenita en estructuras martensíticas.

Ennegrecer perlita NITAL 2% Ácido nítrico 2ml, Alcohol etílico 110 ml. Realzar la interfaz entre los carburos y la matriz. Ennegrecer perlita.

En la figura 11 y 12 se observa la probeta de unión soldada después del ataque químico [10].



Figura 11. Muestra de soldadura E7018 después del ataque químico. Fuente del Autor

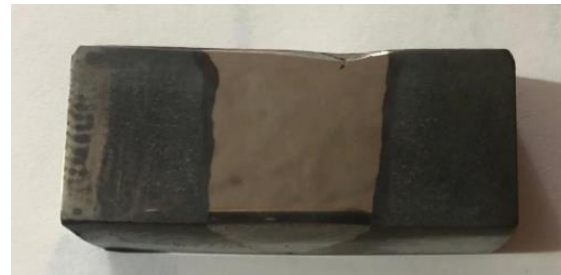


Figura 12. Muestra de soldadura NIQ MANG después del ataque químico.

2.7 Medición de la dureza

Durómetro

En la experimentación, para la medición de la dureza Rockwell se utilizó el durómetro mostrado en la figura 13.



Figura 13. Durómetro Mitutoyo AR-20®

Ensayo de dureza Vickers

El ensayo de Dureza Vickers (HV) se realizó en las probetas de soldadura A E 7018 y B NIQ MANG específicamente en material base, la zona afectada por el calor (ZAC) y la soldadura y por medio de los valores obtenidos en el ensayo se realizó un análisis de

varianza y se graficó el comportamiento de la dureza en las probetas.

El micro durómetro (Figura 14) que se utilizó para los ensayos de HV es una Micro Leco serie LM 700® especial para pruebas de dureza por microindentación.



Figura 14. Micro Leco LM 700®

2.8 Observación microscópica

El procedimiento para la observación se realizó a través de un microscopio metalúrgico LEICA DMLM® su sistema es de diseño modular el cual puede utilizarse en actividades de investigación, en ramo de ciencia de los materiales. La muestra de soldadura se colocó en el microscopio de manera perpendicular a la lente óptica, donde se pudo apreciar la microestructura de las muestras de soldadura. Si se examina con un aumento a X100 se observa claramente la fase de perlita (Figura 15).



Figura 15. Microscopio metalúrgico LEICA DMLM®

2.9 Resultados

2.9.1 Resultados PND por UT en la probeta A E-7018

En el ensayo de UT en la probeta (A) del riel ferroviario de acero grado R350HT en la cual se aplicó el proceso de soldadura SMAW con electrodo revestido AWS E 7018, se logró detectar tres discontinuidades en la cabeza u hongo del riel y una discontinuidad en el patín del riel, las cuales según la norma D1.1/D1.1M:2020 son aceptables y se clasifican de clase D y se indican a continuación en la figura 16 y Tabla 8.



Figura 16. Detección de discontinuidades

Tabla 8. Resultados de discontinuidades de soldadura detectadas en el ensayo de UT en probeta A, AWS E7018.

No.	Distancia	Clase
1	17.24 mm	D
2	14.62 mm	D
3	13.41 mm	D
4	13.75 mm	D
Norma D1.1/D1.1 M:2020		

2.9.2 Resultados PND por UT en la probeta B NIQ MANG

El ensayo de UT en la probeta (B) del riel ferroviario de acero grado R350HT en la cual se aplicó el proceso de soldadura SMAW con electrodo revestido AW INFRA NIQ MANG se lograron detectar tres discontinuidades en la cabeza u hongo del riel y una discontinuidad en el patín del riel. De las tres discontinuidades detectadas por ensayo de UT en la cabeza u hongo del riel se halló una discontinuidad de Clase C según la norma D1.1/D1.1M:2020. En la soldadura del patín del riel se detectó una porosidad de manera visual la cual se considera fuera de rango (Figura 17, Tabla 9) [11].



Figura 17. Discontinuidades detectadas

Tabla 9. Resultados de discontinuidades de soldadura detectadas en el ensayo de UT en probeta B, AW INFRA NIQ MANG.

No.	Distancia	Clase
1	12.52 mm	D
2	15.78 mm	D
3	30.26 mm	C
4	13.03 mm	D
Norma D1.1/D1.1 M:2020		

2.9.3 Análisis de durezas HRC en probeta A AWS E 7018.

En la gráfica de la figura 18 se muestran los resultados y el comportamiento de los análisis de Durezas HRC de la muestra A E7018.

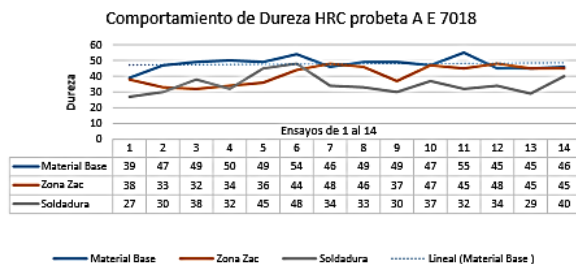


Figura 18. Grafica de Durezas HRC E7018

2.9.4 Análisis de durezas HRC en probeta B AW NIQ MANG.

En la gráfica de la figura 19 se muestran los resultados y el comportamiento de los análisis de Durezas HRC de la muestra B NIQ MANG.

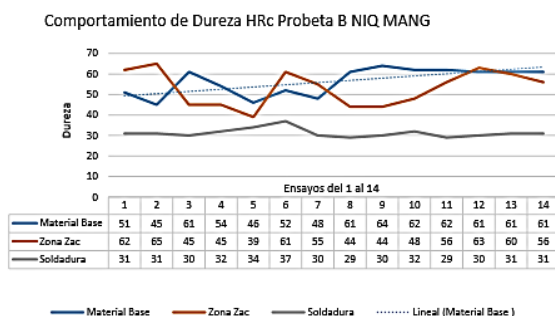


Figura 19. Grafica Durezas HRC NIQ MANG

2.9.5 Análisis de durezas HV en probeta A AWSE 7018

En la gráfica de la figura 20 se muestran los resultados y el comportamiento de los análisis de Dureza HV de la muestra A E 7018.

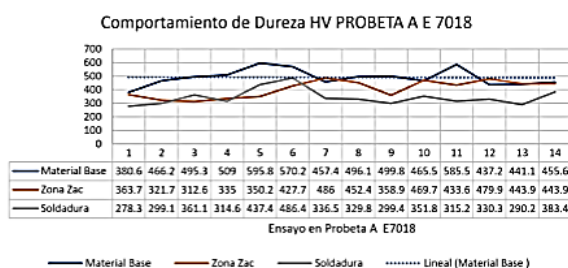


Figura 20. Grafica de Durezas HV E 7018

2.9.6 Análisis de durezas HV en probeta B AW NIQ MANG.

En la gráfica de la figura 21 se muestran los resultados y el comportamiento de los análisis de Dureza HV de la muestra B NIQ MANG.

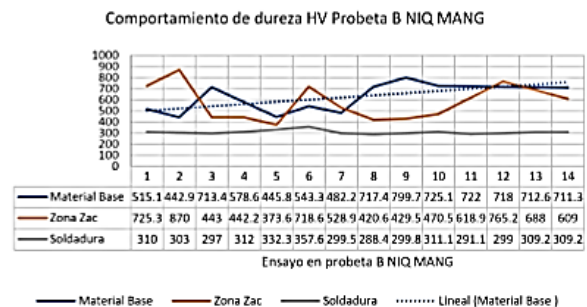


Figura 21. Grafica de Durezas HV E NIQ MANG

2.9.7 Metalografía

Las metalografías observadas de las muestras de soldadura de unión a tope y con una preparación biselada de 30° en acero R350HT y material de aporte AW E 7018 y NIQ MANG.

La zona de observación microscópica se realizó en la zona del material base, en la ZAC, soldadura.

2.9.8 Metalografías de muestra de soldadura E-7018.

En las figuras 22-24, se observan las fases formadas en la zona de soldadura y la zona afectada por el calor.



Figura 22. Metalografía tomada del metal base que muestra Cementita en un acero hipereutectoide que se calentó y láminas de perlit. El calentamiento posterior permitió que el material minimizara su estado energético. Ataque químico nital al 2%. Aumento original X100.

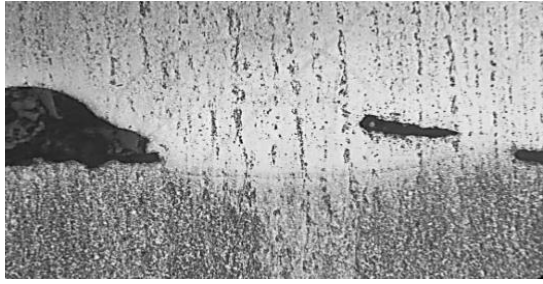


Figura 23. Metalografía tomada en la zona del límite entre la soldadura y la ZAC, con material de aporte AWS E-7018. Ataque químico nital al 2%. Aumento original X100, en la parte superior se observa la soldadura con poros producidos por escoria o burbujas de gas en la técnica de aplicación y en la parte inferior el material base.

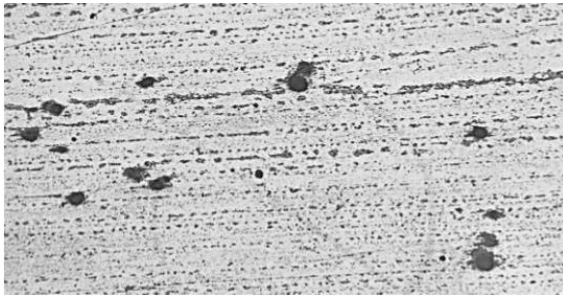


Figura 24. Metalografía tomada en la zona de la soldadura con material de aporte AWS E-7018. Ataque químico nital al 2%. Aumento original X100, en la parte superior se observa la soldadura con posibles incrustaciones de escoria o carburos [12].

2.9.10 Metalografías de muestra de soldadura NIQ MANG.

En las figuras 25-27, se observan las fases formadas en la zona de soldadura y la zona afectada por el calor.



Figura 25. Metalografía tomada del metal base de la muestra AW NIQ MANG, se aprecia cementita en un acero hipereutectoide que se calentó, en matriz perlítica. Ataque químico, nital al 2%. Aumento original X100.

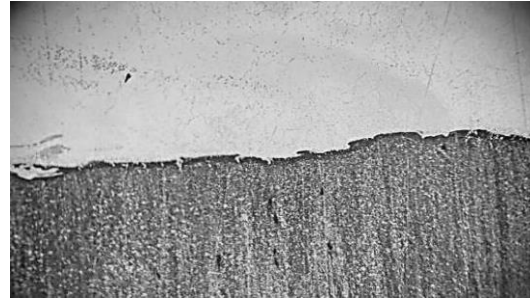


Figura 26. Metalografía tomada en la zona del límite entre la soldadura y la ZAC, con material de aporte AW NIQ MANG. Atacado con nital al 2%. Aumento original X100, en la parte superior se observa la soldadura y en la parte inferior la ZAC.

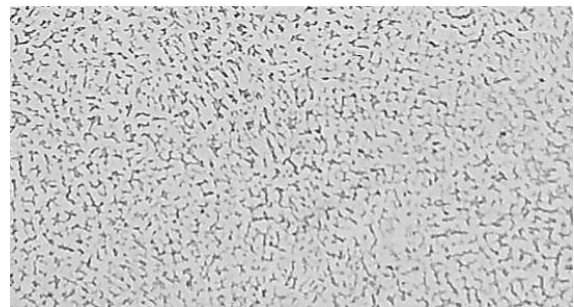


Figura 27. Metalografía tomada en la zona de soldadura con material de aporte AW NIQ MANG. Ataque químico nital al 2%. Aumento original X100, se observa matriz metálica (alta velocidad de enfriamiento), ferrita y perlita en forma de láminas finas [13].

2.10 Conclusiones

La soldadura AWS E 7018 y AW NIQ MANG ambas presentaron pocas discontinuidades, la soldadura es aceptable de acuerdo con el END por UT.

Los Resultados de Microdureza en la soldadura AWS E 7018 mantienen un rango aproximado a la dureza metal base y la ZAC.

Los resultados de Microdureza en la soldadura AW NIQ MANG mantiene un rango de aproximadamente 15% menor de la dureza del metal base y la ZAC.

Las metalografías obtenidas permiten observar una matriz metálica (alta velocidad de enfriamiento), ferrita y perlita en forma de láminas finas, se observa que la soldadura tuvo una buena fusión entre material base y material de aporte, se observaron incrustaciones de escoria y carburos.

2.11. Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto politécnico Nacional, a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica

y Eléctrica el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo de investigación.

3. Referencias

[1] Dr. Javier Fava, Ing. Rodrigo Romero, Defectos en rieles y elementos para su inspección no destructiva, UTN HAEDO Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires Argentina, 2002.

[2] Yasmani Arceo Moré y Reinier Méndez Rodríguez. “Soldadura de carriles de vías férreas, empleando el proceso de soldadura por termita” tesis Centro de Investigaciones de Soldadura, Las villas, Cuba. 2008.

[3] Henry Horwitz, Soldadura Aplicaciones y práctica, primera edición, Boston, Massachusetts. E.U.A, Editorial Alfaomega, 1990, pp. 213.

[4] Orlov La soldadura aluminotérmica de rieles en los ferrocarriles domésticos S E 2016, Put' i putevovozhajtvo pp. 26-28.

[5] Dr. Javier Fava, Ing. Rodrigo Romero, Defectos en rieles y elementos para su inspección no destructiva, Universidad Tecnológica Nacional, Taedo, 2022.

[6] Electrodo INFRA, Manual de Electrodo para soldar, segunda edición. Certificado No. 31943 Tultitlan Estado de México 2009.

[7] Samuel Felipe Ayala Valencia, Ricardo Antonio Vergara Puella, Juan Felipe Santa Marín, Alejandro Toro. Efecto de los cambios microestructurales asociados a los procesos de soldadura sobre la falla de un riel ferroviario, XI CIM Congreso Internacional de Materiales 2022, Santa Martha Colombia.

[8] Geometría de las juntas de soldadura y simbología de soldadura, Standard Welding Terms and Definitions, NSI/AWS A3.0, 1994.

[9] Norma N CMT-2-04-001/04 SCT, CMT características de los materiales, parte 2. Materiales para estructuras título 04. Soldadura capítulo: 001 soldadura al arco eléctrico. México 2004.

[10] Linnert GE, Welding Metallurgy, Carbón and alloy steels volume 2 Technology of American Welding Society, USA.

[11] Mouallif, A. Chouaf, A. Elamri, A. Benali, Estudio del comportamiento mecánico de los rieles soldados por aluminotermia, VI Jornadas Técnicas de Estudio 2010, Marrakech, Marruecos, 2010

[12] Jezzini-Aouad, P. Flahaut, S. Hariri, D. Zakrzewski y L. Winia “Mejora del rendimiento de

fatiga de las soldaduras aluminotérmicas en rieles” Mecánica Aplicada y Materiales, Avances en Mecánica Experimental VII, 2010, Suiza, Switzerland, pp.305-310.

[13] Mansouri, H.; Monshi, H. Microestructura y variaciones de tensiones residuales en la zona de soldadura de vías férreas soldadas a tope. Ciencia y Tecnología de la Soldadura y Unión. 2004. vol. 9, núm. 3, pág. 237 – 245.