CARACTERIZACIÓN DE UNA JUNTA SOLDADA SMAW EN UN ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36 CON Y SIN PWHT



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

LUZ DAYANA PALACIOS MONTAÑO

UNVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN MECÁNICA INDUSTRIAL

BOGOTÁ

2026

RESUMEN 16
ABSTRACT 17
INTRODUCCIÓN 18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 19
2. JUSTIFICACIÓN 19
3. Objetivos 20
3.1. Objetivo General 20
3.2. Objetivos Específicos 21
4. Marco Referencial 21
4.1. Marco Conceptual 21
4.1.1. Fundamentos de la soldadura por arco metálico revestido (SMAW) 21
4.1.2. Propiedades y aplicaciones del acero ASTM A36 22
4.1.3. Norma AWS D1.1: Requisitos para soldadura estructural 24
4.1.4. Tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) 25
4.1.5. Caracterización microestructural 26
4.1.6. Ensayos de Microdureza Vickers (HV) en Uniones Soldadas 27
4.2. Marco Teórico 29
4.2.1. Transformaciones de fase y ciclos térmicos en el acero A36 29
4.2.2. Metalurgia de la zona afectada por el calor (ZAC) 31
4.2.3. Alivio de tensiones mediante PWHT 33
4.2.4. Proceso Industrial y Ciclo Térmico del PWHT 35
4.3. Estado del Arte 38
5. desarrollo DEL PROYECTO 41

5.1. Elaboración de un WPS para la soldadura SMAW en acero A36 41
5.2. Fase de fabricación 44
5.2.1. Preparación del material base 45
5.2.2. Armado de la junta 46
5.2.3. Ejecución del proceso de soldadura SMAW 49
5.3. Inspección y Ensayos No Destructivos (END) de la junta soldada 52
5.3.1. Inspección por Tintas Penetrantes (PT) 52
5.3.2. Inspección Visual según norma AWS D1.1 59
5.3.3. Ultrasonido 63
5.3.4. Ejecución del Ensayo y Análisis de Señales 66
5.3.5. Aplicación del optocoplante y Escaneo (Figura 32) 66
5.3.6. Interpretación de las Ondas 67
5.4. PREPARACIÓN DE PROBETAS 69
5.4.1. Preparación metalográfica. 71
5.4.2. Sistema de esmerilado y pulido Metkon Forcipol 2V 73
5.4.3. Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura (PWHT) 76
5.5. Selección de Muestras y Análisis Microestructural 81
5.5.1. Estereomicroscopio ZEISS 81
5.5.2. Micrografía de la Muestra pulida sin PWHT sin Ataque químico 82
5.5.3. Micrografía de la Muestra pulida con PWHT sin Ataque químico 84
5.6. Procedimiento de Ataque Químico con Nital 5% para Caracterización Metalográfica 86
5.6.1. Preparación del Reactivo Químico (Nital 5%) 86
5.6.2. Procedimiento Experimental de Ataque Químico 88

5.6.3. Análisis Microestructural con Microscopio Metalográfico Invertido ZEISS 88

5.7. Análisis Microestructural de la Probeta con Tratamiento Térmico (PWHT) 91

5.7.1. Zona del Material base 92

5.7.2. Zona de raíz 97

5.7.3. Zona de relleno de soldadura.....103

5.7.4. Zona ZAC derecha 109

5.7.5. Zona ZAC izquierda 116

5.7.6. Macrofotografía en Estereomicroscopio de la Superficie de la Junta Soldada con PWHT. 121

5.8. Análisis Microestructural de la Probeta sin Tratamiento Térmico (PWHT) 123

5.8.1. Zona del Material base 123

5.8.2. Zona de raíz 129

5.8.3. Zona de relleno de soldadura.....136

5.8.4. Zona ZAC derecha 140

5.8.5. Zona ZAC izquierda 146

5.8.6. Macrofotografía en Estereomicroscopio de la Superficie de la Junta Soldada sin PWHT. 152

5.9. Ensayos de Microdureza Vickers ($\boldsymbol{HV0.2}$) en las Juntas Soldadas con y sin PWHT 158

5.9.1. Equipo para Ensayos de Microdureza: Microdurómetro Shimadzu HMV 158

5.9.2. Parámetros del Ensayo de Microdureza Vickers.....160

5.9.3. Perfil de Microdureza en la Junta Soldada Sin PWHT 162

5.9.4. Perfil de Microdureza en la Junta Soldada Con PWHT 164
6. Comparación de los resultados de la microestructura y MICROdureza de las probetas para evaluar el impacto del tratamiento térmico. 166
6.1. Análisis Comparativo del Perfil de Microdureza.....167
6.1.1. Análisis de la muestra sin PWHT 169
6.1.2. Análisis de la muestra con PWHT 169
6.2. Comparación de valores de MICROdureza 171
6.3. impacto del tratamiento térmico en las propiedades del acero A36.....173
6.3.1. Alivio de Tensiones Residuales e Integridad Estructural.....174
6.3.2. Homogenización de la Microdureza y Tenacidad.....174
6.3.3. Modificación Microestructural y Resistencia Mecánica 174
6.4. Discusión de resultados con base en norma AWS D1.1. 175
6.4.1. Evaluación del Perfil de Dureza respecto a Criterios AWS D1.1.....175
CONCLUSIONES 176
Bibliografía.....177

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de transformación por enfriamiento continuo (CCT) para un acero hipoeutectoide.....30
Figura 2. Distribución de temperaturas máximas y subzonas de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la soldadura 32
Figura 3. Macrografía de la sección transversal de la junta soldada indicando la región fundida, línea de fusión y Zona Afectada por el Calor (ZAC).....34
Figura 4. Perfil de dureza transversal y correlación microestructural en un acero ASTM A36 soldado mediante SMAW 36
Figura 5. Detalles de la junta (bosquejo) (WPS).....41
Figura 6. Esquema de distribución de probetas según la norma AWS D1.1. 44
Figura 7. Vista superior de las placas preparadas.....45
Figura 8. Placas de acero A36 con bordes esmerilados y biselados.....46
Figura 9. Verificación de la abertura de raíz 47
Figura 10. Ensamble final de la junta.....48
Figura 11. Aplicación del primer pase (raíz) mediante el proceso SMAW. 49
Figura 12. Aplicación del segundo pase (relleno) mediante el proceso SMAW. 50
Figura 13. Vista trasera de la probeta soldada mediante el proceso SMAW. 50
Figura 14, Aplicación del último pase (acabado) mediante el proceso SMAW. 51
Figura 15. Kit Met-L-Chek para tintas penetrantes. 53
Figura 16. Limpieza de la placa con el limpiador E-59A. 53
Figura 17. Limpiador E-59A. 54
Figura 18. Aplicación del penetrante VP-31A. 55
Figura 19. Penetrante VP-31A.....55
Figura 20. Remoción de exceso de penetrante. 56
Figura 21. Revelador D-70.....57
Figura 22. Aplicación del revelador D-70. 57
Figura 23. Capa blanca del revelador posterior a 10 minutos de aplicación. 58

Figura 24. Posterior remoción del revelador. 59
Figura 25. Kit de galgas para inspección visual de soldadura. 60
Figura 26. Galga de inspección de soldadura D1.1-90. 60
Figura 27. Galga V-WAC. 61
Figura 28. Medición del refuerzo de soldadura. 62
Figura 29. Medición de profundidad de socavaciones. 62
Figura 30. Ultrasonido USM 35X 64
Figura 31. Accesorios y patrones de referencia para el ajuste del detector de fallas. 65
Figura 32. Aplicación del optoacoplante y escaneo. 67
Figura 33. Representación de las ondas de ultrasonido y detección de ecos en la soldadura. 67
Figura 34. Análisis de señales para la localización de discontinuidades internas. 68
Figura 35. Seccionamiento transversal de la placa soldada y obtención de las tres probetas. 70
Figura 36. Probetas transversales definitivas preparadas para los ensayos de caracterización mecánica y microestructural. 71
Figura 37. Probetas soldadas tras la etapa de desbaste graneado, mostrando un acabado superficial uniforme y libre de marcas de corte 72
Figura 38. Sistema de esmerilado y pulido metalográfico Metkon Forcipol 2V. 73
Figura 39. Acabado superficial tipo espejo en las probetas transversales tras el pulido con alúmina. 75
Figura 40. Horno mufla ACEO MF-2003 utilizado para el tratamiento térmico (PWHT). 76
Figura 41. Posicionamiento de la probeta experimental en el centro de la cámara del horno mufla ACEO MF-2003 antes de iniciar el ciclo térmico. 77
Figura 42. Diagrama del ciclo térmico (Rampas, Sostenimiento y Enfriamiento) para el tratamiento PWHT. 80

Figura 43. Estereomicroscopio ZEISS con sistema de iluminación anular LED utilizado para el control de calidad superficial y validación del pulido de las probetas antes del ataque químico. 82
Figura 44. Micrografía general de control de la superficie pulida especular (sin ataque químico) de la probeta en acero ASTM A36 sin PWHT. Se observa la orilla de la muestra en la parte inferior del campo de visión. Aumento: 5X. 83
Figura 45. Vista microscópica adicional de control superficial de la probeta sin ataque químico. Se aprecia el acabado tipo espejo y la dispersión de luz en el borde inferior. Aumento: 5X. 84
Figura 46. Vista estereoscópica de la probeta SMAW en acero ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT) en estado de pulido sin ataque químico. Aumento: 5X. 85
Figura 47. Vista microscópica adicional de control superficial de la probeta sin ataque químico y con PWHT. Aumento: 5X. 86
Figura 48. Disposición de laboratorio para la preparación y manipulación del reactivo Nital al 5% utilizado en el ataque químico metalográfico. 87
Figura 49. Microscopio metalográfico invertido ZEISS utilizado para la caracterización microestructural de las probetas atacadas químicamente con Nital 5%. 89
Figura 50. Posicionamiento de la probeta transversal de acero ASTM A36 sobre la platina del microscopio metalográfico invertido ZEISS para la observación microestructural tras el ataque químico. 90
Figura 51. Sistema digital de imagen acoplado al microscopio metalográfico invertido ZEISS para la observación y captura de micrografías en tiempo real. 91
Figura 52. Micrografía panorámica del Metal Base (MB) en acero ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT) mostrando la matriz ferrítico-perlítica de granos equiaxiales. Aumento: 50X (Escala: 200µm) 93
Figura 53. Micrografía a detalle del Metal Base (MB) en acero ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT) donde se distinguen los límites de grano ferríticos equiaxiales y colonias perlíteras. Aumento: 100X (Escala: 100µm). 94

Figura 54. Micrografía a detalle del Metal Base (MB) con PWHT en acero ASTM A36, donde se distinguen la matriz ferrítica de morfología equiaxial y colonias de perlita intergranulares. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).....95
Figura 55. Micrografía a alta magnificación del Metal Base (MB) con PWHT en acero ASTM A36, donde se observan en detalle los límites de grano ferríticos y las colonias perlíteras de estructura laminar. Aumento: 500X (Escala: 10 µm).....96
Figura 56. Micrografía panorámica de la zona de raíz del cordón de soldadura en la probeta con PWHT, mostrando la refinación microestructural y la interfaz de transición. Aumento: 50X (Escala: 200 µm).....98
Figura 57. Micrografía de la zona de raíz del cordón de soldadura con PWHT, destacando una microestructura refinada de ferrita y perlita fina. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).....99
Figura 58. Micrografía a detalle de la zona de raíz con PWHT, evidenciando una estructura recristalizada y fina de ferrita y perlita. Aumento: 200X (Escala: 50 µm). 100
Figura 59. Micrografía a alta resolución de la zona de raíz con PWHT, mostrando granos ferríticos recristalizados y colonias perlíteras delgadas intergranulares. Aumento: 500X (Escala: 20 µm). 101
Figura 60. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la zona de raíz con PWHT, mostrando granos ferríticos ultrafinos recristalizados y perlita en límites de grano. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm). 102
Figura 61. Micrografía panorámica de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, evidenciando la orientación de los granos de solidificación y redes de ferrita primaria. Aumento: 50X (Escala: 200 µm). 104
Figura 62. Micrografía a 100X de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, mostrando las redes de ferrita de contorno de grano y la matriz intragranular de ferrita acicular. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).....105
Figura 63. Micrografía a detalle de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, resaltando la ferrita acicular intragranular y bandas de ferrita de contorno. Aumento: 200X (Escala: 50 µm). 106

Figura 64. Micrografía a alta resolución de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, donde se aprecian entramados de ferrita acicular y ferrita de contorno de grano. Aumento: 500X (Escala: 20 µm). 107
Figura 65. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, mostrando detalles de la ferrita acicular intragranular e inclusiones esféricas nucleadoras. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm). 108
Figura 66. Micrografía panorámica de la ZAC derecha con PWHT, mostrando la interfaz de fusión entre el metal de soldadura y la zona afectada térmicamente. Aumento: 50X (Escala: 200 µm). 110
Figura 67. Micrografía a 100X de la ZAC derecha con PWHT, resaltando la línea de fusión y la transición hacia la estructura refinada de ferrita y perlita. Aumento: 100X (Escala: 100 µm). 111
Figura 68. Micrografía a detalle de la ZAC derecha con PWHT, mostrando la distribución de ferrita poligonal y perlita fina recristalizada. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).....112
Figura 69. Micrografía a alta magnificación (500X) de la ZAC derecha con PWHT, mostrando una matriz de ferrita poligonal y colonias de perlita fina estabilizadas en los límites de grano. Aumento: 500X (Escala: 20 µm). 114
Figura 70. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la ZAC derecha con PWHT, destacando la definición de límites de grano ferríticos y la dispersión de perlita fina intergranular. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm). 115
Figura 71. Micrografía panorámica de la ZAC izquierda con PWHT, mostrando la estructura homogénea y refinada de ferrita y perlita. Aumento: 50X (Escala: 200 µm).....116
Figura 72. Micrografía a 100X de la ZAC izquierda con PWHT, destacando la estructura homogénea de granos ferríticos finos y perlita bien dispersa. Aumento: 100X (Escala: 100 µm). 117
Figura 73. Micrografía a detalle de la ZAC izquierda con PWHT, evidenciando la estructura de granos equiaxiales de ferrita y perlita fina intergranular. Aumento: 200X (Escala: 50 µm). 119

Figura 74. Micrografía a alta resolución de la ZAC izquierda con PWHT, mostrando granos ferríticos poligonales y colonias perlíteras finas en los bordes intergranulares. Aumento: 500X (Escala: 20 µm). 120
Figura 75. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la ZAC izquierda con PWHT, mostrando la morfología ferrítica fina con perlita fina intergranular. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).....121
Figura 76. Macrofotografía a 8X en estereomicroscopio de la junta soldada con PWHT, mostrando una textura superficial uniforme y sin defectos macroestructurales. Aumento: 8X.....122
Figura 77. Micrografía del Metal Base (MB) de acero ASTM A36 en la probeta sin PWHT atacado con Nital al 5%, mostrando la matriz ferrítico-perlíterica. Aumento: 5X (Escala: 200 µm). 124
Figura 78. Micrografía del Metal Base (MB) de acero ASTM A36 en probeta sin PWHT, destacando las bandas de ferrita y perlita. Aumento: 10X (Escala: 100 µm). 125
Figura 79. Micrografía a detalle a 200X del Metal Base (MB) sin PWHT, mostrando granos ferríticos equiaxiales y bandas perlíteras alineadas. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).....126
Figura 80. Micrografía a alta magnificación (500X) del Metal Base (MB) sin PWHT, evidenciando las fronteras de grano de la ferrita poligonal y la distribución intergranular de la perlita. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).....127
Figura 81. Micrografía a máxima resolución (1000X) del Metal Base (MB) sin PWHT, mostrando granos ferríticos poligonales y colonias de perlita fina. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).....129
Figura 82. Micrografía panorámica a 50X de la zona de la raíz sin PWHT, evidenciando una estructura fina y homogénea recalentada por los pases de soldadura posteriores. Aumento: 50X (Escala: 200 µm).....130
Figura 83. Micrografía a 10X de la zona de la raíz sin PWHT, mostrando el refinamiento de grano ferrítico-perlítero por efecto del recalentamiento de los pases posteriores. Aumento: 10X (Escala: 100 µm). 131

Figura 84. Micrografía a detalle a 200X de la zona de la raíz sin PWHT, evidenciando granos equiaxiales finos de ferrita con perlita intergranular recalentada. Aumento: 200X (Escala: 50 µm). 133
Figura 85. Micrografía a alta magnificación (500X) de la zona de la raíz sin PWHT, evidenciando la nitidez de los bordes intergranulares de la ferrita poligonal y perlita fina. Aumento: 500X (Escala: 20 µm). 134
Figura 86. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la zona de la raíz sin PWHT, mostrando granos ferríticos poligonales fino y perlita intergranular. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).....135
Figura 87. Micrografía a 200X de la zona de relleno (metal de soldadura) sin PWHT, evidenciando red de ferrita primaria y matriz intragranular con ferrita acicular entrelazada. Aumento: 200X (Escala: 50 µm). 137
Figura 88. Micrografía a alta magnificación (500X) de la zona de relleno sin PWHT, evidenciando el entramado de ferrita acicular e islas de ferrita de borde de grano. Aumento: 500X (Escala: 20 µm). 138
Figura 89. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la zona de relleno sin PWHT, mostrando en detalle las agujas entrelazadas de ferrita acicular y ferrita de borde de grano. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm). 139
Figura 90. Micrografía panorámica a 50X de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha sin PWHT, mostrando un marcado refinamiento microestructural. Aumento: 500X / Objetivo 5X (Escala: 200 µm). 141
Figura 91. Micrografía a 100X de la ZAC derecha sin PWHT, evidenciando una estructura de grano fino recristalizada de ferrita y perlita. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).....142
Figura 92. Micrografía a detalle a 200X de la ZAC derecha sin PWHT, evidenciando morfología equiaxial fina de ferrita y distribución uniforme de perlita intergranular. Aumento: 200X (Escala: 50 µm). 143
Figura 93. Micrografía a alta magnificación (500X) de la ZAC derecha sin PWHT, evidenciando los límites intergranulares de la ferrita equiaxial y la perlita fina. Aumento: 500X (Escala: 20 µm). 144

Figura 94. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la ZAC derecha sin PWHT, evidenciando granos equiaxiales finos de ferrita y perlita en bordes intergranulares. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm). 146
Figura 95, Micrografía panorámica a 50X de la ZAC izquierda sin PWHT, evidenciando refinamiento microestructural e isotropía de grano en la subzona recristalizada. Aumento: 50X (Escala: 200 µm). 147
Figura 96. Micrografía a 100X de la ZAC izquierda sin PWHT, evidenciando una estructura fina y recristalizada de ferrita y perlita. Aumento: 100X (Escala: 100 µm). 148
Figura 97. Micrografía a detalle a 200X de la ZAC izquierda sin PWHT, evidenciando morfología de granos equiaxiales de ferrita y perlita intergranular de grano fino. Aumento: 200X (Escala: 50 µm). 149
Figura 98. Micrografía a alta magnificación (500X) de la ZAC izquierda sin PWHT, mostrando detalles de los límites intergranulares de la ferrita y la perlita fina. Aumento: 500X (Escala: 20 µm). 150
Figura 99. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la ZAC izquierda sin PWHT, evidenciando granos equiaxiales de ferrita y perlita en bordes intergranulares. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm). 151
Figura 100. Macrofotografía a 2X en estereomicroscopio de la sección transversal de la junta soldada sin PWHT. Aumento: 2X. 153
Figura 101. Macrofotografía a 2.5X en estereomicroscopio de la junta soldada sin PWHT, evidenciando la estructura macroscópica y patrones de solidificación del cordón. Aumento: 2.5X. 154
Figura 102. Macrofotografía a 2.5X en estereomicroscopio del poro interno en la junta soldada sin PWHT, mostrando en detalle la cavidad. Aumento: 2.5X. 155
Figura 103. Macrofotografía a 5X en estereomicroscopio del poro interno en la junta soldada sin PWHT, mostrando en detalle la cavidad y la morfología del borde del poro. Aumento: 5X. 156
Figura 104. Macrofotografía a 8X en estereomicroscopio del poro interno en la junta soldada sin PWHT. Aumento: 8X.....157

Figura 105. Microdurómetro Shimadzu HMV utilizado para la medición de perfiles de microdureza Vickers (HV) en las uniones soldadas de acero ASTM A36.....159
Figura 106. Posicionamiento de la probeta de ensayo sobre la mesa micrométrica XY del microdurómetro durante la toma del perfil de dureza. 160
Figura 107. Vista a través del ocular micrométrico del microdurómetro Shimadzu HMV 161
Figura 108. Perfil de microdureza Vickers (HV0.2) a lo largo de las distintas zonas de la junta soldada en estado de soldadura (Sin PWHT). 163
Figura 109. Perfil de microdureza Vickers (HV 0.2) a lo largo de las distintas zonas de la junta soldada en estado de soldadura (Sin PWHT). 165
Figura 110. Análisis microestructural comparativo a 1000x entre la condición en estado de soldadura (Sin PWHT) y tras el tratamiento térmico posterior a la soldadura (Con PWHT) en acero ASTM A36. 1000x.....167

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del procedimiento SMAW 42
Tabla 2. Parámetros del ciclo térmico para el tratamiento PWHT.....79
Tabla 3. Valores de microdureza Vickers (HV) obtenidos del microdurometro durante la practica en las diferentes zonas de la junta soldada en estado sin tratamiento térmico posterior a la soldadura (Sin PWHT).....162
Tabla 4. Valores de microdureza Vickers (HV) obtenidos del microdurometro durante la practica en las diferentes zonas de la junta soldada en estado sin tratamiento térmico posterior a la soldadura (Con PWHT). 164
Tabla 5. Comparación entre la probeta tratada térmicamente y la no tratada 168
Tabla 6. Comparación cuantitativa de valores de microdureza Vickers (HV_0.2) en las diferentes zonas de la junta soldada SMAW en acero ASTM A36 antes y después del PWHT. 171
Tabla 7. Valores estadísticos de microdureza Vickers (HV) en las diferentes zonas de la junta soldada ASTM A36 con y sin PWHT. 172

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo caracterizar la microestructura y la microdureza en uniones soldadas de acero estructural ASTM A36 obtenidas mediante el proceso de soldadura SMAW, evaluando el impacto de un Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura (PWHT) ejecutado bajo los lineamientos de la norma AWS D1.1. Para ello, se elaboró la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) y se fabricaron las probetas correspondientes para ser evaluadas en condición sin tratamiento térmico post soldadura (Sin PWHT) y con tratamiento térmico (Con PWHT). La caracterización incluyó ensayos de microdureza Vickers ($HV_{0.2}$) y análisis metalográfico por microscopía óptica a magnificaciones de hasta 1000x tras el ataque con Nital al 5%.

Los resultados mostraron que en la condición Sin PWHT la dureza promedio alcanzó valores de 174.2 HV en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) y 219.4 HV en el pase de relleno, evidenciando a 1000x bordes de grano rígidos y tensionados. Tras la aplicación del PWHT, la microdureza en la ZAC disminuyó un 5.1% (alcanzando 165.4 HV) y en el Material Base un 8.5% (alcanzando 147.2 HV), manteniéndose por debajo del límite crítico normativo de 250 HV. Asimismo, el análisis reflejó una estabilización de la matriz metálica al reducir el coeficiente de variación en el material base de 5.15% a 1.76%.

En conclusión, la aplicación del PWHT conforme a los lineamientos de la AWS D1.1 favoreció la homogeneización de la microestructura. Asimismo, se observó una disminución de la microdureza en el metal base y la ZAC, pasando de 174.2 HV a 165.4 HV en esta última, mientras que el metal de aporte presentó un valor de 239.2 HV después del tratamiento. Estos resultados son acordes con los efectos asociados al tratamiento térmico posterior a la soldadura; sin embargo, las tensiones residuales y la tenacidad de la junta no fueron determinadas directamente en el presente estudio.

Palabras clave: Acero ASTM A36, Tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT), Zona Afectada por el Calor (ZAC), Soldadura SMAW.

ABSTRACT

This research project aimed to characterize the microstructure and microhardness of ASTM A36 structural steel welded joints produced via the SMAW process, evaluating the impact of Post-Weld Heat Treatment (PWHT) performed in accordance with AWS D1.1 standards. To this end, a Welding Procedure Specification (WPS) was developed, and test specimens were fabricated for evaluation in both the as-welded (non-PWHT) and heat-treated (PWHT) conditions. CharacteriZACion involved Vickers microhardness testing ($HV_{0.2}$) and metallographic analysis using optical microscopy at magnifications of up to 1000x following etching with 5% Nital.

Results indicated that in the non-PWHT condition, average hardness reached 174.2 HV in the Heat-Affected Zone (ZAC) and 219.4 HV in the fill pass, with 1000x magnification revealing rigid, stressed grain boundaries.

Following PWHT application, microhardness decreased by 5.1% in the ZAC (reaching 165.4 HV) and by 8.5% in the base metal (reaching 147.2 HV), remaining below the critical standard limit of 250 HV. Furthermore, the analysis showed stabiliZACion of the metal matrix, evidenced by a reduction in the coefficient of variation for the base metal from 5.15% to 1.76%.

In conclusion, the application of PWHT in accordance with AWS D1.1 guidelines promoted microstructural homogeniZACion. Additionally, a decrease in microhardness was observed in the base metal and the ZAC—dropping from 174.2 HV to 165.4 HV in the latter—while the filler metal exhibited a value of 239.2 HV after treatment. These results are consistent with the effects associated with post-weld heat treatment; however, residual stresses and joint toughness were not directly determined in this study.

Keywords: ASTM A36 steel, Post-weld heat treatment (PWHT), Heat-Affected Zone (ZAC), SMAW welding.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería civil y mecánica, la confiabilidad de las conexiones soldadas representa un factor importante para la seguridad de las estructuras metálicas. El proceso de soldadura por arco metálico revestido (SMAW) es ampliamente utilizado en la industria debido a su versatilidad y eficiencia en campo; sin embargo, la aplicación de calor localizado durante el arco eléctrico induce ciclos térmicos que alteran de forma irreversible la microestructura original del material base. En el caso del acero ASTM A36, un material de bajo contenido de carbono con amplia aplicabilidad estructural, estas variaciones térmicas generan una zona afectada por el calor (ZAC) donde pueden aparecer fases metalúrgicas frágiles y tensiones residuales de tracción.

La normativa AWS D1.1 (Structural Welding Code – Steel) establece los lineamientos para garantizar que estas uniones posean las propiedades mecánicas adecuadas. No obstante, en componentes sometidos a cargas de gran espesor, la soldadura por sí sola puede dejar niveles de dureza excesivos que comprometen la ductilidad del conjunto. Aquí es donde el tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) adquiere importancia, ya que actúa como un mecanismo de alivio de esfuerzos y refinamiento microestructural, buscando homogeneizar las propiedades de la junta soldada.

La presente investigación se enfoca en la caracterización comparativa de una unión soldada de acero A36 mediante el proceso SMAW. A través de un análisis de la dureza y una evaluación cualitativa de la microestructura, se pretende determinar la influencia real del PWHT en la mitigación de los efectos térmicos adversos. El desarrollo del trabajo sigue una metodología rigurosa que inicia con la elaboración de una especificación de procedimiento de soldadura (WPS) conforme a la norma AWS D1.1.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La soldadura por arco metálico revestido (SMAW) en acero ASTM A36 induce ciclos térmicos severos que alteran el equilibrio metalúrgico del material. Estas variaciones térmicas generan tensiones residuales de tracción y zonas de dureza excesiva en la zona afectada por el calor (ZAC), factores que incrementan la susceptibilidad al agrietamiento y reducen la tenacidad de la junta estructural.

Bajo la normativa AWS D1.1, la integridad de estas uniones es crítica; sin embargo, existe una brecha en la cuantificación del impacto real que el tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) ejerce sobre la microestructura y la dureza en este tipo de acero. Aunque el PWHT se reconoce teóricamente como un método de alivio de esfuerzos, su eficacia para homogeneizar las propiedades mecánicas frente al estado de soldadura requiere validación experimental.

Por lo anterior, surge la siguiente interrogante: ¿Cuál es la influencia de la aplicación de un tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT) sobre las propiedades mecánicas y estructurales, especialmente en la dureza, de uniones soldadas de acero A36 mediante SMAW en comparación con aquellas que no reciben dicho tratamiento?

2. JUSTIFICACIÓN

La implementación del tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) en aceros estructurales ASTM A36 no es solo una recomendación técnica, sino una medida de seguridad crítica para mitigar fallas prematuras. Durante el proceso SMAW,

aporte térmico genera zonas de alta dureza y concentradores de esfuerzos internos. Si estos no se gestionan, la junta soldada queda vulnerable a la fractura frágil y al agrietamiento asistido por el entorno, lo que representa un riesgo elevado para la estabilidad de cualquier infraestructura.

Desde una perspectiva técnica y normativa, este proyecto se justifica en el cumplimiento de los estándares de la AWS D1.1. La caracterización detallada de la microestructura y la dureza permitirá validar la efectividad del ciclo térmico de alivio de tensiones, transformando una estructura heterogénea en una unión con propiedades mecánicas más uniformes y predecibles.

Finalmente, el estudio aporta valor al conocimiento metalúrgico aplicado, proporcionando datos experimentales que contrastan el estado "como se soldó" frente al estado tratado térmicamente. Los resultados servirán como base técnica para la toma de decisiones en talleres de fabricación y montajes industriales, donde la optimización de los parámetros de PWHT puede traducirse en una mayor vida útil de los componentes y una reducción significativa en los costos de mantenimiento correctivo por fallas estructurales.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la microestructura y dureza de un acero A36 sometido a soldadura por arco metálico revestido (SMAW) y posterior tratamiento térmico post-soldadura (PWHT), conforme a las especificaciones y requisitos establecidos por la norma AWS D1.1.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un WPS para la soldadura SMAW en acero A36, asegurando el cumplimiento de la norma AWS D1.1.
- Fabricar probetas de acero A36 mediante soldadura SMAW cumpliendo con las normativas de la norma AWS D1.1.
- Realizar ensayos metalográficos y de dureza antes y después del PWHT.
- Comparar los resultados de la microestructura y dureza de las probetas para evaluar el impacto del tratamiento térmico.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO CONCEPTUAL

4.1.1. Fundamentos de la soldadura por arco metálico revestido (SMAW)

La soldadura por arco metálico revestido (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) es un proceso de unión por fusión en el que el calor necesario para fundir el material se genera mediante un arco eléctrico entre un electrodo consumible revestido y la pieza de trabajo. De acuerdo con (Jeffus, 2020), el revestimiento del electrodo

cumple varias funciones importantes durante el proceso. Debido a las altas temperaturas del arco, este se descompone y produce gases que forman una atmósfera protectora alrededor del baño de fusión, reduciendo el contacto con el oxígeno y el nitrógeno presentes en el ambiente y, de esta manera, disminuyendo la posibilidad de generar porosidades y nitruros. Además, el revestimiento proporciona elementos desoxidantes y aleantes que contribuyen a las características finales del metal depositado. Parte de este material también se funde y forma una capa de escoria de menor densidad que permanece sobre el metal líquido, protegiéndolo de la oxidación durante la solidificación y contribuyendo al control de la velocidad de enfriamiento del cordón de soldadura.

El proceso SMAW es muy utilizado y reconocido dentro de los lineamientos establecidos por el código AWS D1.1, principalmente debido a la facilidad que tiene de transporte, lo económico de sus equipos y la posibilidad de realizar soldaduras en diferentes posiciones y condiciones, tanto en taller como en campo. Sin embargo, al ser un proceso que depende en gran medida de la intervención del soldador, el control de variables como el amperaje, la longitud del arco, la velocidad de avance y el aporte térmico está directamente relacionado con la experiencia y habilidad del operador. La falta de control en estos parámetros modifica el aporte térmico y esto altera la velocidad del enfriamiento promueve transformaciones indeseadas en la ZAC. Esto puede favorecer la aparición de transformaciones de fase y elevados gradientes de temperatura, los cuales influyen en la generación de tensiones residuales y pueden producir incrementos de dureza no deseados en la línea de fusión.

4.1.2. Propiedades y aplicaciones del acero ASTM A36

El acero ASTM A36 es un acero estructural de bajo contenido de carbono y ampliamente utilizado en aplicaciones industriales debido a su buena ductilidad, facilidad de conformado y relación favorable entre desempeño y costo. Según la norma ASTM A36/A36M (ASTM, 2019), este material presenta un límite elástico mínimo de 250 MPa (36 ksi) y una resistencia a la tracción entre 400 y 550 MPa. Una de sus principales ventajas es su facil soldabilidad, asociada principalmente a su bajo contenido de carbono, generalmente inferior o igual a 0,26 %, y a un bajo equivalente de carbono. Estas características reducen la posibilidad de que durante el enfriamiento se formen estructuras muy endurecidas, como la martensita, especialmente bajo condiciones normales de enfriamiento. (Monterrey, s.f.).

Cuando el material se encuentra en estado laminado en caliente, la microestructura del acero A36 está constituida principalmente por una matriz de ferrita α, caracterizada por su baja dureza y elevada ductilidad, acompañada de colonias de perlita, formada por una disposición laminar de ferrita y cementita (Fe_3C). Esta combinación microestructural es responsable, en gran medida, del equilibrio entre resistencia y ductilidad que presenta el material.

Sin embargo, durante el proceso de soldadura SMAW, el material experimenta ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento que modifican significativamente la microestructura en las zonas próximas al cordón. En las regiones donde la temperatura supera la temperatura crítica de austenitización (Ac_3), la ferrita y la perlita se transforman en austenita y puede producirse un crecimiento del tamaño de grano austenítico. Posteriormente, durante el enfriamiento, la transformación de esta austenita depende de las condiciones térmicas alcanzadas, pudiendo originar diferentes morfologías de ferrita, como ferrita de contorno de grano, ferrita de Widmanstätten y ferrita acicular. Estos cambios microestructurales pueden generar variaciones de dureza y propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor (ZAC), modificando el comportamiento local de la junta soldada.

4.1.3. **Norma AWS D1.1: Requisitos para soldadura estructural**

La norma AWS D1.1 (Structural Welding Code – Steel), desarrollada por la American Welding Society (AWS, 2020), establece los principales criterios técnicos para el diseño, fabricación, calificación e inspección de estructuras construidas en acero al carbono y aceros de baja aleación. Dentro de sus disposiciones, la norma define las combinaciones permitidas entre el material base y el material de aporte, además de establecer los procedimientos necesarios para desarrollar y calificar una Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS). El WPS tiene como finalidad establecer y controlar las condiciones bajo las cuales debe realizarse la soldadura, incluyendo variables como la corriente, el voltaje, la polaridad, el tipo de electrodo utilizado y las temperaturas de precalentamiento y entre pases. El control de estos parámetros permite obtener uniones soldadas con propiedades mecánicas adecuadas y una integridad estructural acorde con los requisitos establecidos para el material base. (Alfaro, 2024/2025).

En sus diferentes secciones técnicas, particularmente en las relacionadas con la calificación e inspección de procedimientos y soldadores, la AWS D1.1 establece los criterios que deben cumplir las uniones soldadas para ser aceptadas, incluyendo métodos de inspección no destructiva como la inspección visual, los líquidos penetrantes y el ensayo ultrasónico, así como diferentes ensayos destructivos utilizados durante la calificación. De igual manera, el análisis de la dureza en la zona afectada por el calor (ZAC) y en el metal depositado puede emplearse como una herramienta para evaluar los cambios producidos por el ciclo térmico de soldadura y su posible relación con la susceptibilidad al agrietamiento.

En determinadas condiciones de servicio, especialmente cuando existen niveles de restricción muy altos, espesores importantes o requisitos específicos asociados al material y a la unión, pueden establecerse tratamientos térmicos posteriores a la soldadura (PWHT). Estos tratamientos buscan reducir las tensiones residuales generadas durante la soldadura y favorecer una condición más estable de la unión. Para ello, deben controlarse variables como la temperatura de tratamiento, el tiempo de permanencia y la velocidad de calentamiento y enfriamiento, de acuerdo con los requisitos aplicables establecidos por el código.

4.1.4. **Tratamiento térmico post-soldadura (PWHT)**

El tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT), es un procedimiento controlado que se aplica a una junta soldada con el propósito de reducir las tensiones residuales y mejorar las condiciones microestructurales y mecánicas del material. (Metropolitano, 2019/2020). Durante la soldadura por fusión, el calentamiento localizado y las posteriores contracciones del metal generan deformaciones que, al estar restringidas por el material circundante, producen tensiones residuales en la unión. Como señala (Kou, 2002), estas tensiones pueden alcanzar valores elevados y afectar el comportamiento de la junta durante el servicio.

El PWHT consiste en calentar de manera controlada la pieza soldada hasta una temperatura inferior a la temperatura crítica de transformación, manteniéndola durante un periodo determinado y posteriormente enfriándola bajo condiciones controladas. Para aceros al carbono como el A36, las temperaturas empleadas pueden encontrarse aproximadamente entre 590 °C y 675 °C, dependiendo de los requisitos del material, el espesor y el procedimiento aplicado. El tiempo de permanencia se establece en función del espesor del componente y de las

especificaciones correspondientes, con valores que pueden aproximarse a una hora por cada pulgada de espesor en determinados procedimientos.

Al mantener el material a alta temperatura durante el PWHT, se activan procesos de difusión atómica y deformación plástica local. Esto permite que se libere parte de la energía elástica acumulada durante la soldadura, lo que ayuda a reducir las tensiones residuales de la junta. En las probetas analizadas, este fenómeno se evidencia en la caída de los picos de microdureza en la ZAC y en la zona de enlace, dando lugar a una estructura de fases más uniforme y equilibrada.
Uno de los efectos más importantes del PWHT es la reducción de los niveles de dureza en las regiones que fueron sometidas a los mayores gradientes térmicos, especialmente en la Zona Afectada por el Calor (ZAC). Esto permite disminuir las diferencias de dureza entre el metal base, la ZAC y el metal depositado, generando una transición más gradual de las propiedades mecánicas a través de la junta. En consecuencia, el tratamiento puede contribuir a mejorar la ductilidad y tenacidad de la unión y a reducir la susceptibilidad a mecanismos de falla asociados con elevados niveles de tensión residual y estructuras localmente endurecidas.

4.1.5. **Caracterización microestructural**

La caracterización microestructural es una herramienta de análisis que permite relacionar las características de la estructura interna de un material, como la morfología, el tamaño de grano y la distribución de las diferentes fases, con sus propiedades y comportamiento mecánico. En el caso de las uniones soldadas de aceros al carbono, el análisis metalográfico permite identificar y diferenciar las principales regiones que conforman la junta. Estas incluyen el Metal Base (MB), la Zona Afectada por el Calor (ZAC), que puede presentar regiones de grano grueso, grano fino y transformación subcrítica, y el Metal de Soldadura correspondiente a la zona de fusión, donde se encuentran los diferentes pases de soldadura. Según

(Callister, 2018), la observación microscópica constituye una herramienta fundamental para evaluar los cambios microestructurales producidos por los tratamientos térmicos y determinar su influencia sobre las propiedades del material.

La preparación de las muestras para el análisis metalográfico se realiza mediante una serie de etapas que buscan obtener una superficie adecuada para la observación. Inicialmente se lleva a cabo el desbaste utilizando abrasivos de diferentes granulometrías, seguido del pulido hasta obtener una superficie uniforme y libre de rayas. Posteriormente, se realiza el ataque químico mediante un reactivo apropiado, como el Nital, compuesto por ácido nítrico disuelto en etanol, con el objetivo de revelar las características de la microestructura.

En el acero ASTM A36, el ataque con Nital permite generar un contraste entre las principales fases presentes, facilitando la identificación de la ferrita, que generalmente presenta una apariencia clara, y la perlita, que se observa como regiones más oscuras. La observación mediante microscopía óptica, utilizando diferentes aumentos y llegando hasta 1000× cuando las condiciones de la muestra lo permiten, permite analizar aspectos como el tamaño y la morfología de los granos, la distribución de las fases y las modificaciones producidas por el ciclo térmico de soldadura. De esta manera, es posible comparar las características microestructurales de las diferentes zonas de la junta y evaluar los cambios asociados al tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT).

4.1.6. Ensayos de Microdureza Vickers (HV) en Uniones Soldadas

La dureza es una propiedad que representa la resistencia de un material frente a la deformación plástica localizada producida por la acción de un indentador. En el

análisis de uniones soldadas, los ensayos de microdureza son especialmente útiles porque permiten evaluar cambios en las propiedades mecánicas dentro de regiones muy pequeñas de la junta. En particular, el ensayo Vickers (HV), establecido bajo la norma ASTM E384 (ASTM, 2017), resulta apropiado para estudiar zonas estrechas como la interfaz entre la línea de fusión y la Zona Afectada por el Calor (ZAC), donde los ensayos de dureza convencional no ofrecen la resolución suficiente para identificar variaciones locales.

El ensayo Vickers emplea un indentador de diamante con geometría piramidal de base cuadrada y un ángulo de 136° entre sus caras. Durante el ensayo se aplica una carga determinada durante un tiempo de permanencia establecido. Por ejemplo, para una medición HV0.2 se utiliza una carga de 1,961 N, que puede mantenerse durante aproximadamente 10 segundos. Una vez retirada la carga, se miden mediante microscopía las diagonales de la huella producida sobre la superficie de la muestra, a partir de las cuales se determina el valor de dureza.

En una junta soldada, la realización de un barrido transversal de microdureza permite obtener mediciones sucesivas desde el Metal Base, pasando por la ZAC, hasta llegar al metal de soldadura correspondiente a las zonas de raíz y relleno. Los resultados obtenidos pueden representarse mediante un perfil de dureza, permitiendo identificar las regiones donde se presentan incrementos o disminuciones significativas de esta propiedad. Estas variaciones están directamente relacionadas con los cambios microestructurales generados por el ciclo térmico de soldadura.

El perfil de microdureza también permite comparar el estado de la junta antes y después de la aplicación del tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT). Una disminución de los valores máximos de dureza después del tratamiento puede indicar una reducción del endurecimiento localizado y una mayor uniformidad de las propiedades mecánicas entre las diferentes regiones de la junta. Por esta razón, la

microdureza constituye una herramienta importante para evaluar los efectos del PWHT y verificar el comportamiento de la unión frente a los requisitos establecidos para el procedimiento de soldadura.

4.2. MARCO TEÓRICO

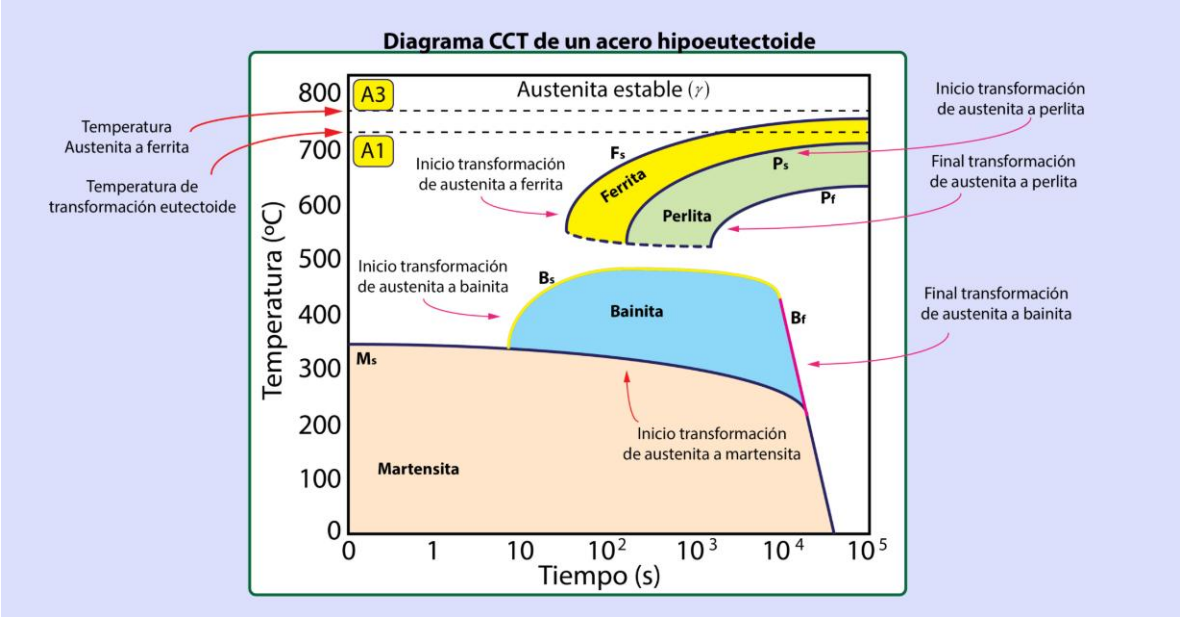
4.2.1. **Transformaciones de fase y ciclos térmicos en el acero A36**

El acero ASTM A36 es un acero de bajo contenido de carbono e hipoeutectoide cuya microestructura en condiciones de equilibrio está constituida principalmente por una matriz de ferrita proeutectoide y colonias de perlita. No obstante, durante la soldadura mediante el proceso SMAW, el material está sometido a ciclos térmicos rápidos y variables que lo alejan de las condiciones de equilibrio. El calentamiento localizado producido por el arco eléctrico eleva rápidamente la temperatura en las proximidades de la junta, mientras que, una vez finalizado el aporte de calor, el material experimenta un enfriamiento debido a la transferencia de calor hacia las regiones más frías del metal base. Cuando la temperatura supera el límite crítico superior, la microestructura ferrítico-perlítica se transforma en austenita, como indica (Askeland, 2017).

La evolución de la microestructura durante el enfriamiento puede analizarse mediante el Diagrama de Transformación por Enfriamiento Continuo (CCT) (Figura 1). En condiciones de enfriamiento más rápidas, el tiempo disponible para que ocurran las transformaciones difusionales disminuye. Un parámetro utilizado para caracterizar estas condiciones es el tiempo ($t_{8/5}$), correspondiente al intervalo necesario para que la temperatura descienda desde 800 °C hasta 500 °C. Cuando

este tiempo es reducido, se limita la difusión del carbono y se dificulta la formación de las estructuras de equilibrio, particularmente la perlita.

Figura 1. Diagrama de transformación por enfriamiento continuo (CCT) para un acero hipoeutectoide.



Fuente: adaptado de LA WEB DE INGENIOSOS. Diagramas CCT (Continuous Cooling Transformation) [en línea]. 2022 [consultado el 22 de agosto de 2026]. Disponible en: https://lawebdeingeniosos.com/diagramas-cct/

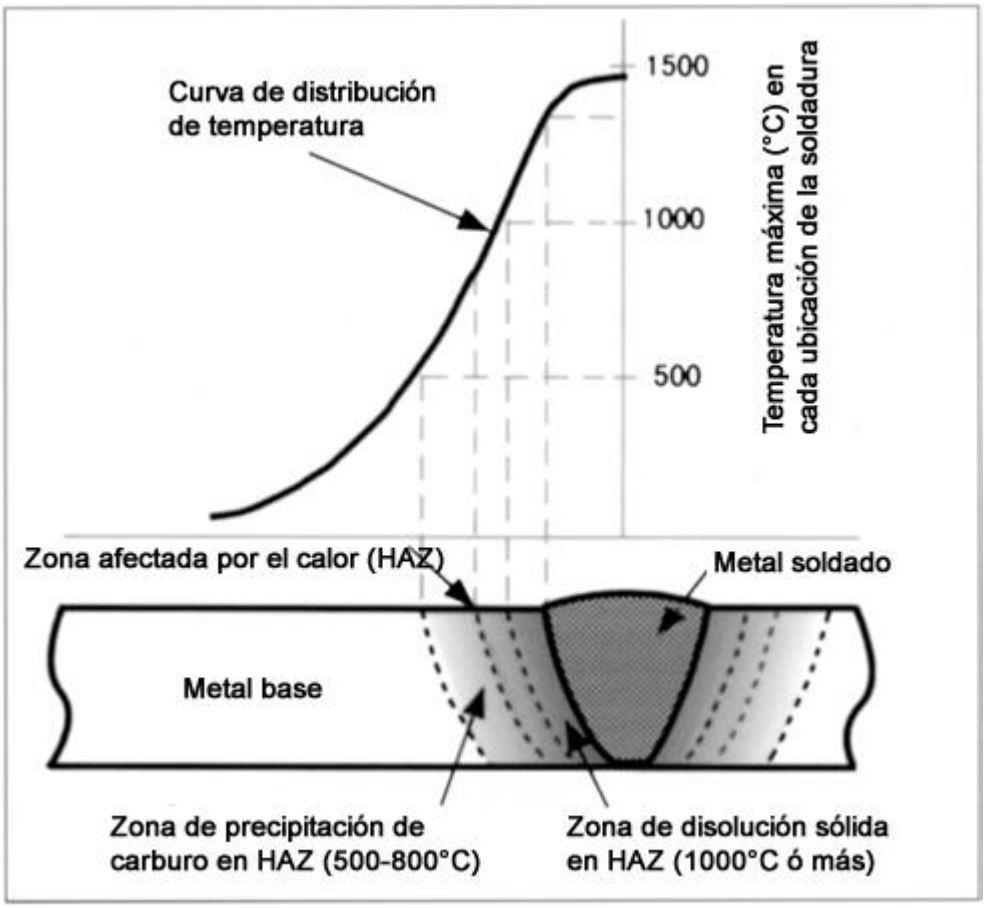
Como consecuencia, dependiendo de la velocidad de enfriamiento alcanzada, pueden desarrollarse microestructuras de transformación diferentes a las presentes originalmente en el material, entre ellas ferrita de Widmanstätten y otras morfologías de ferrita asociadas a condiciones de enfriamiento más rápidas. Estas transformaciones pueden estar acompañadas por un aumento de la densidad de defectos cristalinos, como las dislocaciones, lo que modifica las propiedades mecánicas de la zona afectada. En la junta soldada, estos cambios microestructurales pueden generar incrementos localizados de dureza y, simultáneamente, una disminución de la ductilidad y tenacidad. Por esta razón, el

control del ciclo térmico resulta fundamental para evitar variaciones excesivas de las propiedades mecánicas y reducir la posibilidad de concentraciones de esfuerzos en las regiones próximas a la soldadura.

4.2.2. **Metalurgia de la zona afectada por el calor (ZAC)**

La Zona Afectada por el Calor (ZAC) corresponde a la región del metal base ubicada junto a la línea de fusión que, aunque no llega a fundirse durante la soldadura, experimenta cambios importantes en su microestructura y en sus propiedades mecánicas como consecuencia del calor generado por el arco eléctrico. Esta zona presenta características variables a lo largo de la junta, debido a que las temperaturas alcanzadas disminuyen progresivamente a medida que aumenta la distancia respecto al cordón de soldadura. Por esta razón, la ZAC puede dividirse en diferentes subzonas de acuerdo con el intervalo de temperatura al que estuvo expuesto el material, como se describe en (Jeffus, 2020) y se representa en la Figura 2.

Figura 2. Distribución de temperaturas máximas y subzonas de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la soldadura



Fuente: adaptado de KOBE STEEL, LTD. La Zona Afectada por el Calor (ZAC) y sus problemas metalúrgicos [en línea], [consultado el 22 de agosto de 2026]. Disponible en: https://www.kobelco-welding.jp/espanol/education-center/abc/ABC_1999-04.html

La región más cercana a la línea de fusión corresponde a la Zona Afectada por el Calor de Grano Grueso (CGHAZ). En esta zona se alcanzan temperaturas muy por encima de la temperatura de austenización completa, aproximadamente entre 1100 °C y 1400 °C, lo que favorece el crecimiento de los granos de austenita. Este crecimiento genera una microestructura de grano grueso al enfriarse, afectando la tenacidad del material.

A continuación, se encuentra la Zona Afectada por el Calor de Grano Fino (FGHAZ), donde las temperaturas superan la temperatura crítica superior, pero sin llegar a los niveles extremos de la zona anterior. En esta región ocurre una transformación completa a austenita y, al enfriarse, se obtiene una estructura de grano fino.

Más alejada de la línea de fusión se ubica la Zona Intercrítica (ICHAZ), en la cual el material alcanza temperaturas intermedias, situadas entre la temperatura crítica inferior y la superior. Debido a este rango térmico, solo una parte de la microestructura original se transforma en austenita durante el calentamiento.

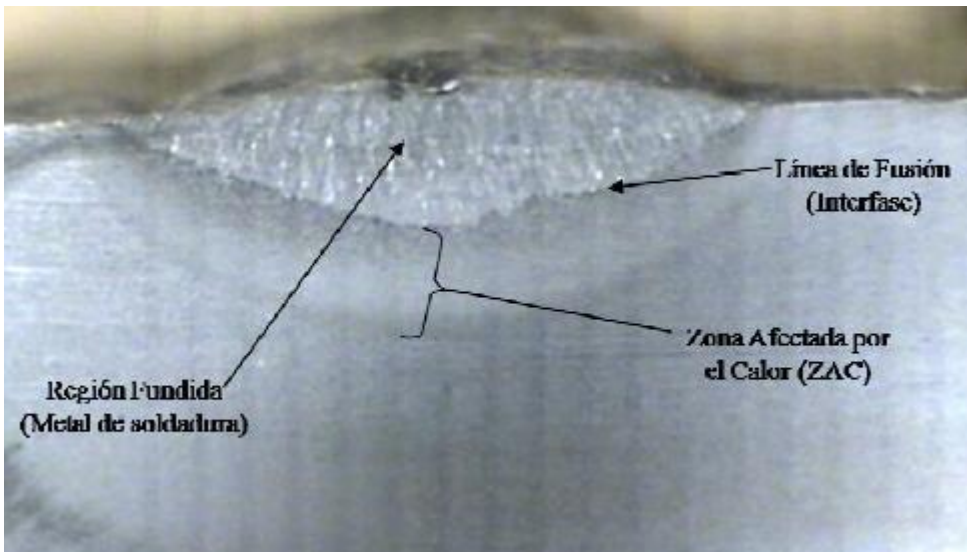
Finalmente, la Zona Subcrítica (SCHAZ) corresponde a la región que se mantiene a temperaturas por debajo de la temperatura crítica inferior, por lo que no ocurre transformación de fases a austenita, aunque el calor recibido puede modificar levemente las propiedades del acero.
La extensión y las características de cada una de estas regiones dependen, entre otros factores, del aporte térmico, la velocidad de avance, el espesor del material y las condiciones de enfriamiento. Por ello, mantener un control adecuado de los parámetros de soldadura resulta importante para limitar el crecimiento excesivo de grano en la CGZAC y reducir las variaciones de dureza y propiedades mecánicas a lo largo de la junta. (Falokun, 2020).

4.2.3. **Alivio de tensiones mediante PWHT**

Durante el proceso de soldadura por fusión, el calentamiento se concentra en una región localizada de la junta, esto provoca una rápida expansión térmica del material. Esta expansión se encuentra restringida por las zonas de metal base que permanecen a menor temperatura y que presentan una mayor rigidez. Posteriormente, durante la solidificación y el enfriamiento del metal depositado, se produce una contracción que también está parcialmente limitada por la geometría y

las condiciones de restricción de la junta. Como resultado de estos fenómenos térmicos y mecánicos se generan tensiones residuales que pueden presentarse tanto en dirección longitudinal como transversal, principalmente en el cordón de soldadura y en las regiones cercanas de la Zona Afectada por el Calor (ZAC).

Figura 3. Macrografía de la sección transversal de la junta soldada indicando la región fundida, línea de fusión y Zona Afectada por el Calor (ZAC)



METFUSION. Soldabilidad de los aceros [en línea]. 2013 [consultado el 22 de agosto de 2026]. Disponible en: https://metfusion.wordpress.com/2013/08/10/soldabilidad-de-los-aceros/

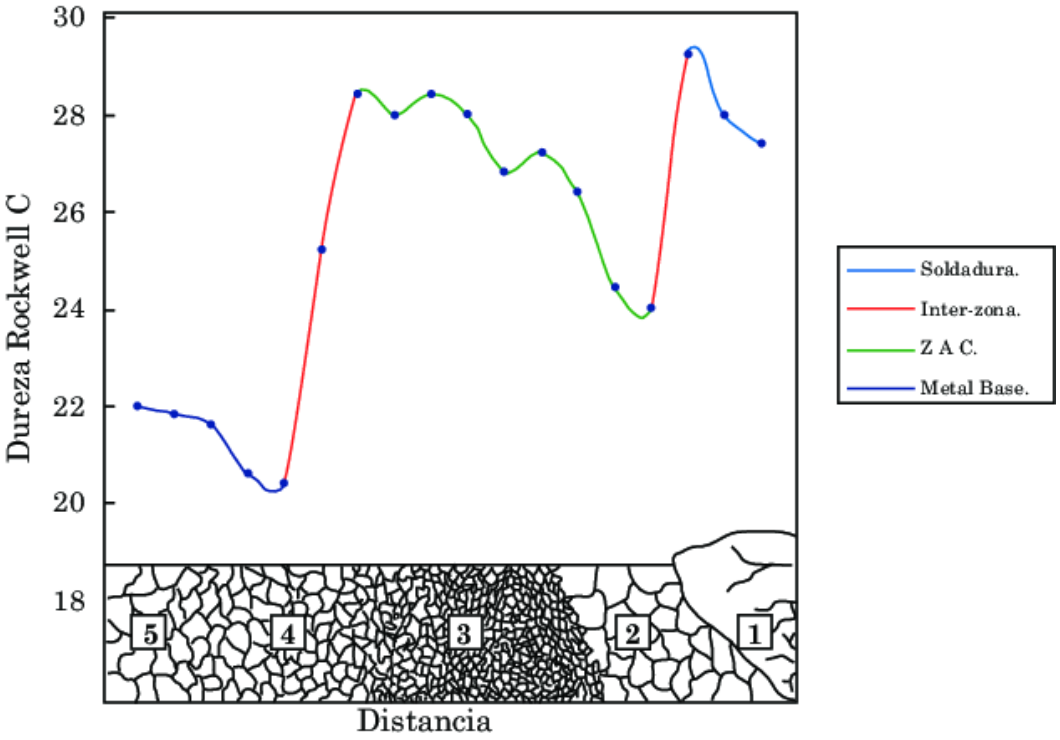
Estas tensiones permanecen en la pieza incluso después de que esta haya alcanzado nuevamente la temperatura ambiente. Su presencia es relevante debido a que pueden sumarse a las tensiones producidas por las cargas externas durante el funcionamiento de la estructura. En particular, las tensiones residuales de tracción pueden favorecer la iniciación y propagación de grietas cuando existen condiciones susceptibles, además de contribuir al deterioro de la resistencia a la fatiga bajo cargas cíclicas. Asimismo, cuando se combinan con determinadas condiciones microestructurales y ambientales, pueden aumentar la susceptibilidad de la unión a

mecanismos de agrietamiento, afectando el desempeño y la integridad estructural de la construcción soldada.

4.2.4. Proceso Industrial y Ciclo Térmico del PWHT

El tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT) se basa en la capacidad del material para reducir gradualmente las tensiones residuales mediante mecanismos de deformación y difusión activados por el aumento de temperatura. Durante este proceso, el control de la temperatura y del tiempo resulta fundamental para obtener un alivio de tensiones adecuado sin generar transformaciones no deseadas en el material. De acuerdo con AWS D1.1 (AWS, 2020), el ciclo térmico debe ejecutarse bajo condiciones controladas, considerando variables como la velocidad de calentamiento, la temperatura de sostenimiento, el tiempo de permanencia y la velocidad de enfriamiento, como se representa en la Figura 4.

Figura 4. Perfil de dureza transversal y correlación microestructural en un acero ASTM A36 soldado mediante SMAW



Fuente: adaptado de RESEARCHGATE. Perfil de dureza de un acero ASTM A36 soldado mediante SMAW, Carlos Ramirez [en línea]. 2014 [consultado el 22 de agosto de 2026]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-10-Perfil-de-dureza-de-un-acero-ASTM-A36-soldado-mediante-SMAW-Fuente_fig4_262673582

El ciclo de tratamiento comienza con un calentamiento gradual y controlado de la pieza hasta alcanzar la temperatura establecida para el PWHT. Para temperaturas superiores a 315 °C, la velocidad de calentamiento debe mantenerse dentro de los límites establecidos por el procedimiento y debe considerar el espesor del componente. Una vez alcanzada la temperatura de tratamiento, la junta se mantiene durante un periodo determinado, que puede establecerse en función del espesor, con valores de referencia cercanos a una hora por cada pulgada. En esta etapa, la temperatura se mantiene dentro del intervalo definido para el tratamiento subcrítico,

permitiendo la reducción progresiva de las tensiones residuales. Posteriormente, se realiza un enfriamiento controlado, normalmente dentro del horno, hasta alcanzar una temperatura aproximada de 315 °C, después de lo cual la pieza puede continuar enfriándose en aire tranquilo. (George E. Totten, 2006).

Desde el punto de vista industrial, la selección del método de PWHT depende principalmente del tamaño, geometría y ubicación de la estructura. Cuando el tratamiento se realiza en taller, pueden utilizarse hornos estacionarios equipados con sistemas de calentamiento mediante gas o resistencias eléctricas, permitiendo un calentamiento relativamente uniforme de la pieza. En trabajos realizados directamente en campo, el tratamiento localizado puede efectuarse mediante mantas de resistencias eléctricas flexibles, como las utilizadas en sistemas de calentamiento cerámico, o mediante equipos de calentamiento por inducción electromagnética.

Para controlar y registrar el ciclo térmico, se emplean termocuplas instaladas en puntos estratégicos de la junta y conectadas a sistemas de adquisición de datos. Estos equipos permiten registrar continuamente la evolución de la temperatura y verificar que las velocidades de calentamiento y enfriamiento, el tiempo de permanencia y la temperatura de sostenimiento se mantengan dentro de los parámetros establecidos por el procedimiento aplicable. De esta manera, se garantiza la trazabilidad del tratamiento y se facilita la comprobación de que el PWHT fue ejecutado bajo las condiciones especificadas.

4.3. ESTADO DEL ARTE

La recopilación de información para este capitulo se basó en una búsqueda sistemática en bases de datos académicas, tales como ScienceDirect, Scielo, Dialnet y repositorios institucionales especializados en ingeniería de materiales. Los criterios de selección se centraron en investigaciones experimentales publicadas en los últimos años, priorizando estudios que vinculan directamente el proceso de soldadura SMAW con el acero ASTM A36. Se seleccionaron documentos que aportan datos importantes sobre perfiles de dureza, transformaciones microestructurales y ensayos mecánicos bajo la normativa AWS D1.1.

(López, 2022) en su investigación titulada "Caracterización metalográfica y evaluación del perfil de dureza en una junta soldada de acero ASTM A36 mediante el proceso de soldadura por fricción rotacional ", analizó las transformaciones estructurales de este acero tras ser sometido a ciclos térmicos de alta energía. Mediante ensayos de microdureza Vickers, la autora identificó que la zona de unión desarrolla picos de dureza de hasta 186 HV, lo que representa un incremento significativo respecto al metal base debido a la aparición de ferrita Widmanstätten y el refinamiento de grano en la zona afectada por el calor (ZAC). Esto demuestra que el acero A36, a pesar de su bajo contenido de carbono, experimenta una alteración metalúrgica severa y un endurecimiento localizado que compromete la homogeneidad mecánica de la junta, validando la necesidad de aplicar tratamientos térmicos como el PWHT para estabilizar dichas propiedades.

(Marco Homero Almendariz Puente et al., 2021) en su investigación titulada "Estudio de los Efectos de la Temperatura de Precalentamiento sobre la Microestructura y Propiedades Mecánicas de Aceros ASTM A36 y A572 GR. 50", analizaron cómo los ciclos térmicos de soldadura modifican la integridad de las juntas estructurales. Los

autores determinaron que, sin un control térmico adecuado, el acero A36 presenta en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) una estructura con presencia de ferrita y perlita fina, lo que eleva la dureza y reduce la ductilidad del material. Sus ensayos demostraron que la aplicación de calor controlado permite una distribución más homogénea de las fases y una reducción de los picos de dureza en la zona de transición, lo que sustenta científicamente la premisa de este proyecto: el post-tratamiento térmico (PWHT) es una etapa crítica para restaurar la tenacidad y aliviar las tensiones internas generadas por el enfriamiento rápido en procesos SMAW.

(Melgarejo Rincón, Ramírez Martín, & Aperador Chaparro, 2013) en su investigación titulada "Determinación de las causas de falla en la ZAC de un acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW", realizaron un análisis de las transformaciones metalúrgicas que ocurren en la zona afectada por el calor. Los autores identificaron que el ciclo térmico característico de la soldadura manual por arco induce la formación de martensita y ferrita, lo que genera un incremento abrupto de la dureza en la ZAC y fragiliza la unión. El estudio concluye que estas microestructuras, sumadas a las tensiones residuales, son las principales responsables de las fallas prematuras, lo que refuerza la base de este proyecto sobre la importancia crítica del tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) como mecanismo para restaurar la tenacidad y prevenir el colapso de componentes estructurales de acero A36.

(Manotoa Balseca, Altamirano González, & Sánchez Almeida, 2025) examinaron la integridad de uniones a tope en acero ASTM A36 utilizando el ensayo de doblez guiado como métrica principal de aceptación según el código AWS D1.1. Los resultados revelaron que la ductilidad de la junta es el parámetro más crítico para validar un procedimiento de soldadura, estableciendo que cualquier discontinuidad o fisura que exceda los 3 mm tras la flexión es motivo de rechazo inmediato. Este hallazgo subraya la vulnerabilidad de la zona soldada en el A36, donde la pérdida de flexibilidad mecánica suele ser el primer indicador de un ciclo térmico deficiente,

lo que justifica la aplicación de tratamientos térmicos posteriores para garantizar que el material recupere la capacidad de deformarse sin fracturarse.

(Morales Juárez, 2020), en su investigación titulada *Efecto de la intensidad de corriente de soldadura SMAW sobre la resistencia a la tracción en uniones de acero ASTM A36*, estudió la influencia de la corriente de soldadura sobre el comportamiento mecánico y las características microestructurales de juntas a tope fabricadas mediante el proceso SMAW. A partir de la evaluación de las diferentes regiones de la unión, el autor evidenció que las variaciones en los parámetros de soldeo y, particularmente, en el aporte térmico, pueden modificar tanto la resistencia mecánica como la distribución de la microdureza en las proximidades de la zona de fusión.

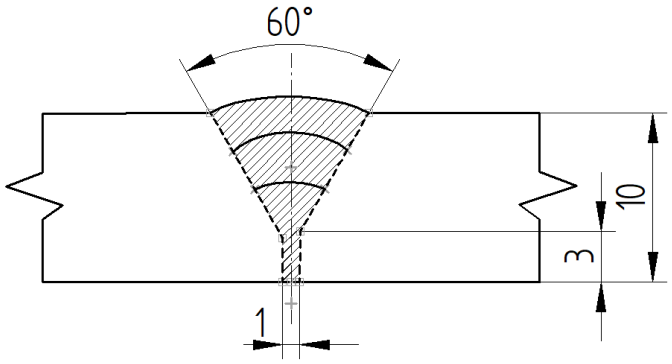
Los resultados obtenidos en dicha investigación resaltan la importancia de mantener un control adecuado de la energía suministrada durante el proceso de soldadura, debido a su influencia sobre las transformaciones microestructurales que tienen lugar en la Zona Afectada por el Calor (ZAC). De acuerdo con el estudio, un control inadecuado de estos parámetros puede favorecer la formación de estructuras con características mecánicas menos favorables. En este sentido, el trabajo constituye un antecedente relevante para analizar la variación de las propiedades mecánicas y microestructurales de las juntas soldadas y evaluar los cambios producidos después de la aplicación de tratamientos térmicos posteriores a la soldadura.

5. DESARROLLO DEL PROYECTO

5.1. ELABORACIÓN DE UN WPS PARA LA SOLDADURA SMAW EN ACERO A36

Con el fin de asegurar la repetibilidad y la calidad de las soldaduras, se creó una especificación del procedimiento de soldadura (WPS, por sus siglas en inglés). Este documento técnico sirvió como guía para soldar las probetas, garantizando que todas las variables permanecieran dentro de los límites establecidos por la norma AWS D1.1.

Figura 5. Detalles de la junta (bosquejo) (WPS)



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1 se detallan los parámetros geométricos establecidos en el WPS para la preparación de las juntas. Se observa un diseño de soldadura simple en ranura en V, Junta a tope, caracterizado por un ángulo de apertura de 60°, una abertura de raíz de 1/32 de pulgada y una cara de raíz de 0.11811 pulgadas. Estas dimensiones fueron seleccionadas para asegurar una penetración completa mediante el proceso SMAW, permitiendo que las probetas de acero ASTM A36 de 3/8 de pulgada de espesor mantengan la integridad estructural necesaria para los ensayos de dureza y caracterización microestructural posteriores.

Tabla 1. Parámetros del procedimiento SMAW

PROCEDIMIENTO								
CAPAS DE		MATERIAL DE APORTE		CORRIENTE				VELOCIDAD
SOLDADURA (SECUENCIA)	PROCESO	CLASE	DIAMETRO	TIPO Y POLARIDAD	AMPERAJE (AMP)	RANGO DE VOLTAJE (V)	DE AVANCE in/min	(K Joules /in.)
Raiz	SMAW	E6010	3/32"	DCEP (-)	90–110	22–25	4–6	10–12
Relleno	SMAW	E7018	3/32"	DCEP (+)	90–110	23–26	5–7	12–14
Acabado	SMAW	E7018	3/32"	DCEP (+)	90–110	24–28	6–8	13–15

Fuente: Elaboración propia

El WPS establece los parámetros operativos para cada etapa del depósito de soldadura. En la Tabla 1: Parámetros del procedimiento SMAW se detallan las variables eléctricas y mecánicas seguidas para asegurar la integridad de la unión:

Secuencia de pases: El procedimiento se dividió en tres etapas: raíz, relleno y acabado. Para la raíz y el relleno se seleccionó un electrodo E6010 de 1/8", mientras

que para el acabado se empleó un E6018 de 3/32", buscando una mejor terminación superficial y control en la última capa.

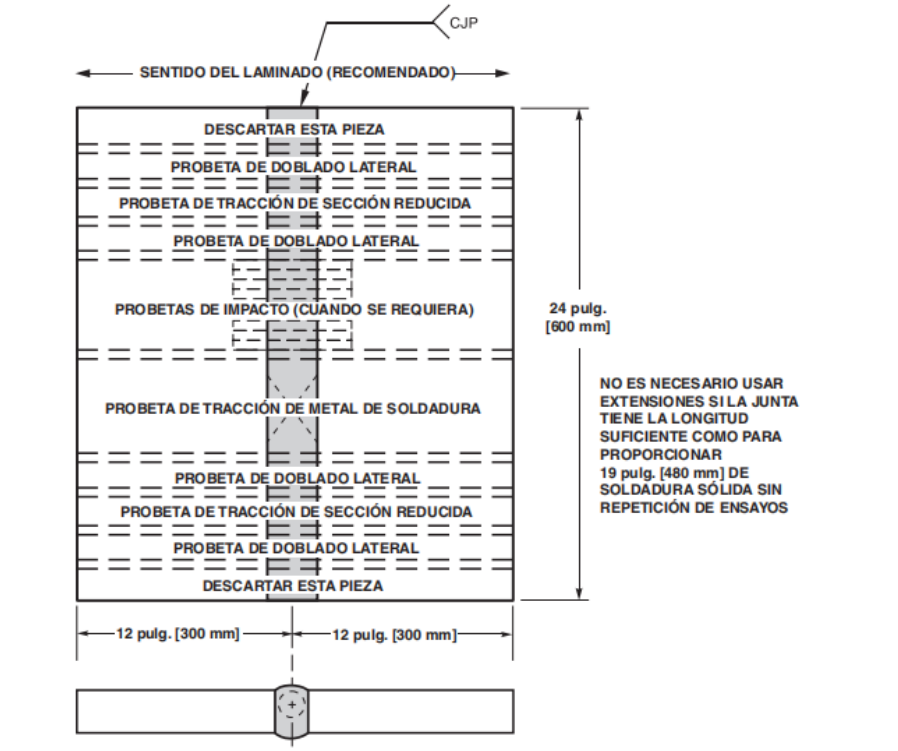
Parámetros Eléctricos: Se trabajó con una polaridad DCEP (-) en el pase de raíz y DCEP (+) en los pases de relleno y acabado. El amperaje se ajustó de forma ascendente según la etapa, iniciando con un rango de 90-110 A para la raíz y finalizando entre 120-140 A para el acabado.

Técnica de Soldeo: Se utilizó una técnica de pasada múltiple con un movimiento de encordador. El ángulo de inclinación del electrodo se mantuvo entre 70° y 80° respecto a la pieza para optimizar la penetración y el control del pozo de fusión.

Aporte Térmico: La velocidad de avance se controló entre 4 y 8 in/min, lo que resultó en una energía de soldadura de entre 10 y 15 kJ/in.
Finalmente, la limpieza entre pasadas se realizó mediante la remoción mecánica de escoria, garantizando una junta libre de inclusiones metálicas de acuerdo con los criterios de aceptación de la norma AWS D1.1.

5.2. FASE DE FABRICACIÓN

Figura 6. Esquema de distribución de probetas según la norma AWS D1.1.



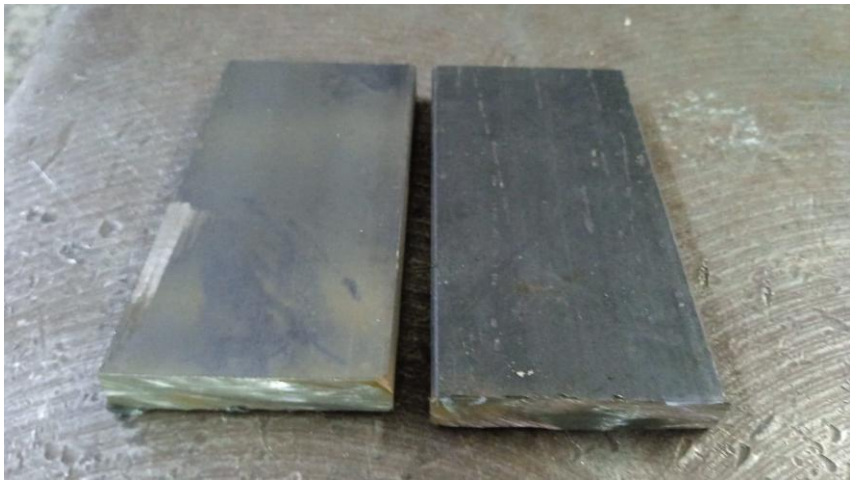
Notas:
1. La configuración de ranura que se muestra es solo para ilustración. La forma de la ranura ensayada debe cumplir con la forma de la ranura de producción que esté siendo calificada.
2. Cuando se requieran probetas de ensayo con el péndulo de Charpy (CVN), vea los requisitos en la Sección 6, Parte D.
3. Todas las dimensiones son mínimas.

Fuente: Norma AWS D1.1 2020

Una vez definido el WPS y validado bajo la norma AWS D1.1, se procedió con la fase de ejecución física de las uniones soldadas en el taller.

5.2.1. Preparación del material base

Figura 7. Vista superior de las placas preparadas



Fuente: Elaboración propia

La fase de fabricación comenzó con la recepción de las placas de acero ASTM A36 de 3/8 de pulgada de espesor.

Figura 8. Placas de acero A36 con bordes esmerilados y biselados



Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Armado de la junta

Con las placas debidamente limpias y biseladas, se procedió al ensamble de la junta en posición plana.

Figura 9. Verificación de la abertura de raíz



Fuente: Elaboración propia

Para asegurar el mantenimiento de la abertura de raíz definida en el procedimiento, se emplearon galgas de espesor tipo taper gauge. En la Figura 10, se observa la verificación de la abertura de raíz de 1/32 de pulgada antes de proceder al apuntalado de la unión. El uso de esta instrumentación de precisión garantiza que la junta cumpla con el diseño establecido en el WPS.

Figura 10. Ensamble final de la junta



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se muestra cómo quedó la junta antes de empezar a soldar. Se puede observar que las piezas están alineadas y que se añadieron unas placas pequeñas en los extremos. Estas placas son importantes porque permiten que el arco eléctrico se estabilice al iniciar y que el cierre del cordón quede fuera de la probeta principal.

5.2.3. Ejecución del proceso de soldadura SMAW

Figura 11. Aplicación del primer pase (raíz) mediante el proceso SMAW.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12 se muestra el resultado del primer pase de soldadura, conocido como pase de raíz. Para esta etapa se utilizó un electrodo E6010, el cual se eligió por su capacidad de penetración profunda. Como se puede observar en la imagen, el objetivo fue depositar un cordón uniforme en el fondo del bisel que lograra fundir ambos bordes de las placas de acero A36.

Figura 12. Aplicación del segundo pase (relleno) mediante el proceso SMAW.



Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Vista trasera de la probeta soldada mediante el proceso SMAW.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 se observa la ejecución del pase de relleno sobre el cordón de raíz. En esta etapa se ajustó el amperaje según el WPS para garantizar la fusión

completa con las paredes del bisel y rellenar el volumen de la junta de manera uniforme y se utilizó un electrodo E7018.

Figura 14, Aplicación del último pase (*E7018* acabado) mediante el proceso SMAW.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 se muestra el cordón de acabado realizado con el electrodo E6018. Este último pase se aplicó con el objetivo de cubrir totalmente la ranura y obtener una superficie uniforme.

5.3. INSPECCIÓN Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END) DE LA JUNTA SOLDADA

5.3.1. Inspección por Tintas Penetrantes (PT)

Este ensayo se realizó con el objetivo de identificar defectos o discontinuidades superficiales, tales como poros, grietas o falta de fusión, abiertas a la superficie de la soldadura.

Se utilizó un kit de la marca Met-L-Chek (Figura 11), compuesto por tres productos específicos:

1. Limpiador (Cleaner) E-59A: Para la limpieza inicial y remoción de excesos de penetrante.

2. Penetrante (Penetrant) VP-31A: Líquido rojo de alta capilaridad.

3. Revelador (Developer) D-70: Agente blanco para extraer el penetrante de las discontinuidades.

Figura 15. Kit Met-L-Chek para tintas penetrantes.



Fuente: Elaboración propia

El procedimiento aplicado constó de los siguientes pasos:

1. Limpieza inicial: Se limpió la superficie de la placa con el limpiador E-59A para eliminar contaminantes.

Figura 16. Limpieza de la placa con el limpiador E-59A.



Fuente: Elaboración propia

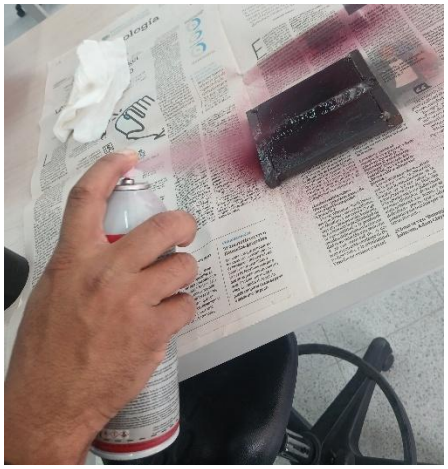
Figura 17. Limpiador E-59A.



Fuente: Elaboración propia

2. Aplicación del penetrante: Se aplicó el líquido rojo VP-31A sobre la soldadura, permitiendo su ingreso en las discontinuidades por un tiempo de penetración de entre 5 y 10 minutos.

Figura 18. Aplicación del penetrante VP-31A.



Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Penetrante VP-31A



Fuente: Elaboración propia

3. Remoción del exceso: Tras el tiempo de espera, se retiró el exceso de penetrante de la superficie utilizando nuevamente el limpiador E-59A y paños limpios.

Figura 20. Remoción de exceso de penetrante.



Fuente: Elaboración propia

4. Aplicación del revelador: Se aplicó uniformemente el revelador blanco D-70. Durante un tiempo de 10 minutos, este agente extrajo el penetrante atrapado en las discontinuidades por capilaridad, formando manchas rojas visibles sobre el fondo blanco.

Figura 21. Revelador D-70.



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Aplicación del revelador D-70.



Fuente: Elaboración propia

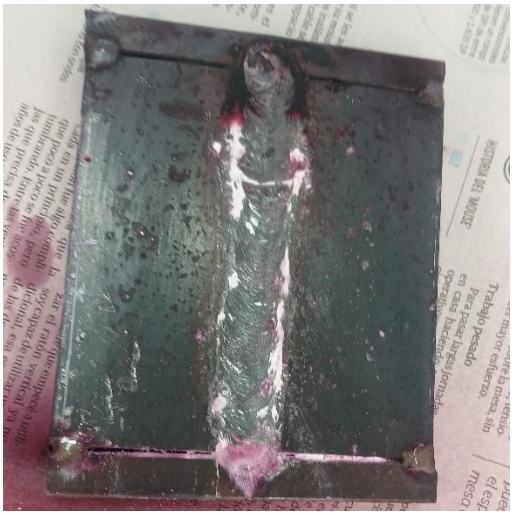
Figura 23. Capa blanca del revelador posterior a 10 minutos de aplicación.



Fuente: Elaboración propia

5. Limpieza final: Tras la interpretación de los resultados, se procedió a la limpieza final de la placa con un paño y el limpiador E-59A para remover los restos de revelador y penetrante.

Figura 24. Posterior remoción del revelador.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 24 después de limpiar nuevamente la placa con el limpiador se pueden observar algunas discontinuidades.

5.3.2. Inspección Visual según norma AWS D1.1

Para verificar el cumplimiento de los perfiles de soldadura según los criterios de aceptación de la norma AWS D1.1, se realizó una inspección dimensional utilizando instrumentos de medición específicos (galgas). Aunque se dispone de un kit completo de metrología (Figura 20), el proceso se centró en el uso de dos galgas:

Figura 25. Kit de galgas para inspección visual de soldadura.



Fuente: Elaboración propia

Calibre de inspección de soldadura (Figura 26): Utilizada para medir **el refuerzo de la soldadura**. Este instrumento permite verificar que la altura de la cara de la soldadura sobre la superficie del metal base esté dentro de los límites permitidos (entre 1mm y 3mm), evitando sobre-espesores que generen concentradores de esfuerzos.

Figura 26. Galga de inspección de soldadura D1.1-90.



Fuente: Elaboración propia

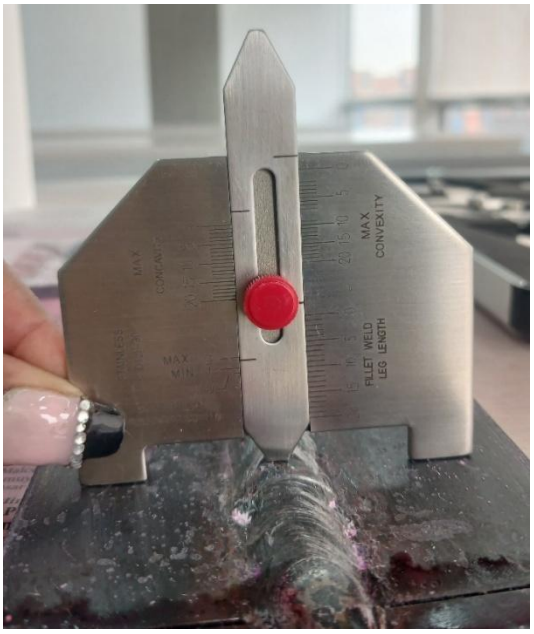
Galga V-WAC (Figura 27): Empleada para la inspección de socavaciones y la medición de la profundidad de porosidad superficial. Su diseño permite determinar con precisión si las depresiones en los bordes de la soldadura exceden las tolerancias de la norma.

Figura 27. Galga V-WAC.



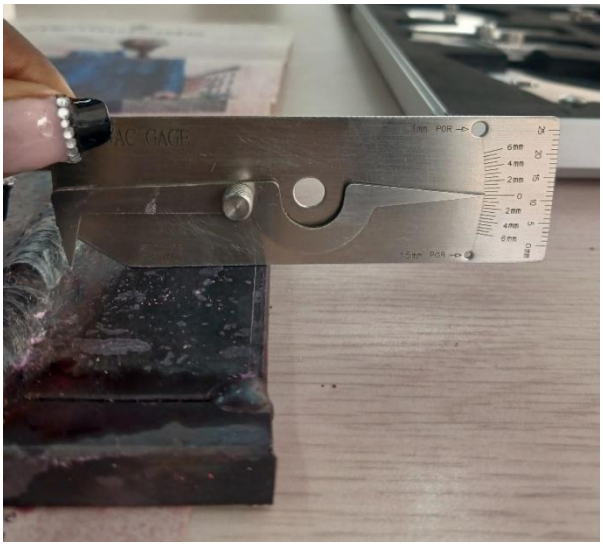
Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Medición del refuerzo de soldadura.



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Medición de profundidad de socavaciones.



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en las imágenes Figura 28 y Figura 29, se procedió a la verificación física de la junta soldada. Utilizando la galga D1.1-90, se midió el refuerzo del cordón para asegurar que se mantuviera dentro de los parámetros de diseño. Paralelamente, mediante la galga V-WAC, se inspeccionaron los bordes de la soldadura para descartar socavaciones que pudieran comprometer la sección transversal del material base (Figura 29).

5.3.3. Ultrasonido

Ultrasonido GE Technologies USM 35X: Es un instrumento de ensayo no destructivo (END) empleado en la industria para llevar a cabo inspecciones mediante ondas ultrasónicas. Este dispositivo, desarrollado por GE Technologies, se aplica en distintos procesos como la medición de espesores, la identificación de discontinuidades o fallas en materiales y la determinación de la velocidad de propagación del sonido. (Siris, 2019).

Figura 30. Ultrasonido USM 35X



Fuente: Elaboración propia

Accesorios y patrones de referencia: Para la ejecución del ensayo, se emplearon transductores específicos y bloques de calibración que garantizan la trazabilidad de las lecturas:

Figura 31. Accesorios y patrones de referencia para el ajuste del detector de fallas.



Fuente: Elaboración propia

Bloque Patrón Escalonado: Es la pieza metálica con diferentes grosores (marcados como .100, .200, .300, .400 y .500 pulgadas) situada en la parte inferior. Su función es la calibración de linealidad de espesores; permite que el equipo USM 35X reconozca con exactitud la velocidad del sonido en el material y ajuste la escala de la pantalla.

Transductor de ZAC Recto (2.25 MHz): Es el componente cilíndrico central. Se utiliza principalmente para medir espesores y detectar discontinuidades paralelas a la superficie, como laminaciones en el acero base A36 antes de soldar. La frecuencia de 2.25 MHz es ideal para materiales con grano grueso o espesores considerables debido a su capacidad de penetración.

Zapata de ZAC Angular: Es el bloque de acrílico negro y transparente a la izquierda. Al acoplarse con un transductor, cambia el ángulo de entrada de la onda (usualmente a 45°, 60° o 70°). Esto es indispensable para inspeccionar soldaduras, ya que permite que el sonido viaje en diagonal y "rebote" en las paredes de la junta para detectar faltas de fusión o grietas.

Transductor de ZAC Angular Miniatura: Es el componente pequeño con conector lateral rojo a la derecha. Su tamaño permite el acceso a zonas de difícil alcance y es el que se acopla a la zapata para realizar el barrido sobre la zona soldada.

5.3.4. Ejecución del Ensayo y Análisis de Señales

Una vez calibrado el equipo, se procedió a la inspección de las uniones soldadas en acero ASTM A36.

5.3.5. Aplicación del optocoplante y Escaneo (Figura 32)

En esta etapa, se aplicó el gel optoacoplante sobre la superficie de la probeta para garantizar la transmisión de las ondas sonoras. Se observa el uso del **transductor de ZAC angular** montado sobre la zapata, el cual se desliza lateralmente respecto al cordón de soldadura. Este movimiento permite que el ZAC de sonido atraviese la zona fundida y la zona afectada por el calor (ZAC) en busca de discontinuidades internas.

Figura 32. Aplicación del optoacoplante y escaneo.



Fuente: Elaboración propia

5.3.6. Interpretación de las Ondas

Figura 33. Representación de las ondas de ultrasonido y detección de ecos en la soldadura.



Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Análisis de señales para la localización de discontinuidades internas.



Fuente: Elaboración propia

En las imágenes Figura 33 y Figura 34, la pantalla muestra el comportamiento de las ondas de ultrasonido dentro de la pieza de acero A36. La lectura se divide en dos ejes: el vertical (qué tan fuerte es el eco) y el horizontal (qué tan lejos está el objeto que causa el eco).

Picos de la Onda: Cada pico amarillo es un "eco"
Si no hay defectos, el sonido viaja hasta el fondo y regresa.

Si aparece un pico antes de lo esperado (como se ve en la pantalla), significa que la onda chocó con algo en el camino, como un poro o una falta de fusión en la soldadura.

Altura de la Onda (Amplitud): Entre más alto sea el pico, más grande es la discontinuidad que encontró el sonido o mejor es el reflejo que está recibiendo el equipo.

Ubicación del Pico (Eje Horizontal): La posición del pico de izquierda a derecha nos dice la profundidad.

La Línea Roja (Umbral): Es una guía visual. Todo pico que supere esa línea es considerado una señal importante que debe ser analizada para decidir si la soldadura pasa o falla según la norma aplicada.

De acuerdo con las ondas obtenidas el análisis del gráfico revela la presencia de discontinuidades internas en la junta soldada del material, mostradas con picos de reflexión que aparecen antes del eco de fondo esperado. La posición de estas ondas indica que las imperfecciones se localizan a una profundidad aproximada de 0.209 pulgadas (valor Sa), mientras que la necesidad de ajustar la sensibilidad a 57.5 dB sugiere que se trata de hallazgos pequeños, como porosidad o inclusiones de escoria propias del proceso de soldadura.

5.4. PREPARACIÓN DE PROBETAS

Una vez realizada la inspección y los ensayos no destructivos, se procedió al corte mecánico de la placa soldada para la obtención de las probetas de estudio (Figura 35). Se realizaron cortes transversales perpendiculares al cordón de soldadura, descartando los extremos de inicio y fin del arco debido a la inestabilidad térmica

propia de esos puntos. Como resultado, se extrajeron tres probetas que representan la zona central de la junta.

Figura 35. Seccionamiento transversal de la placa soldada y obtención de las tres probetas.



Fuente: Elaboración propia

Tras retirar los extremos de inicio y fin del arco, se obtuvieron las tres probetas definitivas con dimensiones (Figura 36). Cada una de estas muestras individuales conserva la geometría transversal necesaria para evaluar de manera aislada el comportamiento del metal base, la zona afectada por el calor.

Figura 36. Probetas transversales definitivas preparadas para los ensayos de caracterización mecánica y microestructural.



Fuente: Elaboración propia

5.4.1. Preparación metalográfica.

Preparación Superficial mediante Desbaste Graneado (Lijado): Con las muestras obtenidas, se realizó una separación: una probeta se mantuvo sin modificaciones superficiales con el fin de someterla directamente al tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT). Por otro lado, las dos probetas restantes se destinaron a la

preparación metalográfica inmediata, procediendo con el desbaste en una sola de sus caras transversales. Este proceso se ejecutó de manera secuencial utilizando papel de lija de carburo de silicio en una serie descendente de granulometría: 80, 150, 220, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 y 2500. El avance gradual entre lijas permitió eliminar las marcas severas del corte mecánico y reducir las irregularidades superficiales de forma controlada, preparando la cara evaluada para las posteriores etapas de pulido.

Figura 37. Probetas soldadas tras la etapa de desbaste graneado, mostrando un acabado superficial uniforme y libre de marcas de corte



Fuente: Elaboración propia

El resultado del proceso de desbaste secuencial se presenta en la Figura 37, donde se aprecian las dos probetas con una de sus caras transversales completamente

homogeneizada. La eliminación de las rayas superficiales profundas permite distinguir visualmente la geometría real del cordón de soldadura SMAW y su delimitación con el acero estructural ASTM A36, dejando la superficie en condiciones óptimas para el posterior pulido fino con alúmina y el ataque químico metalográfico.

5.4.2. Sistema de esmerilado y pulido Metkon Forcipol 2V

Figura 38. Sistema de esmerilado y pulido metalográfico Metkon Forcipol 2V.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía Edificio Techne piso 2, 2026).

Para la obtención del acabado espejo en las probetas, se utilizó el sistema de esmerilado y pulido Metkon Forcipol 2V (Figura 33). Este equipo está diseñado para el desbaste, lapeado y pulido de muestras metalográficas mediante dos discos giratorios independientes que ofrecen velocidades de rotación constantes, dobles o infinitamente variables.

El sistema cuenta con platos montados sobre cojinetes y rodamientos de bolas de alta resistencia, una característica mecánica que absorbe las fuerzas y proporciona un funcionamiento completamente libre de vibraciones. Esto permite aplicar altas presiones manuales de forma segura para preparar especímenes de dimensiones considerables, como las secciones transversales de la junta soldada bajo estudio. Asimismo, el equipo es compatible con discos magnéticos y respaldados con paños de intercambio rápido, optimizando los tiempos de transición entre el uso de diferentes granulometrías de abrasivos y la suspensión de alúmina. (Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2019)

Pulido Metalográfico de las probetas sin tratamiento térmico:

Posterior al proceso de desbaste, las dos probetas destinadas al análisis inicial se sometieron a un pulido fino utilizando una pulidora-desbastadora metalográfica marca Metkan Forcipol 2V (Figura 39). Para esta etapa, se empleó un paño de pulido húmedo acoplado al plato giratorio y se aplicó de forma gradual una suspensión de alúmina (óxido de aluminio) como agente abrasivo. El procedimiento se ejecutó ejerciendo una presión manual uniforme sobre la cara desbastada de las probetas de acero ASTM A36, logrando eliminar por completo las micro-rayas remanentes del lijado hasta alcanzar un acabado superficial tipo espejo.

Figura 39. Acabado superficial tipo espejo en las probetas transversales tras el pulido con alúmina.



Fuente: Elaboración propia

Como resultado final de la etapa de preparación metalográfica, en la Figura 34 se observa el acabado superficial tipo espejo alcanzado en las caras transversales de ambas probetas. Este nivel de pulido elimina la distorsión visual provocada por el corte y el desbaste manual, garantizando una superficie óptima para revelar la microestructura del acero ASTM A36 mediante el ataque químico.

5.4.3. Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura (PWHT)

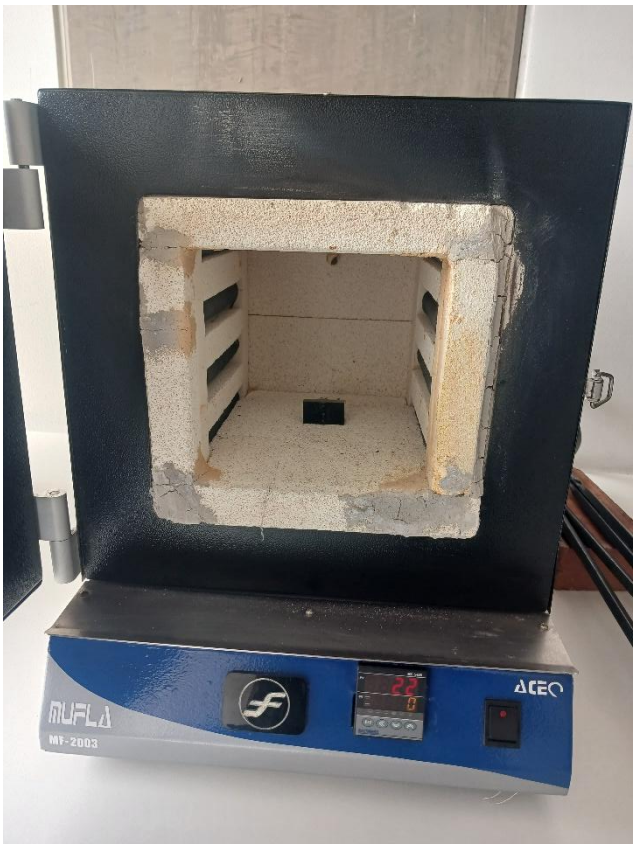
Horno Mufla ACEO MF-2003

Figura 40. Horno mufla ACEO MF-2003 utilizado para el tratamiento térmico (PWHT).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografia, Edificio Techne piso 2, 2026).

Figura 41. Posicionamiento de la probeta experimental en el centro de la cámara del horno mufla ACEO MF-2003 antes de iniciar el ciclo térmico.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografia, Edificio Techne piso 2, 2026).

Para garantizar la correcta distribución del flujo térmico durante el tratamiento de alivio de tensiones (PWHT), la probeta se posicionó de manera concéntrica en el centro de la cámara de combustión del horno mufla, tal como se ilustra en la Figura 41. Esta ubicación evita el contacto directo de la muestra con las paredes refractarias y las resistencias eléctricas laterales, asegurando una transferencia de calor homogénea por radiación y convección.

Ciclo Térmico y Parámetros del PWHT según AWS D1.1:

El tratamiento térmico de alivio de tensiones se dimensionó con base en las directrices del código AWS D1.1 para aceros estructurales bajos en carbono ASTM A36. Utilizando un calibrador pie de rey, se determinó un espesor nominal de la junta de 9.5 mm. Aplicando la ecuación de tiempo de sostenimiento prescrita por la norma:

$$t = \frac{e}{25}$$

Formula del tiempo de mantenimiento

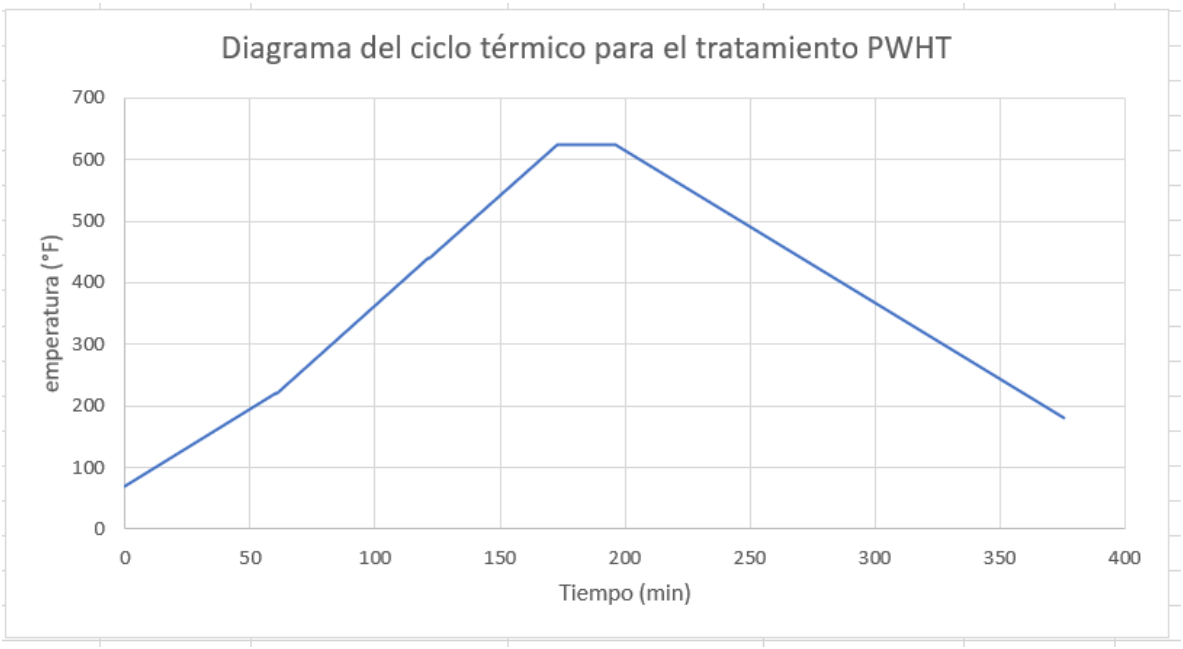
Donde t representa el tiempo en horas y e el espesor en milímetros, se obtuvo un valor de 22.58 minutos, aproximado operacionalmente a 23 minutos de mantenimiento térmico. La temperatura de sostenimiento se fijó en 625°F posicionándose en el rango óptimo estipulado por el código (600°F – 650°F).
Debido a las tasas impuestas de calentamiento controladas a 220°F/h el ciclo se programó mediante tres rampas ascendentes consecutivas con breves mesetas de estabilización de 1 minuto.

Tabla 2. Parámetros del ciclo térmico para el tratamiento PWHT.

Punto	Etapa	Tiempo de la etapa (minutos)	Tiempo Acumulado	Temperatura (°F)
0	Inicio	0	0 min (0h 00m)	70 (Ambiente)
1	Fin Rampa 1	60	60 min (1h 00m)	220
2	Sostenimiento 1	1	61 min (1h 01m)	220
3	Fin Rampa 2	60	121 min (2h 01m)	440 (220 + 220 de subida)
4	Sostenimiento 2	1	122 min (2h 02m)	440
5	Fin Rampa 3	51	173 min (2h 53m)	625 (440 + 185 de subida)
6	Sostenimiento PWHT	23	196 min (3h 16m)	625 (Tiempo de remojo)
7	Enfriamiento	Variable	180 min	376 (tiempo total acumulado)

Fuente: Elaboración propia (con base en los parámetros de programación y diseño según AWS D1.1, 2026).

Figura 42. Diagrama del ciclo térmico (Rampas, Sostenimiento y Enfriamiento) para el tratamiento PWHT.



Fuente: Elaboración propia (2026).

En la Figura 42 se detalla de forma gráfica la evolución de la temperatura en función del tiempo para el tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT) ejecutado en la muestra de acero ASTM A36. El perfil térmico se compone de tres etapas:

Etapa de Calentamiento Controlado (Minuto 0 al 173): Se observa un incremento escalonado de la temperatura que inicia desde las condiciones ambientales (70°F Aproximado) Las variaciones en la pendiente reflejan las tasas de calentamiento programadas a 220°F/h con sus respectivas mesetas de estabilización de un minuto, seguidas por una última rampa de 185°F ejecutada en 51 minutos alcanzando objetivo térmico.

Etapa de Sostenimiento Isotérmico (Minuto 173 al 196): Representada por la meseta horizontal en la cúspide de la gráfica a una temperatura constante de 625°F Esta fase se mantuvo activa durante los 23 minutos calculados previamente con la fórmula de tiempo de mantenimiento.

Etapa de Enfriamiento Continuo (Minuto 196 al 376): Tras apagar las resistencias del horno y mantener la compuerta entreabierta, se evidencia una rampa descendente continua y prolongada de 180 minutos (3 horas). Este descenso térmico controlado evitó choques térmicos en la unión soldada, concluyendo el ciclo completo de tratamiento tras un tiempo total acumulado de 376 minutos.

5.5. SELECCIÓN DE MUESTRAS Y ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

De las dos probetas preparadas en estado sin tratamiento térmico (sin PWHT), se seleccionó una muestra representativa para someterla a ataque químico y posterior análisis metalográfico, reservando la segunda como réplica de respaldo. Asimismo, la muestra Con PWHT se integró al proceso de caracterización para evaluar comparativamente los cambios microestructurales e influencias del calor en la junta soldada.

5.5.1. Estereomicroscopio ZEISS

Para la inspección macroscópica de las muestras en estado de pulido, y previo al ataque químico, se utilizó un estereomicroscopio marca ZEISS (Figura 43). Este equipo cuenta con un sistema de iluminación anular LED incidente que distribuye la luz de forma uniforme sobre la cara pulida. Su diseño óptico de bajo aumento y amplia profundidad de campo permite analizar la integridad superficial general de la unión soldada SMAW, ratificando la calidad de la preparación metalográfica y

asegurando la ausencia macroscópica de discontinuidades antes de proceder a la revelación de la microestructura mediante reactivos químicos.

Figura 43. Estereomicroscopio ZEISS con sistema de iluminación anular LED utilizado para el control de calidad superficial y validación del pulido de las probetas antes del ataque químico.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

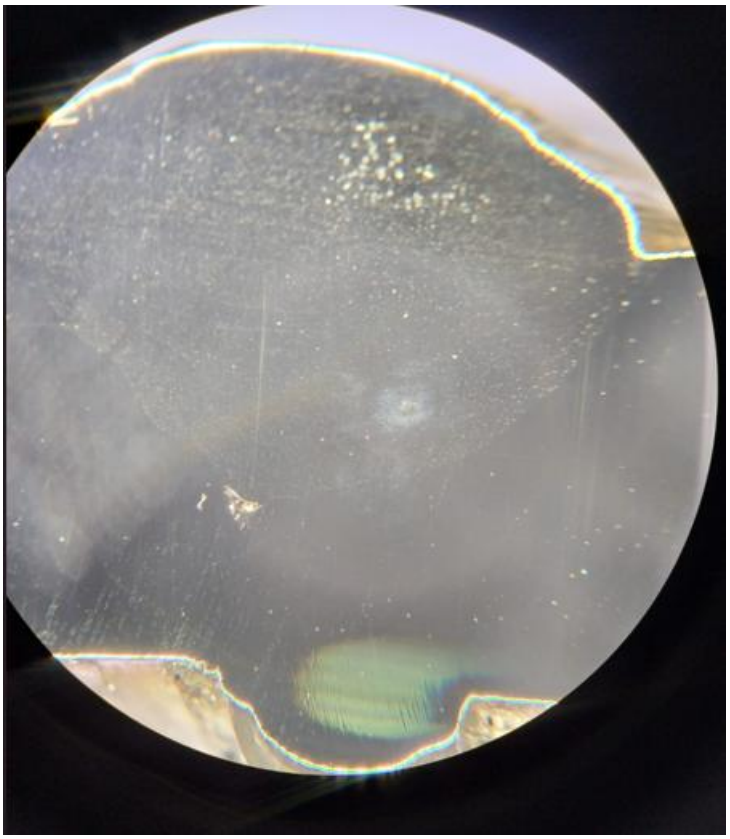
5.5.2. Micrografía de la Muestra pulida sin PWHT sin Ataque químico

Como fase de control previa a la caracterización microestructural, la superficie pulida de la probeta transversal sin tratamiento térmico posterior a la soldadura fue inspeccionada en el estereomicroscopio ZEISS. En la Figura 44 y Figura 45 se

presenta una vista general a un aumento de 5X de la probeta, donde se ratifica la obtención de un acabado superficial tipo espejo.

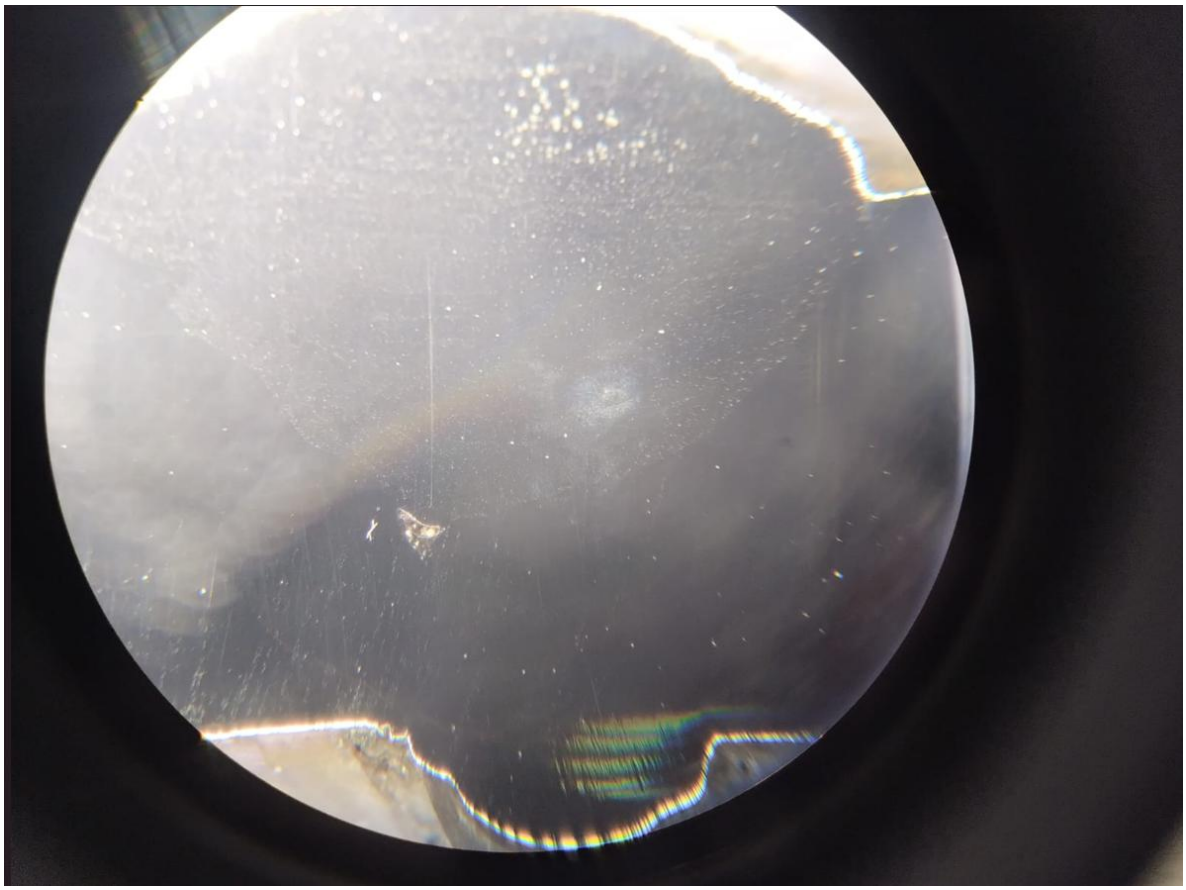
Esta inspección permite descartar la presencia macroscópica de discontinuidades superficiales, grietas o inclusiones de escoria atrapada de gran tamaño antes de la aplicación del reactivo químico, las cuales podrían enmascarar los resultados del análisis. Aunque se aprecian trazas abrasivas residuales micrométricas muy finas resultantes del proceso de pulido con alúmina, la superficie presenta un brillo metálico homogéneo.

Figura 44. Micrografía general de control de la superficie pulida especular (sin ataque químico) de la probeta en acero ASTM A36 sin PWHT. Se observa la orilla de la muestra en la parte inferior del campo de visión. Aumento: 5X.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

Figura 45. Vista microscópica adicional de control superficial de la probeta sin ataque químico. Se aprecia el acabado tipo espejo y la dispersión de luz en el borde inferior. Aumento: 5X.



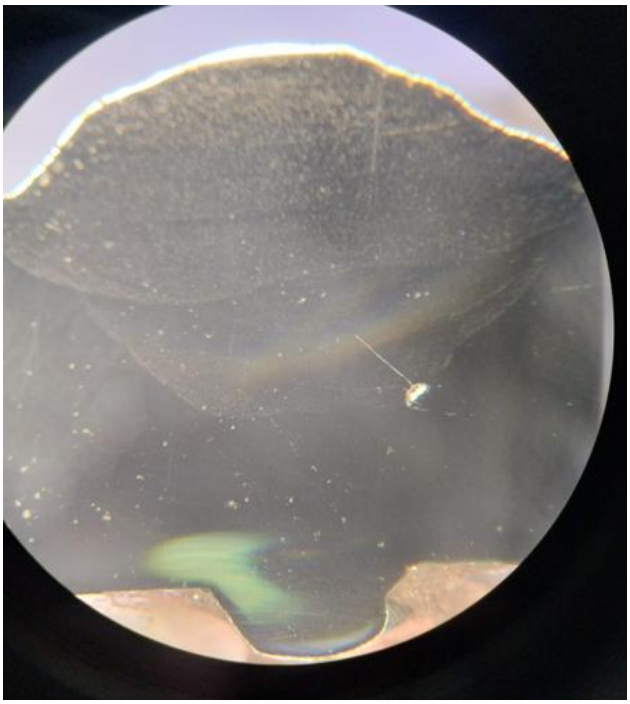
Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

5.5.3. Micrografía de la Muestra pulida con PWHT sin Ataque químico

Como paso previo a la caracterización microestructural de la probeta sometida al ciclo térmico de alivio de tensiones (Con PWHT), se realizó la inspección de control en el estereomicroscopio ZEISS para validar la preparación superficial. En la Figura 46 se observa la muestra de acero ASTM A36 a un aumento de 5X en condición de pulido especular.

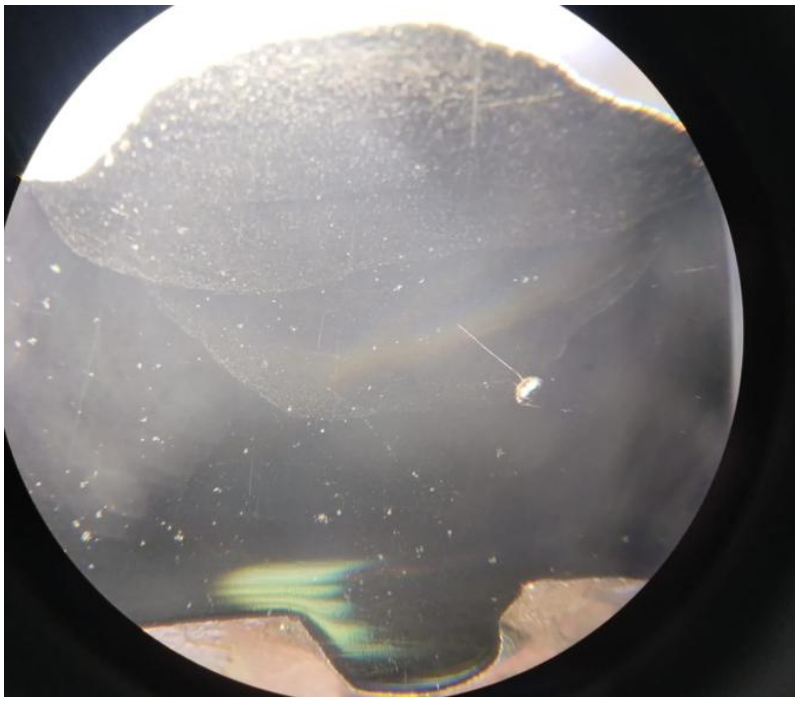
La imagen muestra la homogeneidad del acabado pulido o discontinuidades severas derivadas del proceso de soldadura SMAW o del tratamiento térmico.

Figura 46. Vista estereoscópica de la probeta SMAW en acero ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT) en estado de pulido sin ataque químico. Aumento: 5X.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

Figura 47. Vista microscópica adicional de control superficial de la probeta sin ataque químico y con PWHT. Aumento: 5X.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

5.6. PROCEDIMIENTO DE ATAQUE QUÍMICO CON NITAL 5% PARA CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA

5.6.1. Preparación del Reactivo Químico (Nital 5%)

Para el revelado de la microestructura y la delimitación de los límites de grano en las juntas soldadas de acero ASTM A36, se utilizó como reactivo ataque químico Nital al 5% (mezcla de ácido nítrico concentrado al 5% en volumen solubilizado en alcohol etílico). En la Figura 48 se muestra la disposición de laboratorio empleada

durante este procedimiento, incluyendo un balón aforado de 100ml con el reactivo preparado, un cristalizador o caja de Petri para la posterior inmersión o aplicación del reactivo sobre las probetas, y elementos auxiliares de manipulación para evitar la contaminación cruzada de las muestras.

Figura 48. Disposición de laboratorio para la preparación y manipulación del reactivo Nital al 5% utilizado en el ataque químico metalográfico.



Fuente: Autoría propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

5.6.2. Procedimiento Experimental de Ataque Químico

El ataque metalográfico para el revelado microestructural de las juntas soldadas se llevó a cabo mediante la técnica de inmersión controlada en la solución de Nital al 5%. El procedimiento experimental se ejecutó de la siguiente manera:

Inmersión y Ataque: La probeta transversal se sujetó firmemente por la parte no pulida y se sumergió la cara con acabado especular en la caja de Petri tres veces consecutivas. En la tercera inmersión, la muestra se sostuvo sumergida en el reactivo de manera ininterrumpida durante un tiempo de 10 segundos, garantizando un contacto homogéneo entre el ácido nítrico y la superficie metálica.

Neutralización y Limpieza: Transcurridos los 10 segundos de ataque, la probeta se retiró del reactivo e inmediatamente se enjuagó y aclaró con abundante agua corriente para detener la acción química del ácido, evitando el sobreataque o la oxidación no deseada de la superficie.

5.6.3. Análisis Microestructural con Microscopio Metalográfico Invertido ZEISS

Tras la ejecución del ataque químico con Nital al 5%, las probetas transversales con y sin PWHT se posicionaron en un microscopio metalográfico invertido ZEISS (Figura 49) para la inspección de la microestructura.

Este equipo ubica el objetivo óptico y la iluminación por reflexión por debajo de la platina portaobjetos, lo que permite posicionar especímenes metálicos opacos apoyando directamente su cara pulida y atacada sin riesgo de desalineación óptica. Mediante el sistema digital acoplado, este dispositivo permite caracterizar detalladamente la morfología de grano y las fases presentes (ferrita y perlita) en las

distintas regiones de la junta soldada: metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y metal de soldadura (MS).

Figura 49. Microscopio metalográfico invertido ZEISS utilizado para la caracterización microestructural de las probetas atacadas químicamente con Nital 5%.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

Figura 50. Posicionamiento de la probeta transversal de acero ASTM A36 sobre la platina del microscopio metalográfico invertido ZEISS para la observación microestructural tras el ataque químico.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografia, 2026).

Para el análisis detallado y la documentación fotográfica de la microestructura, el microscopio metalográfico invertido ZEISS se conectó a una cámara digital de alta resolución acoplada a un sistema de pantallas auxiliares (Figura 51). Esta configuración permite proyectar la imagen en tiempo real a mayor escala, facilitando la identificación precisa de los granos de ferrita y perlita, el ajuste fino del enfoque y la delimitación de las zonas de la unión soldada antes de proceder a la captura digital de las micrografías.

Figura 51. Sistema digital de imagen acoplado al microscopio metalográfico invertido ZEISS para la observación y captura de micrografías en tiempo real.



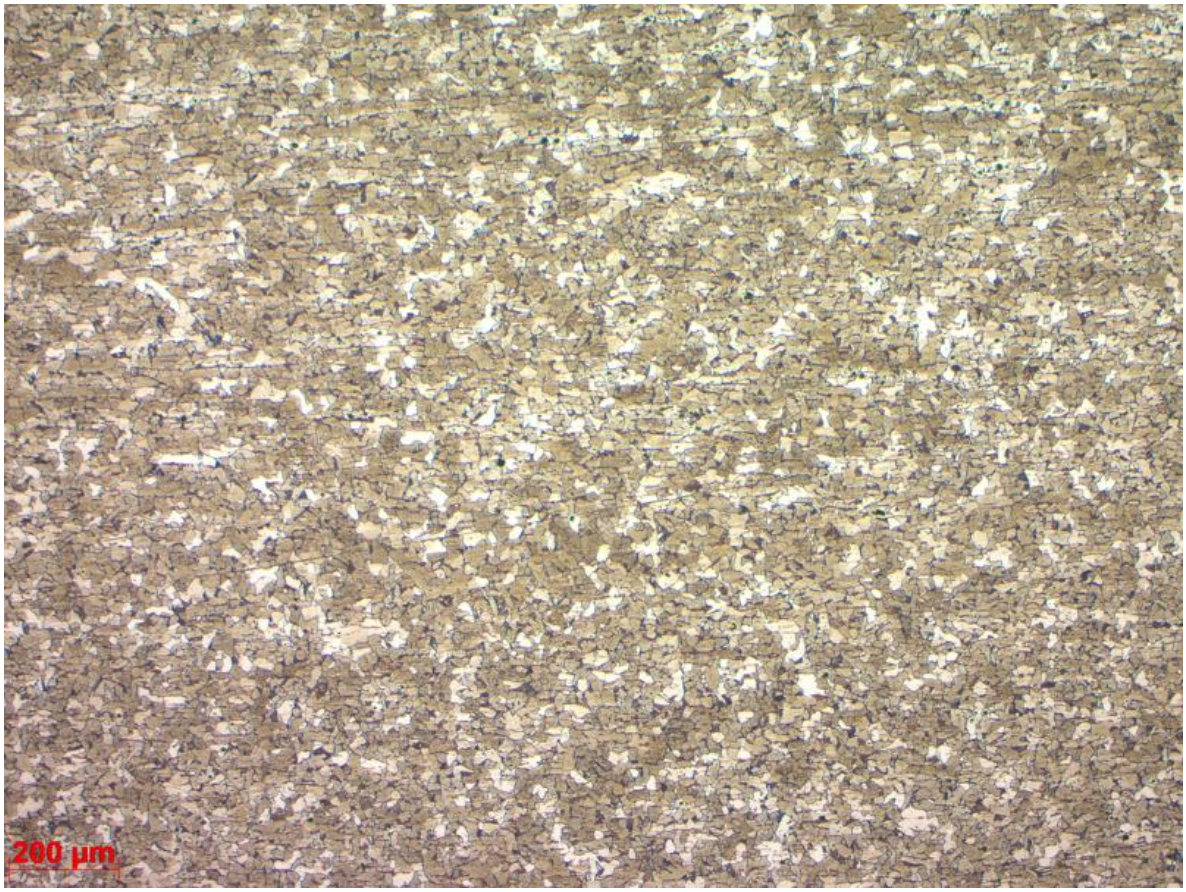
Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

5.7. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA PROBETA CON TRATAMIENTO TÉRMICO (PWHT)

5.7.1. Zona del Material base

Se presenta la micrografía a 50X (escala gráfica de 200) del Metal Base (MB) de la probeta de acero estructural ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT), tras ser atacada químicamente con Nital al 5%. La microestructura revela una matriz bifásica homogénea y perfectamente equilibrada, propia de un acero hipoeutectoide de bajo carbono, constituida predominantemente por granos claros de ferrita (α) y colonias oscuras de perlita intercaladas de forma uniforme. Se aprecian granos de geometría equiaxial con un tamaño medio-fino bien definido sin orientaciones preferenciales ni bandeado marcado.

Figura 52. Micrografía panorámica del Metal Base (MB) en acero ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT) mostrando la matriz ferrítico-perlítica de granos equiaxiales. Aumento: 50X (Escala: 200µm)

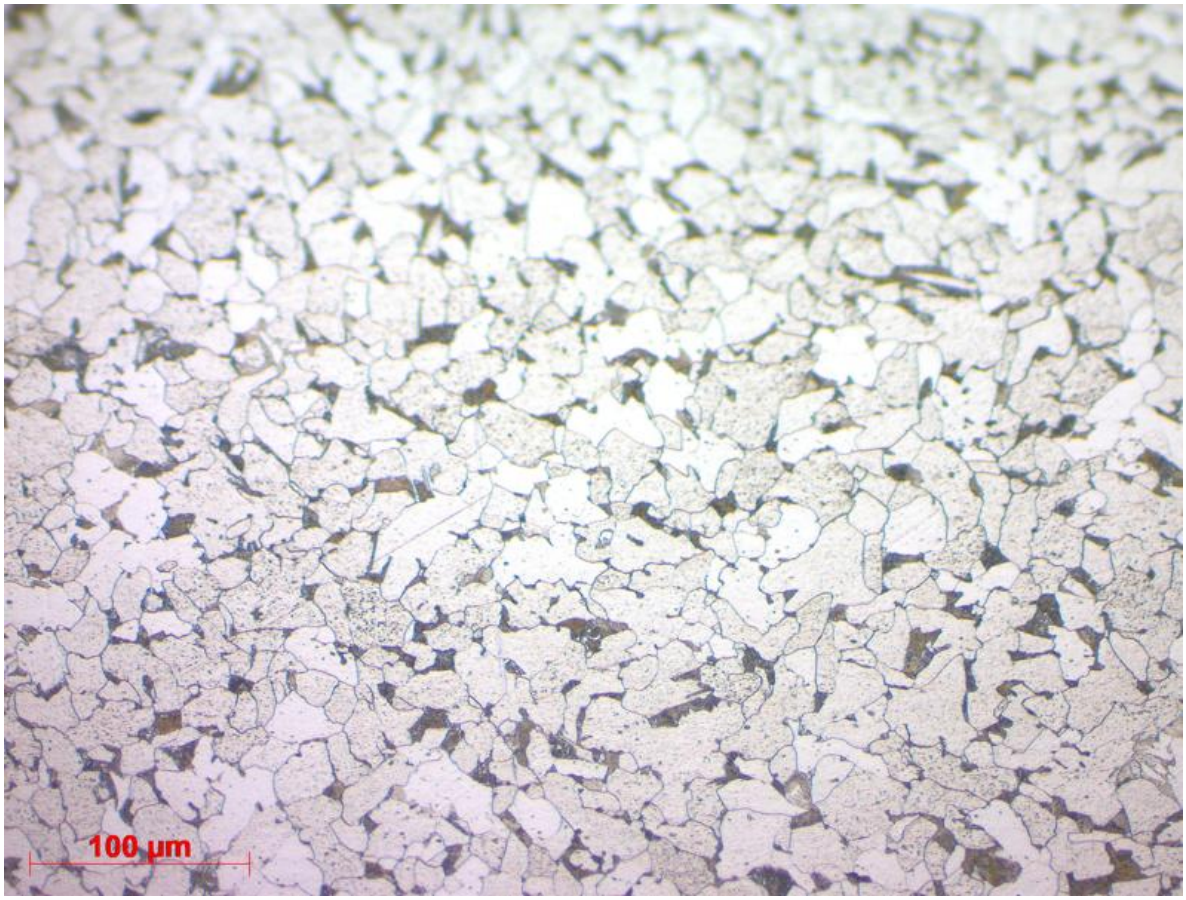


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografia, 2026).

En la Figura 52 se aprecia la micrografía a 100X (escala gráfica de 100 µm) de la misma zona del Metal Base (MB) en la probeta de acero ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT). Al aumentar la resolución, se delimitan con mayor nitidez los bordes de grano ferríticos de morfología equiaxial y se distingue con claridad la distribución intergranular de las colonias de perlita (zonas oscuras), confirmando la microestructura bifásica característica del acero estructural A36 donde predomina la fase dúctil de ferrita (α). La nitidez de los límites de grano refleja que el alivio de

tensiones post-soldadura mantuvo la estabilidad dimensional de la matriz sin generar distorsiones ni crecimiento de grano.

Figura 53. Micrografía a detalle del Metal Base (MB) en acero ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT) donde se distinguen los límites de grano ferríticos equiaxiales y colonias perlíteras. Aumento: 100X (Escala: 100µm).

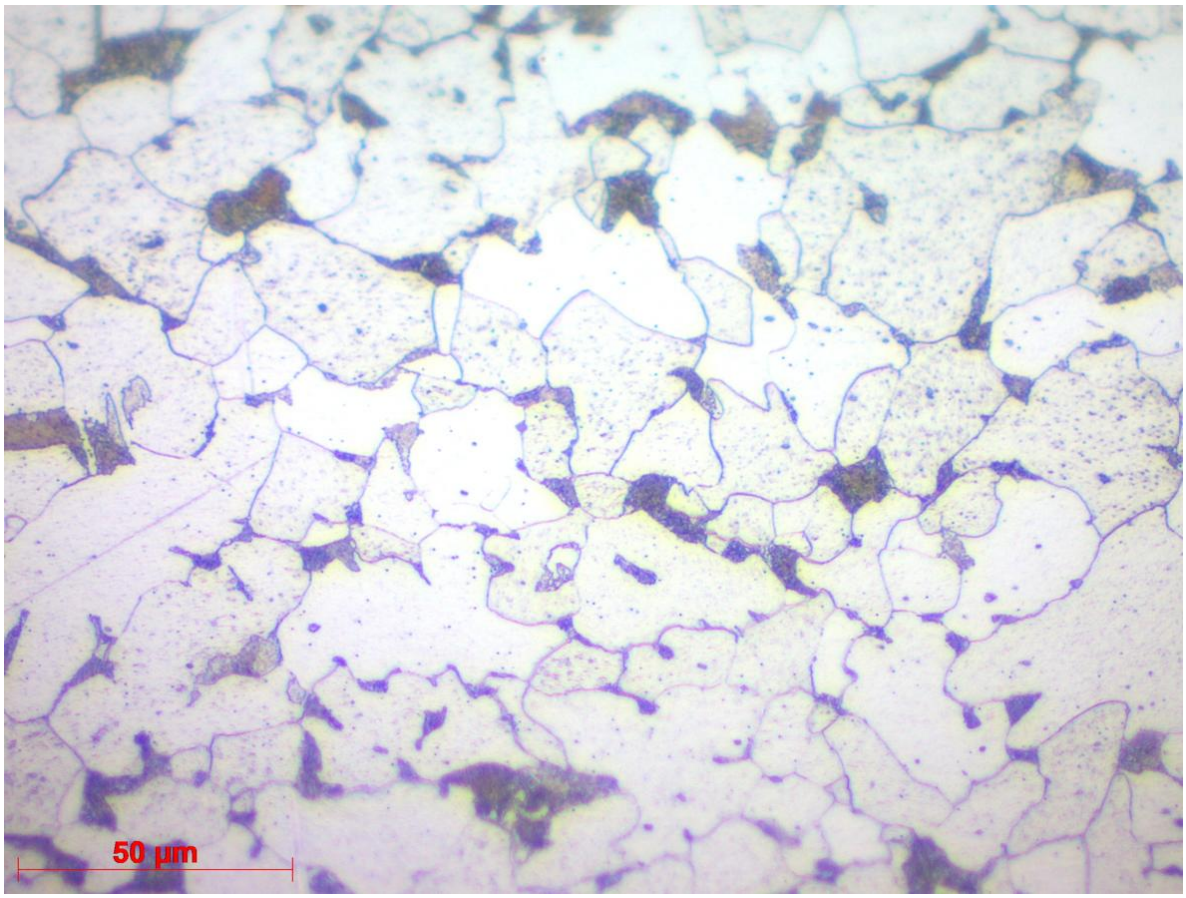


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografia, 2026).

En la Figura 53 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) de la zona del Metal Base (MB) correspondiente a la probeta de acero ASTM A36 con tratamiento térmico (PWHT). A este nivel de magnificación se observa la continuidad de los límites de grano de la matriz ferrítica (fase clara) y la distribución de las

colonias perlíteras (fase oscura) alojadas en las intersecciones y fronteras intergranulares.

Figura 54. Micrografía a detalle del Metal Base (MB) con PWHT en acero ASTM A36, donde se distinguen la matriz ferrítica de morfología equiaxial y colonias de perlita intergranulares. Aumento: 200X (Escala: 50 µm)

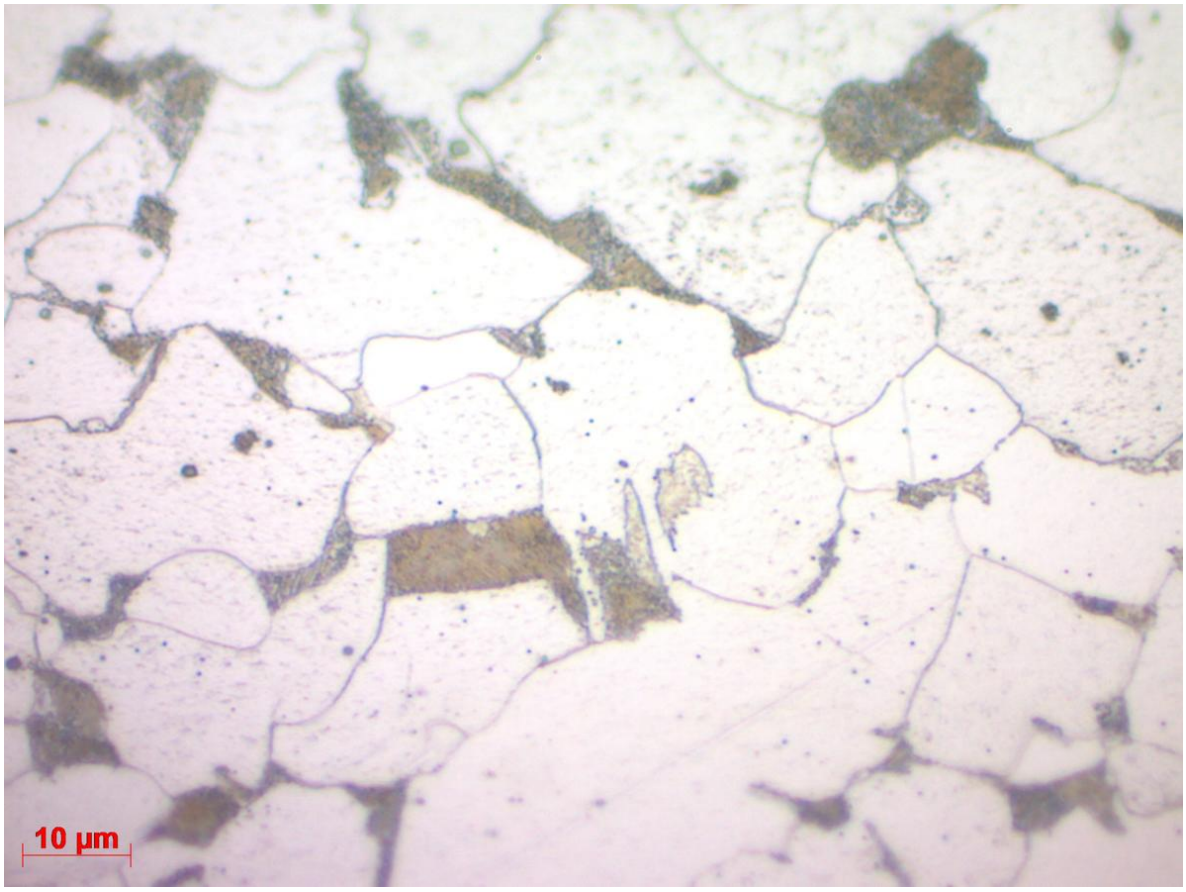


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 54 se aprecia la micrografía a 500X (escala gráfica de 10\ µm) de la zona del Metal Base (MB) en la probeta. A este nivel de magnificación se observa con alta definición la delimitación de los límites de grano ferríticos (fase clara) y la morfología interna de las colonias perlíteras (fase oscura) compuestas por la mezcla

laminar de| ferrita y cementita (Fe_3C). Se evidencia una definición de los contornos intergranulares y una estructura totalmente estabilizada. Mediante la estimación visual por comparación cualitativa según la norma ASTM E112, la matriz presenta un número de tamaño de grano clasificado entre ASTM 7 y ASTM 8, correspondiente a un diámetro medio de grano aproximado de 25 µm a 30 µm.

Figura 55. Micrografía a alta magnificación del Metal Base (MB) con PWHT en acero ASTM A36, donde se observan en detalle los límites de grano ferríticos y las colonias perlíteras de estructura laminar. Aumento: 500X (Escala: 10 µm)

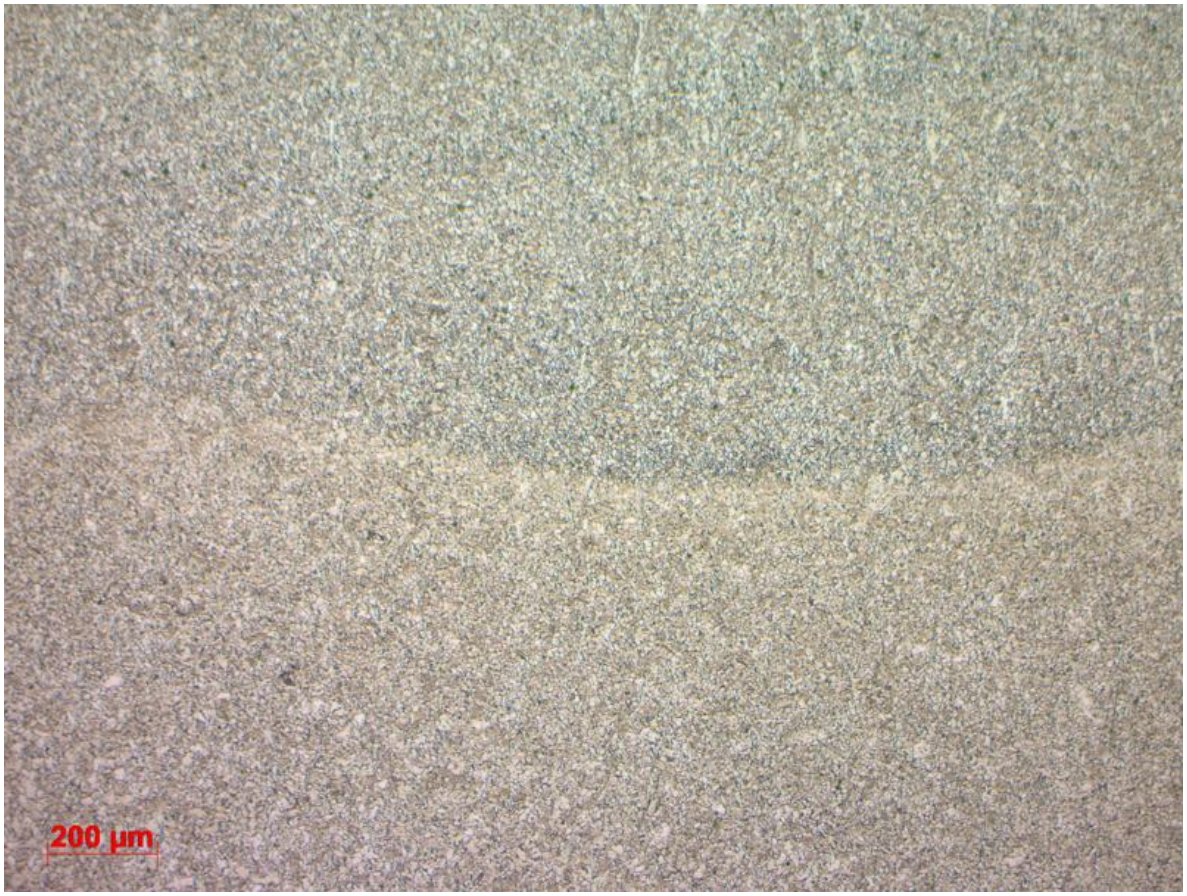


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

5.7.2. Zona de raíz

En la Figura 56 se presenta la micrografía panorámica a 500X (escala gráfica de 200 µm) correspondiente a la zona de la raíz del cordón de soldadura en la probeta con tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se observa la interfaz de fusión y la transición microestructural característica del primer pase de soldadura. La estructura muestra una matriz refinada compuesta por ferrita acicular y ferrita de contorno de grano junto con colonias perlíteras finas, consecuencia del efecto de recalentamiento inducido por los pases posteriores de soldadura (efecto de normalizado) sumado a la homogenización lograda durante el proceso de PWHT.

Figura 56. Micrografía panorámica de la zona de raíz del cordón de soldadura en la probeta con PWHT, mostrando la refinación microestructural y la interfaz de transición. Aumento: 50X (Escala: 200 µm)



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 57 se aprecia la micrografía a 100X (escala gráfica de 100 µm) correspondiente a la zona de raíz de la junta soldada con tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se distingue una microestructura fina e isótropa producto de los ciclos térmicos superpuestos y la posterior homogenización por PWHT. Se observa una red continua de ferrita primaria en los bordes junto a ferrita acicular y colonias de perlita fina dispersas uniformemente.

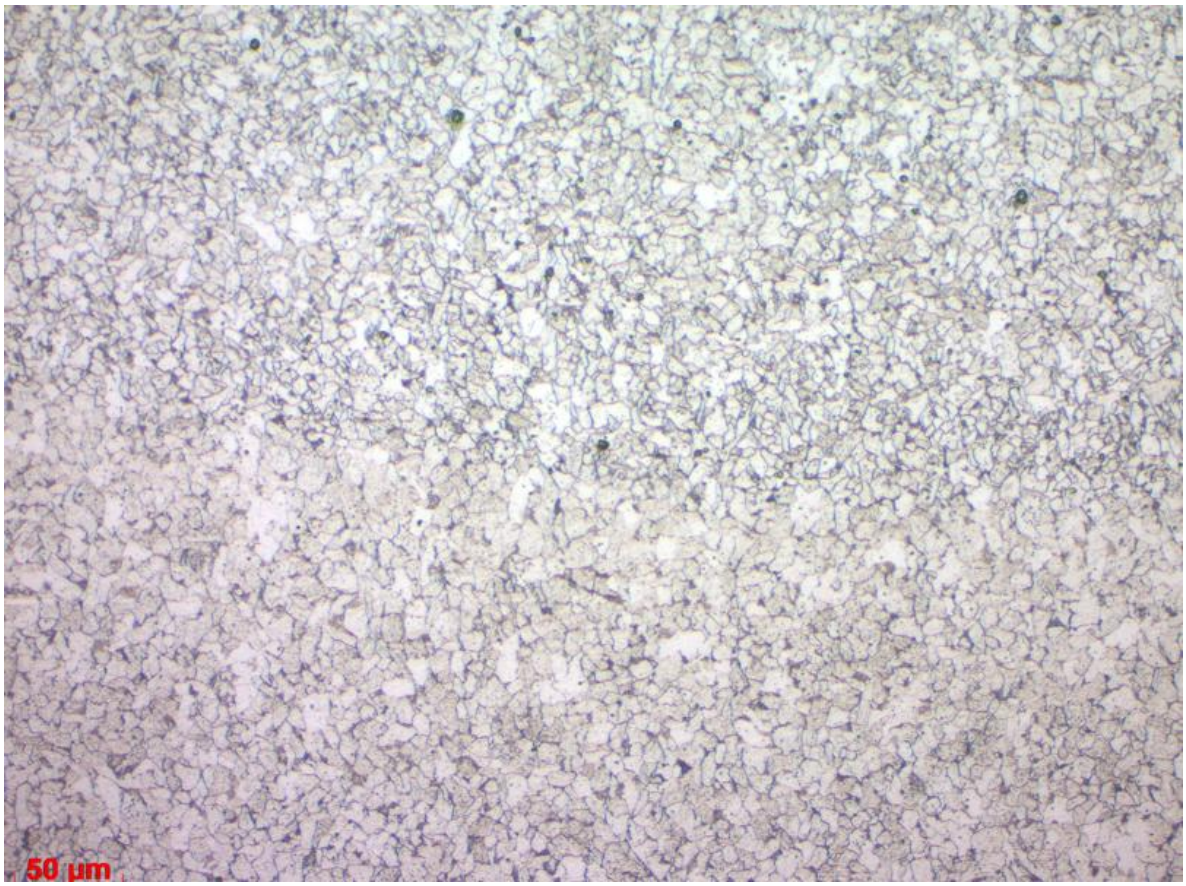
Figura 57. Micrografía de la zona de raíz del cordón de soldadura con PWHT, destacando una microestructura refinada de ferrita y perlita fina. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 58 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) de la zona de raíz en la junta soldada. A este aumento se observa una matriz homogénea y de grano equiaxial fino, dominada por la fase ferrítica (zonas claras) con pequeñas colonias de perlita (zonas oscuras) distribuidas intergranularmente. Esta morfología confirma que el ciclo térmico de la soldadura de pases múltiples, sumado al posterior alivio de tensiones (PWHT), eliminó la estructura dendrítica original de solidificación en la raíz, logrando una notable recristalización y tenacidad en el fondo de la junta.

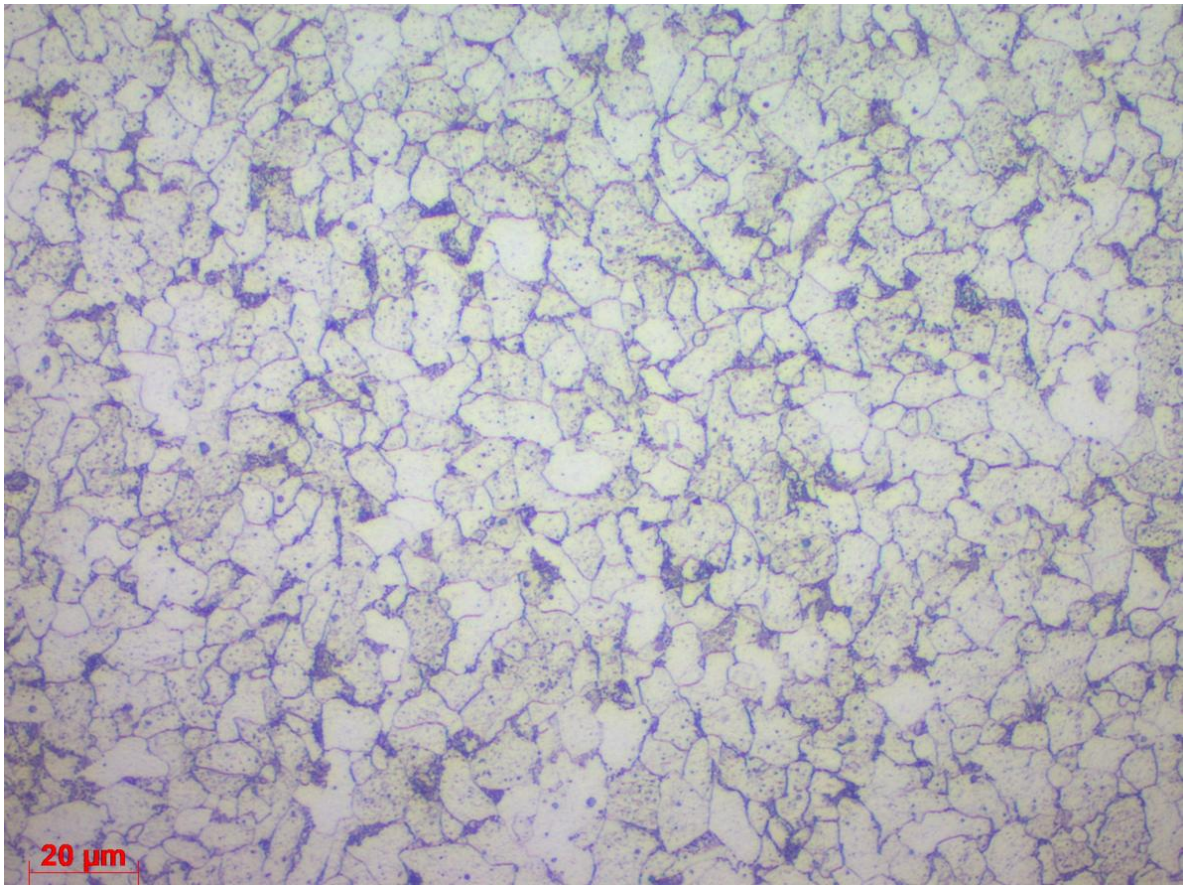
Figura 58. Micrografía a detalle de la zona de raíz con PWHT, evidenciando una estructura recristalizada y fina de ferrita y perlita. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 59 se muestra la micrografía a 500X (escala gráfica de 20 µm) de la zona de raíz en la probeta con tratamiento térmico (PWHT). A esta magnificación se aprecia con elevada resolución el refinamiento de la estructura, constituida por una matriz de granos ferríticos poligonales/equiaxiales bien delimitados y pequeñas islas de perlita situadas en los bordes e intersecciones intergranulares. La clara definición de las fronteras de grano y la ausencia de fases frágiles o tensionadas confirman la completa recristalización y homogenización lograda en el fondo de la bisel mediante el PWHT.

Figura 59. Micrografía a alta resolución de la zona de raíz con PWHT, mostrando granos ferríticos recristalizados y colonias perlíteras delgadas intergranulares. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).

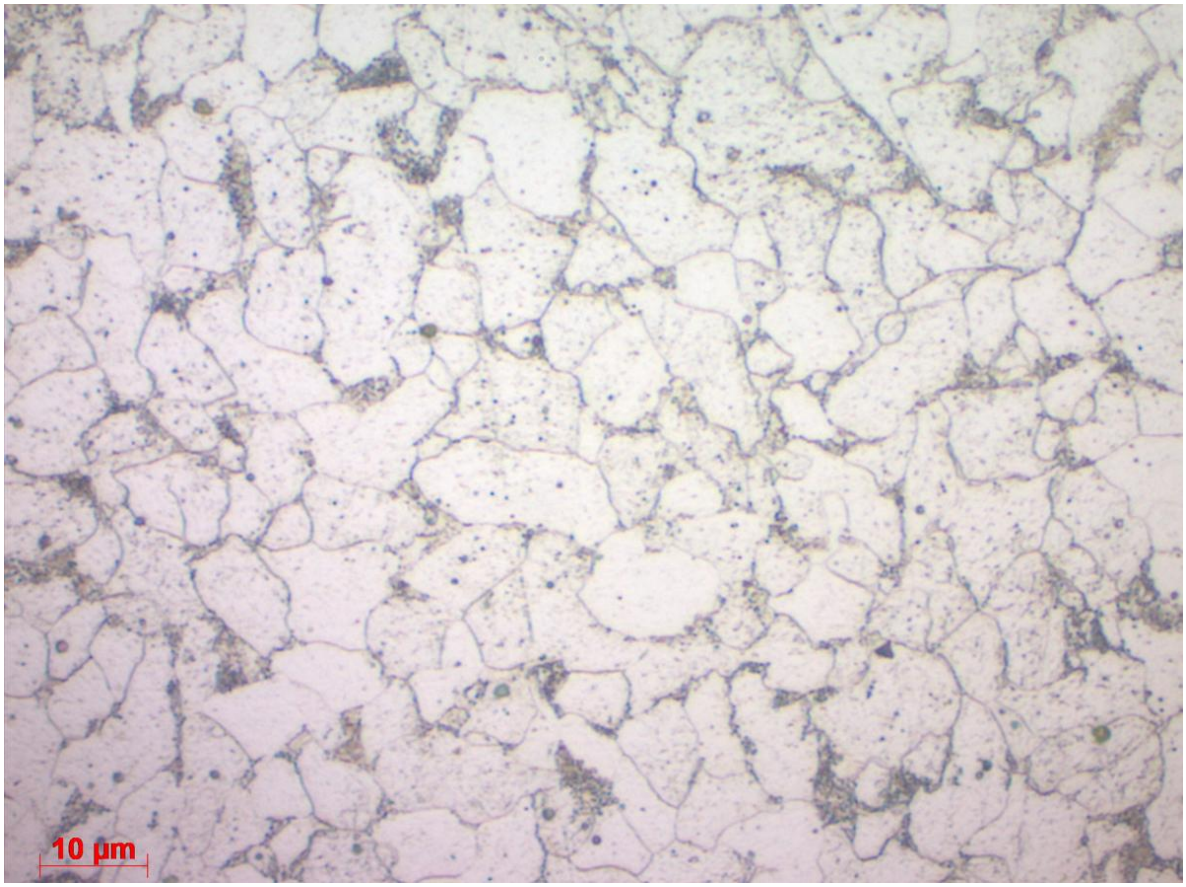


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 60 se aprecia la micrografía a máxima magnificación de 1000X (escala gráfica de 10 µm) en la zona de raíz de la probeta sometida a tratamiento térmico (PWHT). A este nivel de detalle se distinguen con precisión los contornos de los granos ferríticos poligonales y las finas colonias de perlita distribuidas en los bordes e intersecciones de grano. Tomando como referencia la escala integrada de 10 µm, se observa que el diámetro promedio de los granos oscila entre 5 µm y 8 µm, lo cual

equivale a un número de tamaño de grano ASTM 11 a 12 según la norma ASTM E112.

Figura 60. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la zona de raíz con PWHT, mostrando granos ferríticos ultrafinos recristalizados y perlita en límites de grano. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).

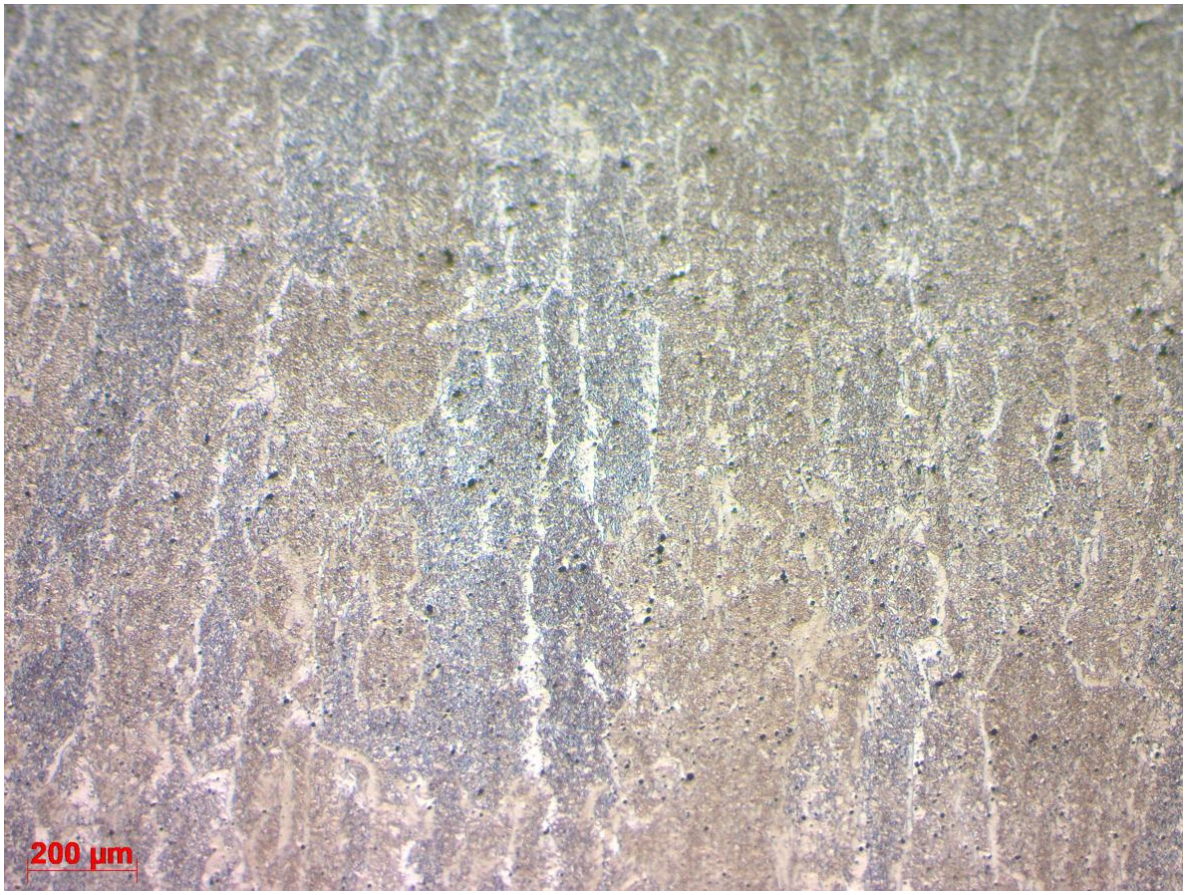


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

5.7.3. Zona de relleno de soldadura

En la Figura 61 se muestra la vista panorámica a 50X (escala gráfica de 200 µm) del Metal de Soldadura (MS) en la zona de relleno de la probeta con tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se observa una morfología orientada columnar/dendrítica alineada en la dirección del flujo térmico durante la solidificación, caracterizada por vetas de ferrita de contorno de grano (fase clara) que delimitan los antiguos granos austeníticos primarios y una matriz intragranular más oscura compuesta por ferrita acicular y pequeñas regiones perlíteras. El tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT) atenuó los gradientes de dureza y las tensiones internas en esta zona sin eliminar por completo la macroestructura orientada típica del metal aportado.

Figura 61. Micrografía panorámica de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, evidenciando la orientación de los granos de solidificación y redes de ferrita primaria. Aumento: 50X (Escala: 200 µm).

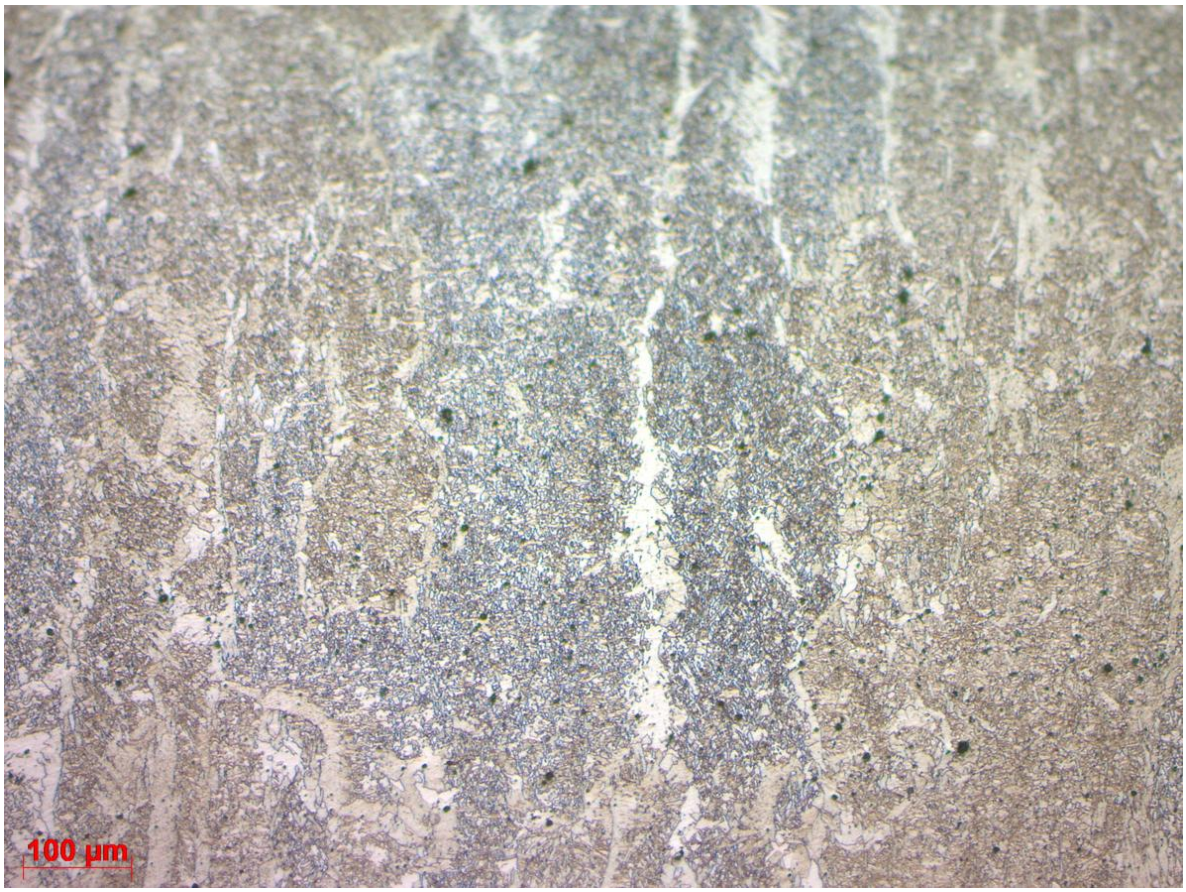


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 62 se presenta la micrografía a 100X (escala gráfica de 100 µm) del Metal de Soldadura (MS) en la zona de relleno de la probeta sometida a tratamiento térmico (PWHT). A esta magnificación se distingue claramente la alineación preferencial de las dendritas primarias y las fronteras de los antiguos granos austeníticos delineadas por ferrita de contorno de grano (fase clara). En las zonas intragranulares se aprecia un entramado de ferrita acicular combinada con colonias de perlita fina y ferrita con segunda fase no alineada. La preservación parcial de

esta alineación columnar con una matriz más uniforme ratifica el alivio de tensiones sin alterar la integridad estructural del cordón depositado.

Figura 62. Micrografía a 100X de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, mostrando las redes de ferrita de contorno de grano y la matriz intragranular de ferrita acicular. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).

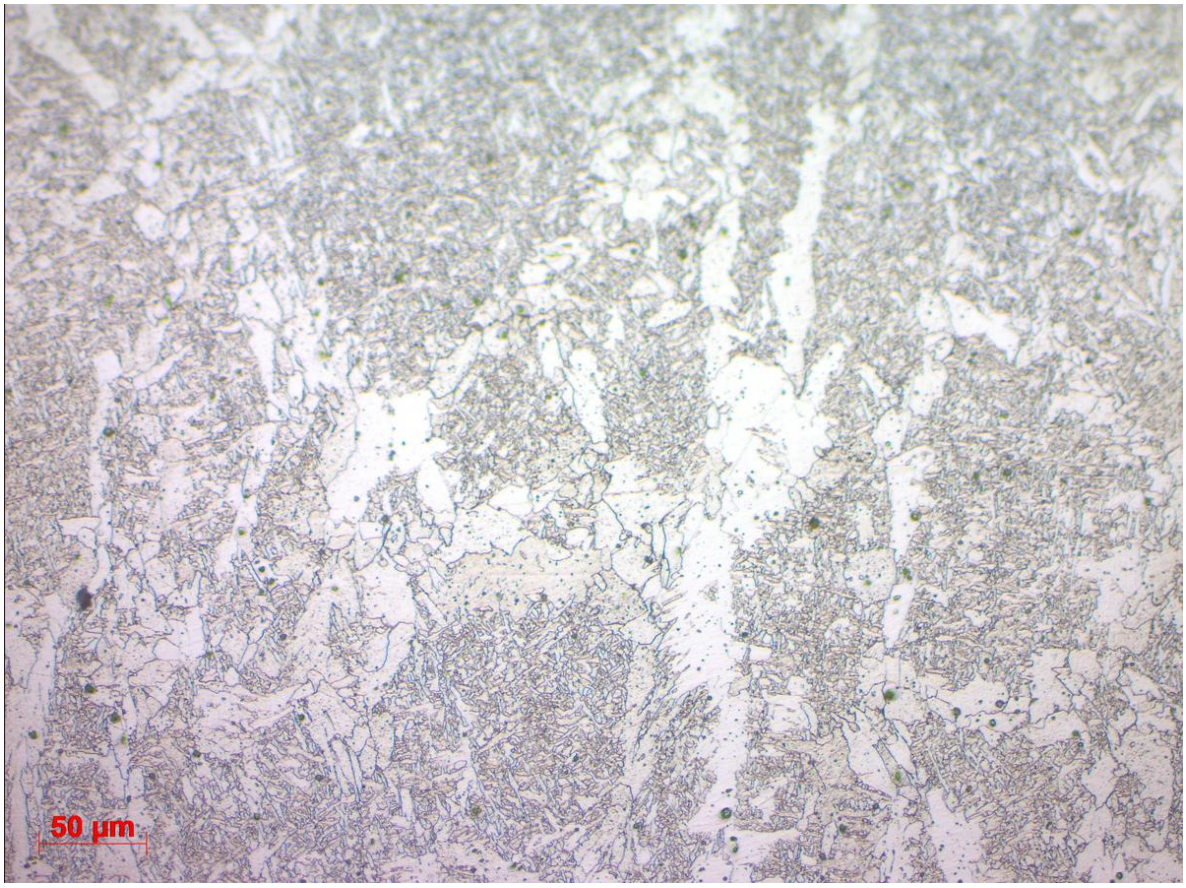


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 63 se ilustra la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) del Metal de Soldadura (MS) en la zona de relleno de la probeta con tratamiento térmico (PWHT). A esta resolución se observa en detalle la disposición de las bandas de

ferrita de contorno de grano (fase clara alargada) y las agujas de ferrita acicular entrelazadas en el interior de las colonias. Esta estructura entrelazada, suavizada térmicamente tras el PWHT.

Figura 63. Micrografía a detalle de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, resaltando la ferrita acicular intragranular y bandas de ferrita de contorno. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).

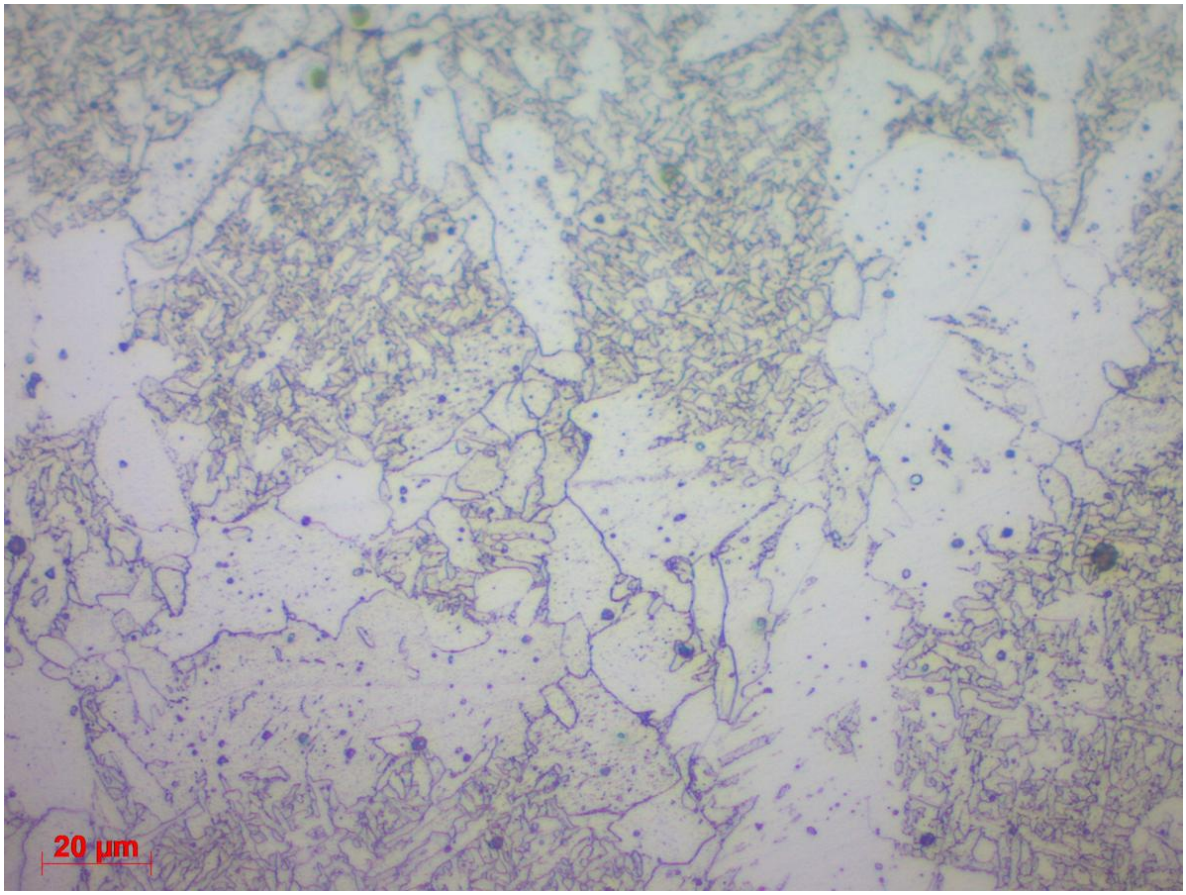


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 64 se muestra la micrografía a 500X (escala gráfica de 20 µm) de la zona de relleno en el Metal de Soldadura (MS) con tratamiento térmico (PWHT). A

este aumento se aprecia con alta claridad la morfología intragranular, evidenciando campos de ferrita acicular entrelazada rodeados por ferrita de contorno de grano primaria y ferrita Widmanstätten definidas. Se observan pequeños precipitados y finas colonias de perlita dispersas en las fronteras intergranulares. La homogenización provocada por el alivio de tensiones (PWHT) redujo la distorsión reticular en estas agujas ferríticas, estabilizando la microestructura y garantizando una alta resistencia y tenacidad frente a la propagación de grietas.

Figura 64. Micrografía a alta resolución de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, donde se aprecian entramados de ferrita acicular y ferrita de contorno de grano. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).

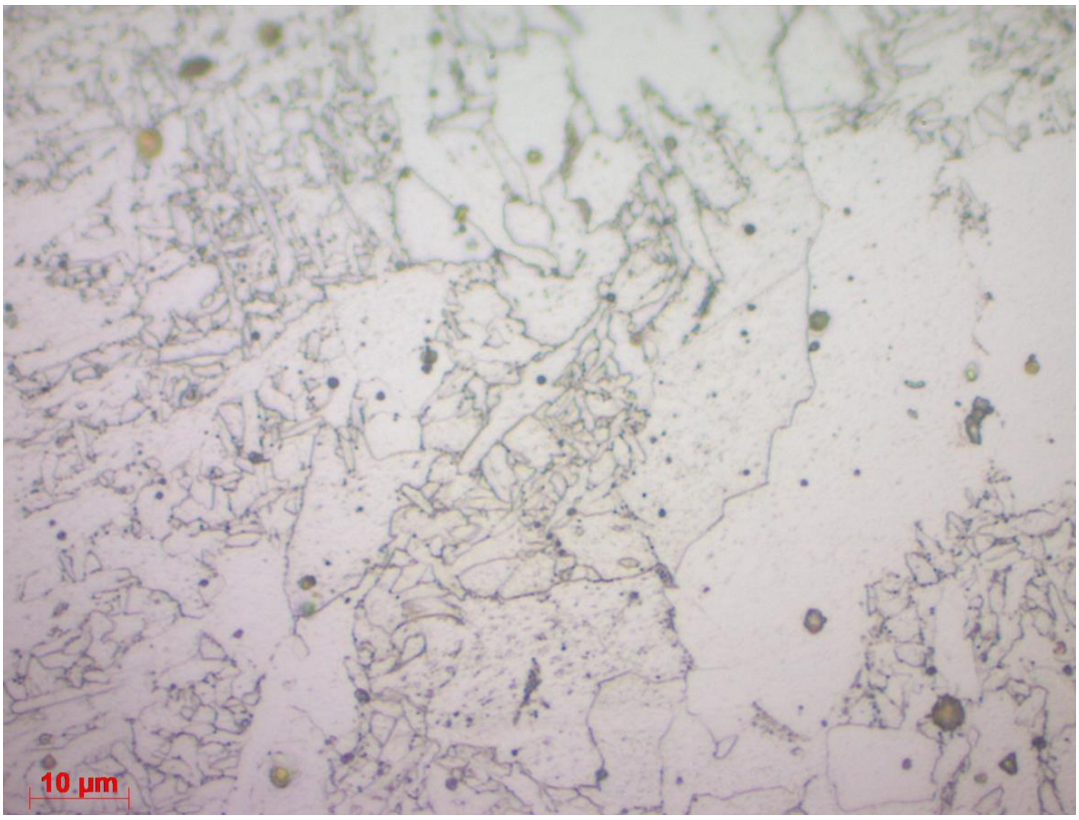


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 65 se aprecia la micrografía a máxima resolución de 1000X (escala gráfica de10 µm) en la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con tratamiento térmico (PWHT). A este nivel de detalle se revela la morfología fina del entramado de ferrita acicular (agujas entrelazadas) intercalada con delgadas placas de ferrita de segunda fase y ferrita de contorno de grano. Asimismo, se aprecian pequeñas inclusiones no metálicas de geometría esférica dispersas en la matriz, las cuales actuaron como sitios de nucleación intragranular para la ferrita acicular durante la solidificación.

Figura 65. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la zona de relleno del Metal de Soldadura (MS) con PWHT, mostrando detalles de la ferrita acicular

intragranular e inclusiones esféricas nucleadoras. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).



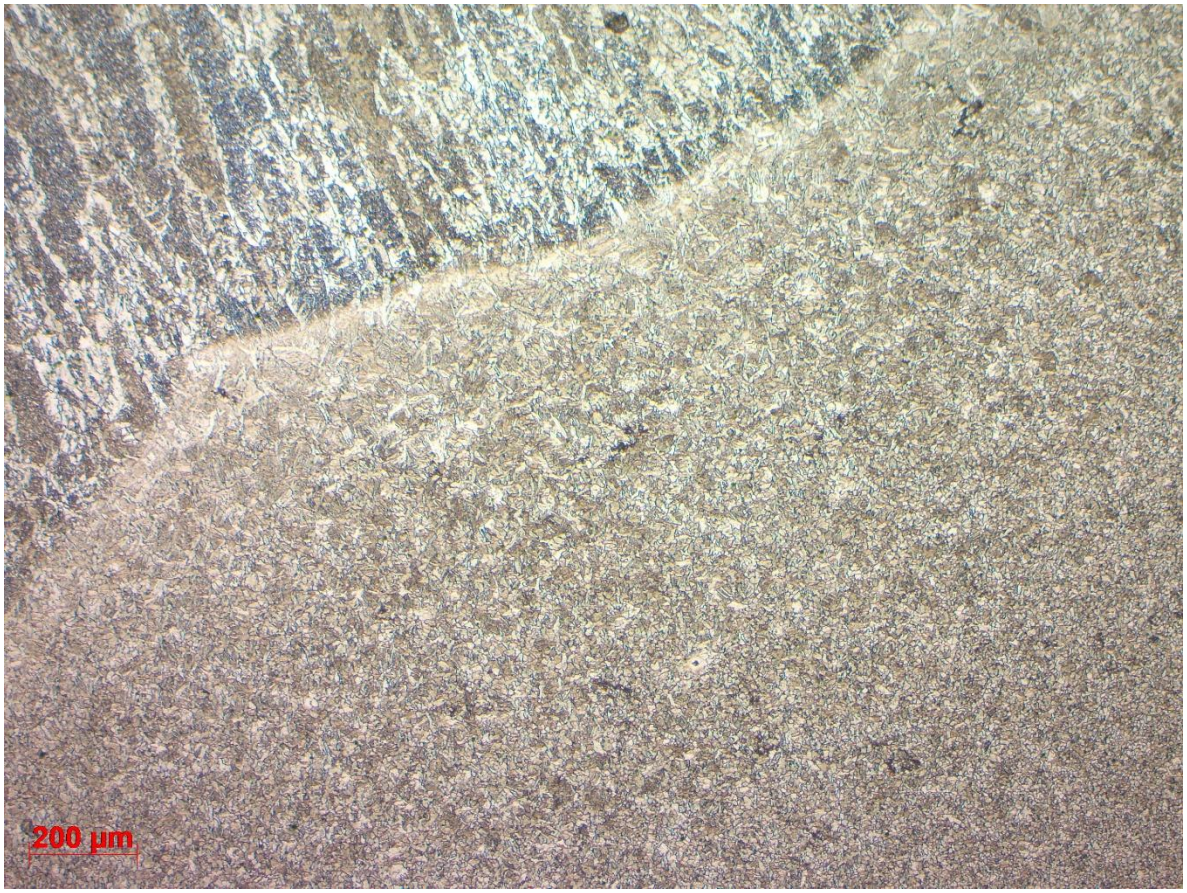
Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

5.7.4. Zona ZAC derecha

En la Figura 66 se presenta la micrografía panorámica a 50X (escala gráfica de 200 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la probeta con tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se aprecia claramente la línea o interfaz de fusión que delimita el Metal de Soldadura (zona superior izquierda, de morfología columnar/dendrítica orientada) de la ZAC (zona inferior y derecha). En la ZAC se observa un gradiente microestructural continuo con zonas de grano grueso cerca

de la línea de fusión y zonas de grano refinado hacia el metal base, constituidas por ferrita y perlita. La continuidad y suavizado en la interfaz reflejan el efecto homogenizador del tratamiento de alivio de tensiones (PWHT), el cual reduce los picos de dureza y las discontinuidades microestructurales en la frontera de unión.

Figura 66. Micrografía panorámica de la ZAC derecha con PWHT, mostrando la interfaz de fusión entre el metal de soldadura y la zona afectada térmicamente. Aumento: 50X (Escala: 200 µm).

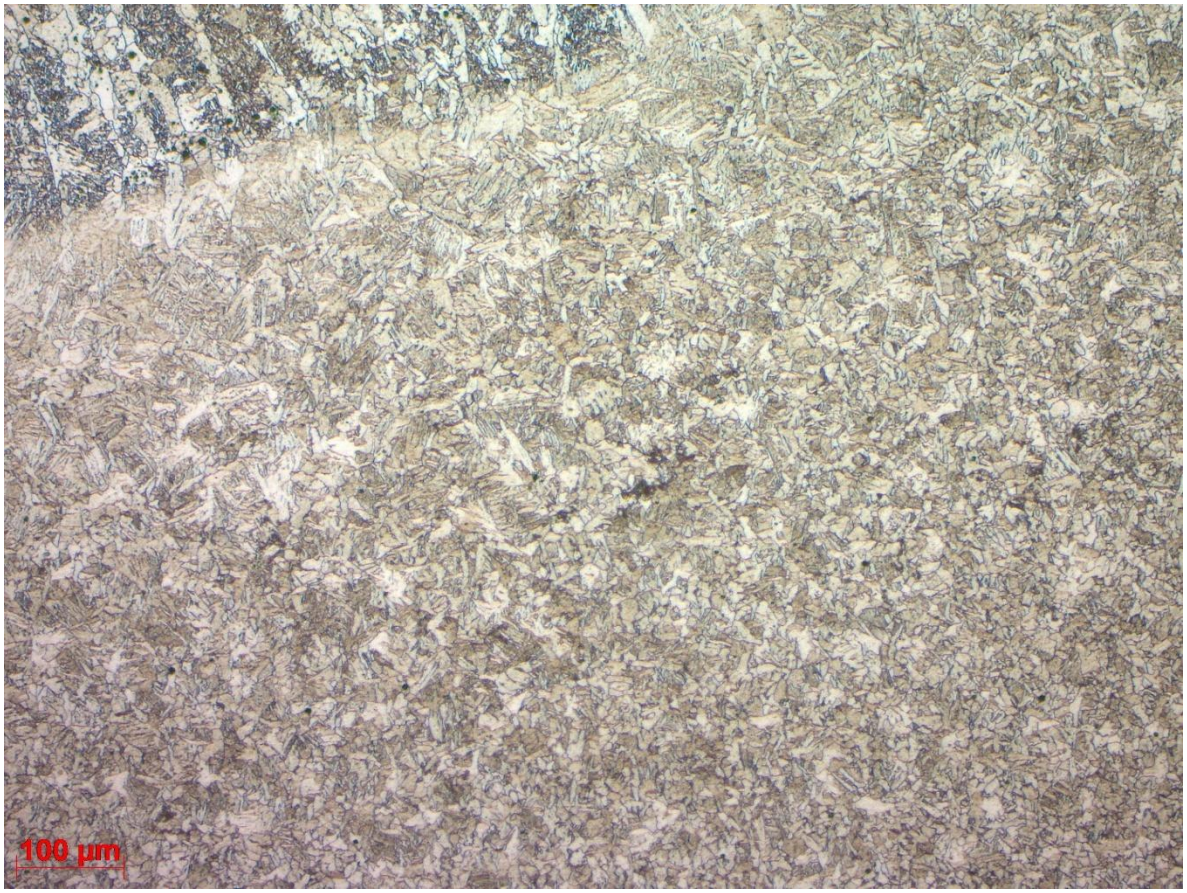


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 67 se aprecia la micrografía a 100X (escala gráfica de 100 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la junta sometida a tratamiento térmico

(PWHT). A este aumento se distingue con mayor claridad la línea de fusión en la esquina superior izquierda, la cual divide el Metal de Soldadura (MS) de la ZAC. Se observa la transición desde la zona de grano grueso adyacente a la línea de fusión hacia la zona de grano fino, compuestas por una matriz predominantemente ferrítica (fase clara) con colonias de perlita y ferrita de Widmanstätten atenuada.

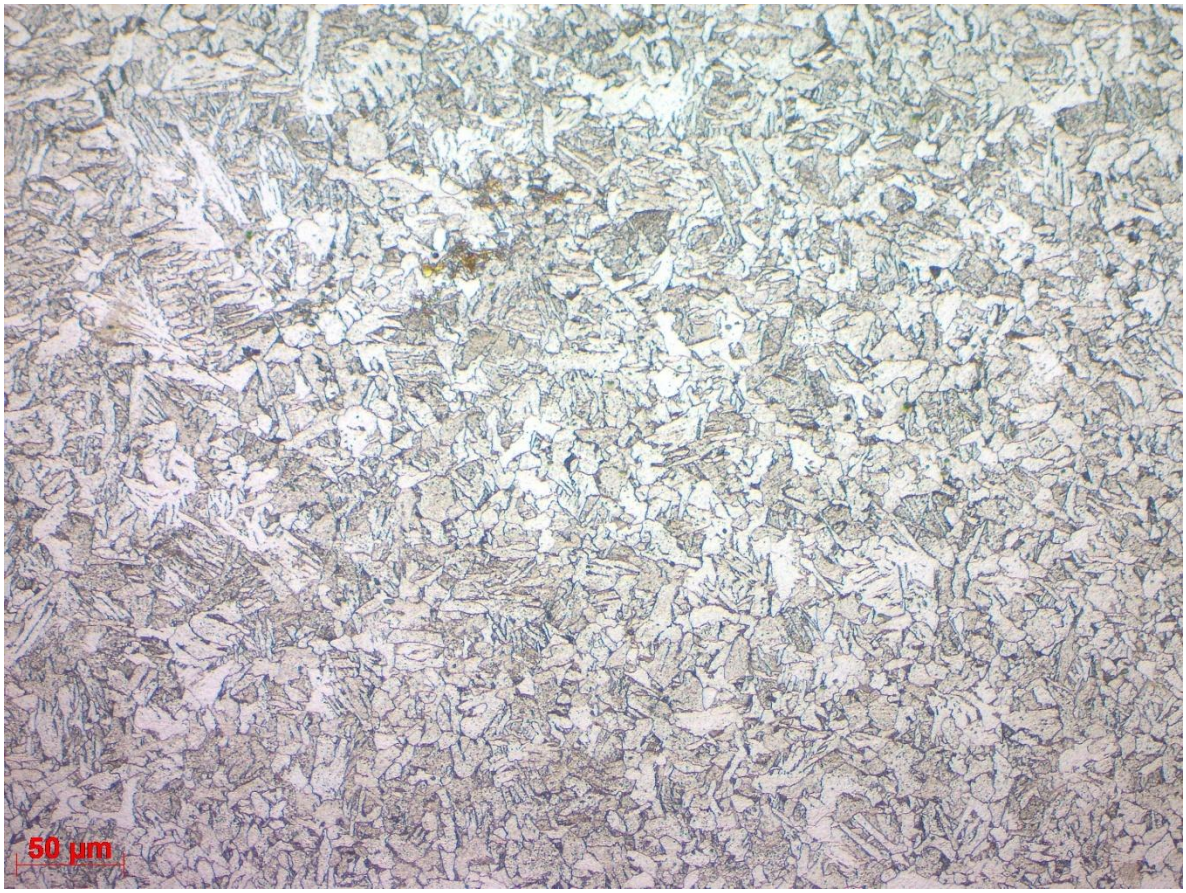
Figura 67. Micrografía a 100X de la ZAC derecha con PWHT, resaltando la línea de fusión y la transición hacia la estructura refinada de ferrita y perlita. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 68 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la junta sometida a tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se observa con detalle la mezcla microestructural en la ZAC de grano fino/recalentada, compuesta por una matriz de ferrita alotriomórfica y poligonal (fase clara) acompañada por colonias de perlita fina y ferrita con segunda fase alineada (fase oscura). La nitidez en los contornos de fase y el aspecto suave de la matriz reflejan la redistribución y alivio de tensiones internas generadas durante el PWHT, lo que disminuye la fragilidad en la zona de transición.

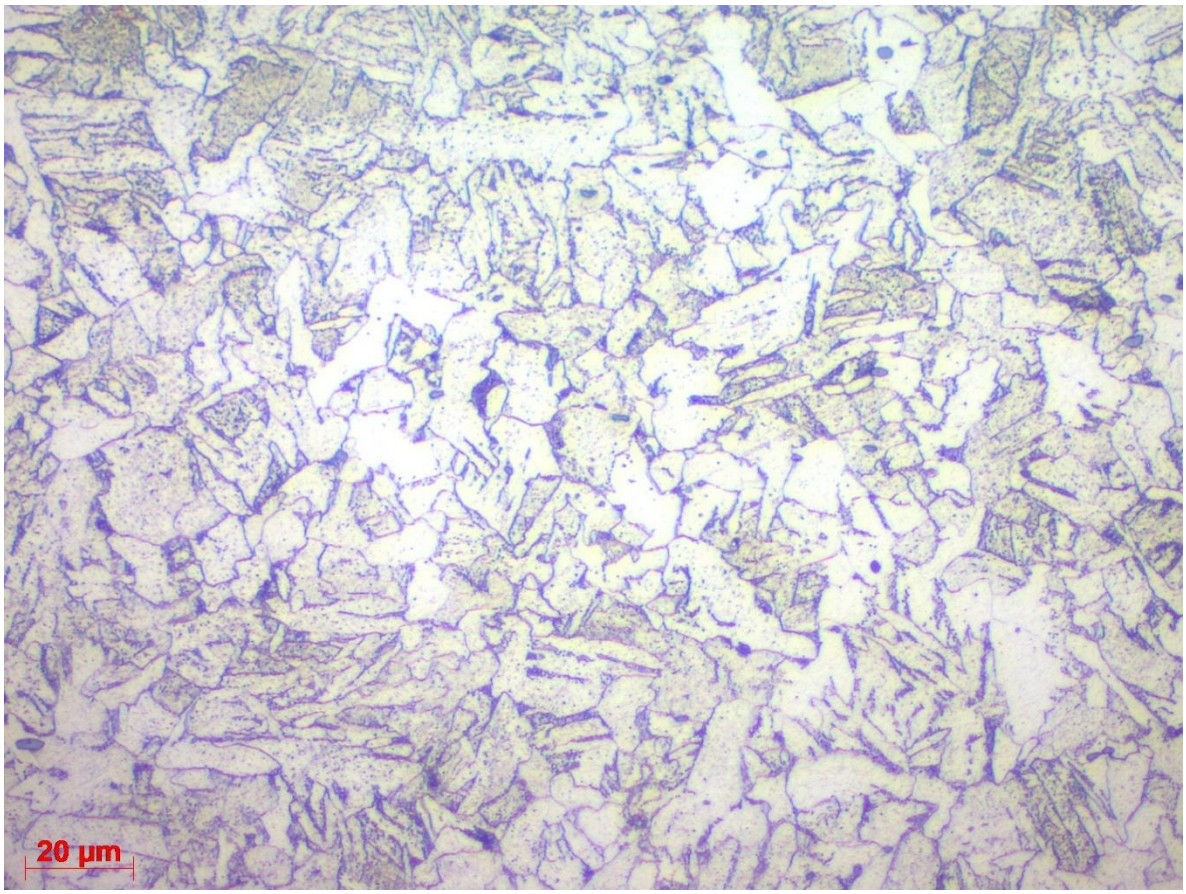
Figura 68. Micrografía a detalle de la ZAC derecha con PWHT, mostrando la distribución de ferrita poligonal y perlita fina recristalizada. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 69 se aprecia la micrografía a alta resolución de 500X (escala gráfica de 20 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la probeta sometida a tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se observa con claridad una microestructura estabilizada, compuesta por granos de ferrita poligonal y alotriomórfica (fase clara) distribuidos junto a remanentes de ferrita con segunda fase y colonias de perlita fina ubicadas en los límites intergranulares. El ciclo de alivio de tensiones (PWHT) favorece la homogenización microestructural y la relajación de las tensiones residuales térmicas en esta zona de transición, reduciendo los gradientes de dureza y evitando la permanencia de estructuras frágiles.

Figura 69. Micrografía a alta magnificación (500X) de la ZAC derecha con PWHT, mostrando una matriz de ferrita poligonal y colonias de perlita fina estabilizadas en los límites de grano. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).

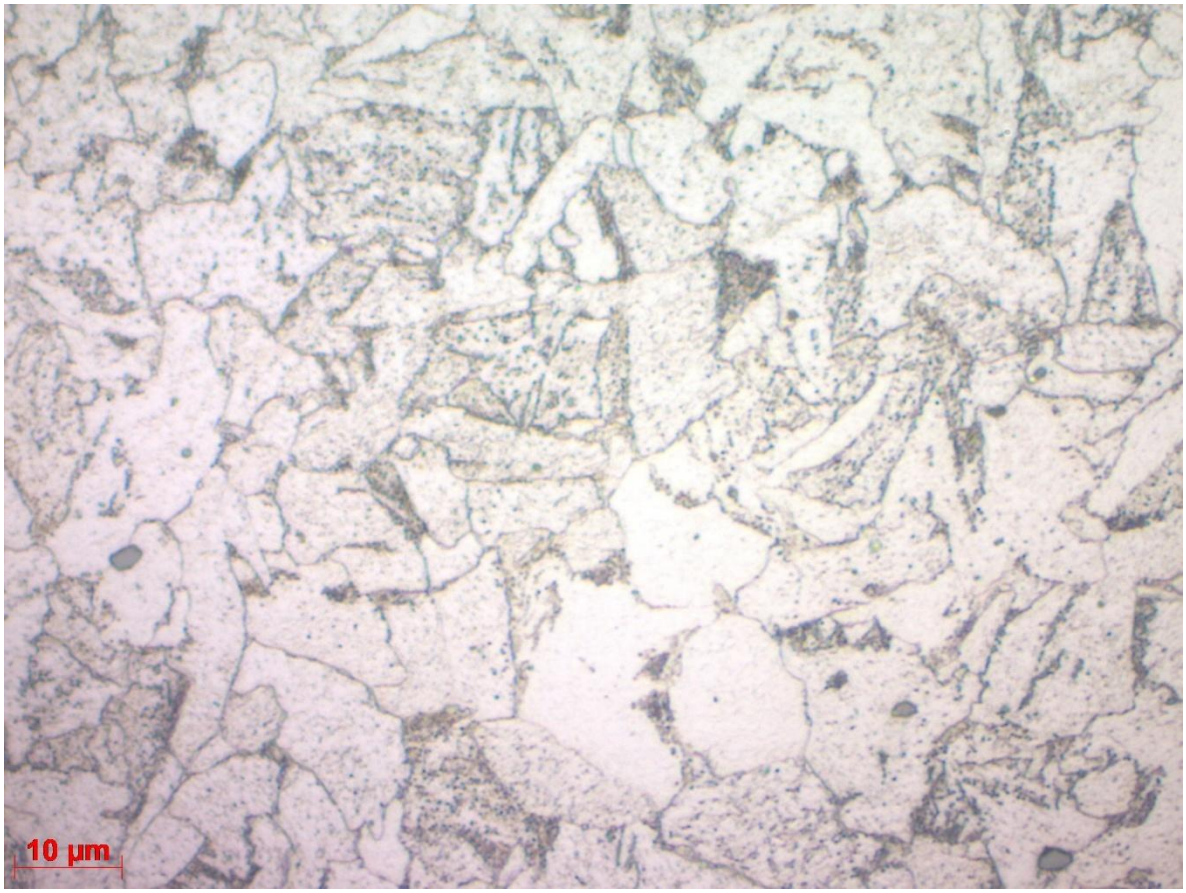


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 70 se presenta la micrografía a máxima resolución de 1000X (escala gráfica de 10 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la junta sometida a tratamiento térmico (PWHT). A este nivel de magnificación se aprecian con detalle los límites de grano y la morfología de la matriz, compuesta por bloques de ferrita poligonal y ferrita alotriomórfica (fase clara) combinados con finas colonias de perlita intergranular y agregados de ferrita con segunda fase no alineada (fase

oscura). El tratamiento de alivio de tensiones (PWHT) permitió reducir la distorsión reticular en las fases de transformación rápida, atenuando los picos de microdureza. Tomando como referencia la escala integrada de 10 µm, se observa un tamaño de grano ferrítico heterogéneo pero fino, con diámetros promedio que oscilan entre 8 µm y 14 µm, lo cual equivale a un número de tamaño de grano ASTM 9.5 a 11 según la norma ASTM E112.

Figura 70. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la ZAC derecha con PWHT, destacando la definición de límites de grano ferríticos y la dispersión de perlita fina intergranular. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).

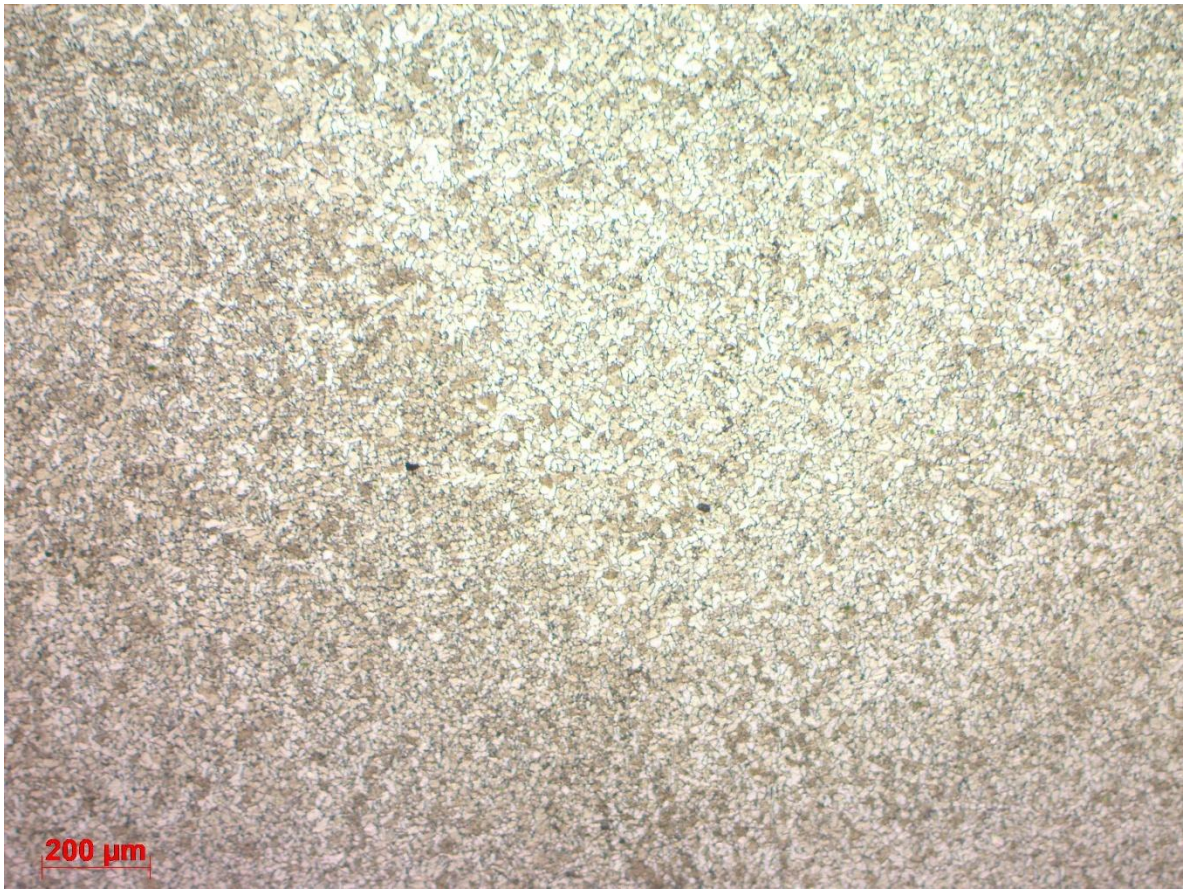


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

5.7.5. Zona ZAC izquierda

En la Figura 71 se presenta la micrografía panorámica a 50X (escala gráfica de 200 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la probeta con tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se aprecia una microestructura predominantemente refinada e isotrópica, correspondiente a la ZAC de grano fino / recristalizada. La matriz exhibe una distribución uniforme de granos equiaxiales de ferrita (fase clara) con una dispersión homogénea de colonias de perlita (fase oscura).

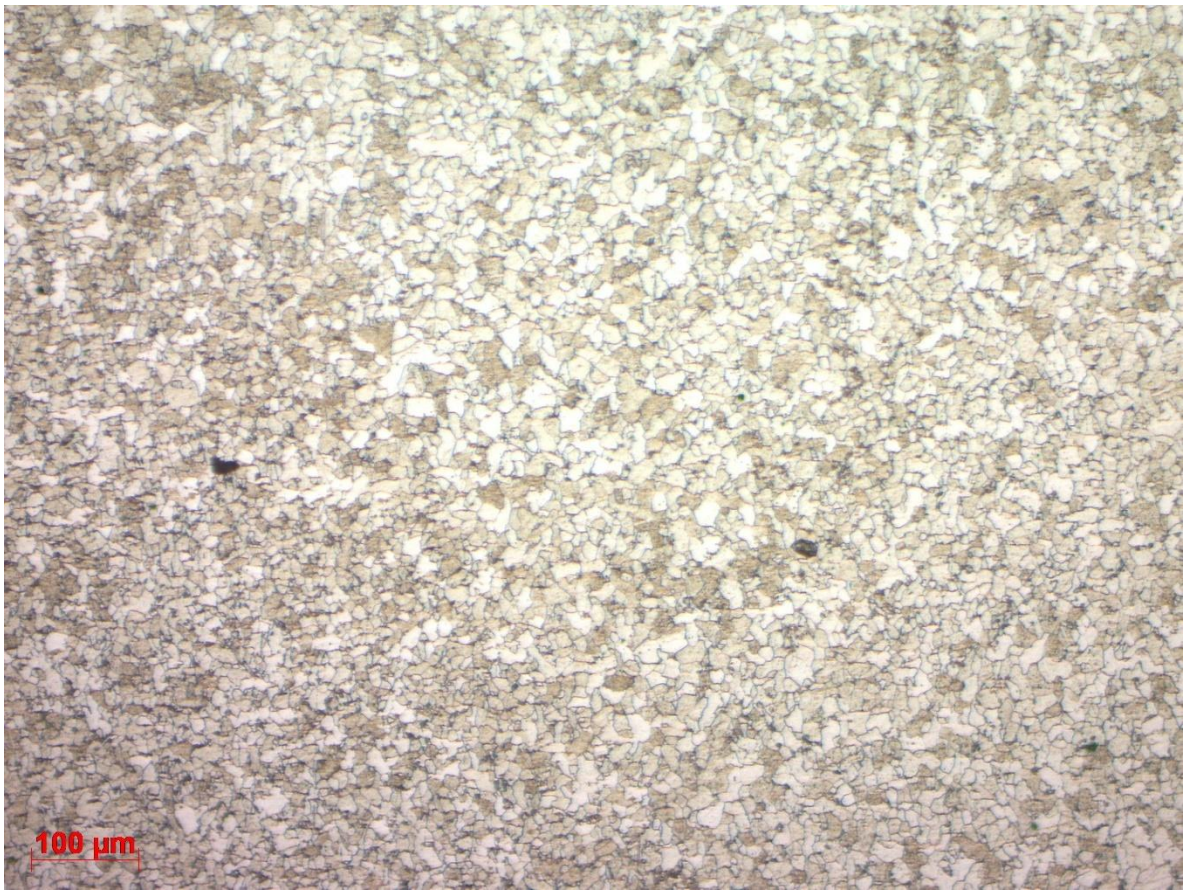
Figura 71. Micrografía panorámica de la ZAC izquierda con PWHT, mostrando la estructura homogénea y refinada de ferrita y perlita. Aumento: 50X (Escala: 200 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 72 se muestra la micrografía a 100X (escala gráfica de 100 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la probeta sometida a tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se evidencia con mayor claridad el refinamiento microestructural de la zona recalentada/recristalizada, compuesta por una matriz isotrópica de granos ferríticos finos (fase clara) y pequeñas colonias perlíteras bien distribuidas (fase oscura).

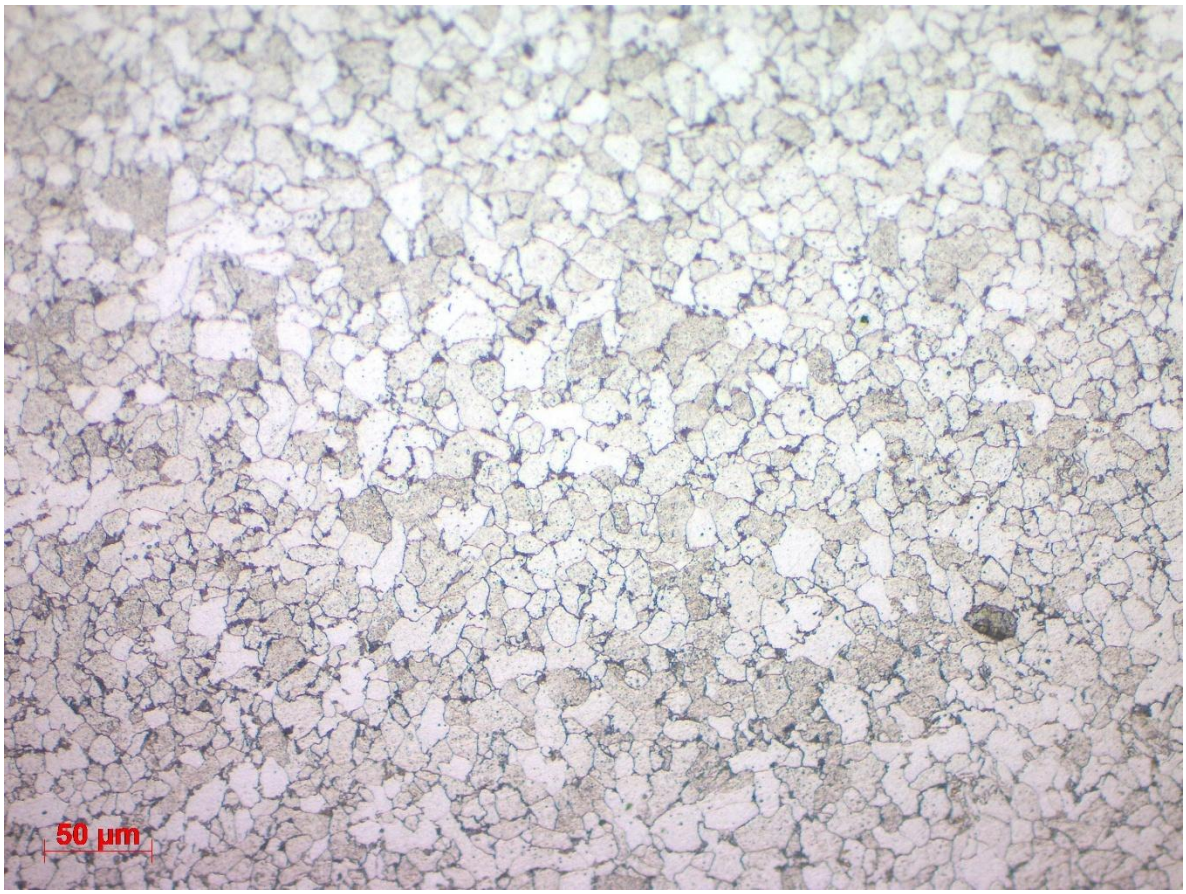
Figura 72. Micrografía a 100X de la ZAC izquierda con PWHT, destacando la estructura homogénea de granos ferríticos finos y perlita bien dispersa. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 73 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la junta sometida a tratamiento térmico (PWHT). A esta resolución se observa con nitidez la morfología equiaxial de los granos ferríticos (fase clara) y la distribución uniforme de las colonias de perlita (fase oscura) en los bordes de grano. La presencia de granos bien delimitados y la ausencia de concentraciones severas de tensiones confirman el efecto suavizador y recristalizador del PWHT en la ZAC izquierda.

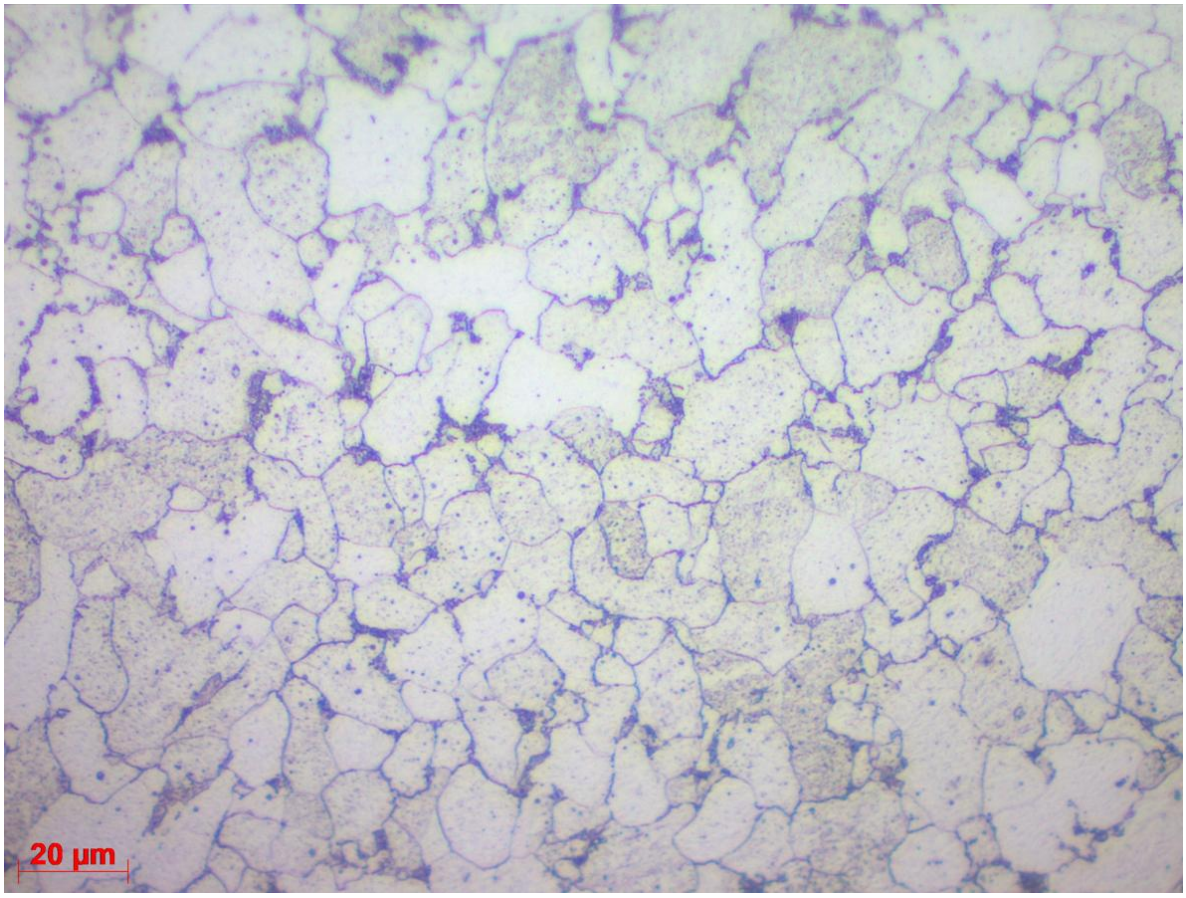
Figura 73. Micrografía a detalle de la ZAC izquierda con PWHT, evidenciando la estructura de granos equiaxiales de ferrita y perlita fina intergranular. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 74 se muestra la micrografía a alta magnificación de 500X (escala gráfica de 20 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la junta con tratamiento térmico (PWHT). A este aumento se aprecia con alta claridad la morfología de la matriz ferrítica poligonal (fase clara) de granos finos y limites bien definidos, acompañada de pequeñas colonias de perlita (fase oscura) ubicadas en las fronteras de grano y puntos triples.

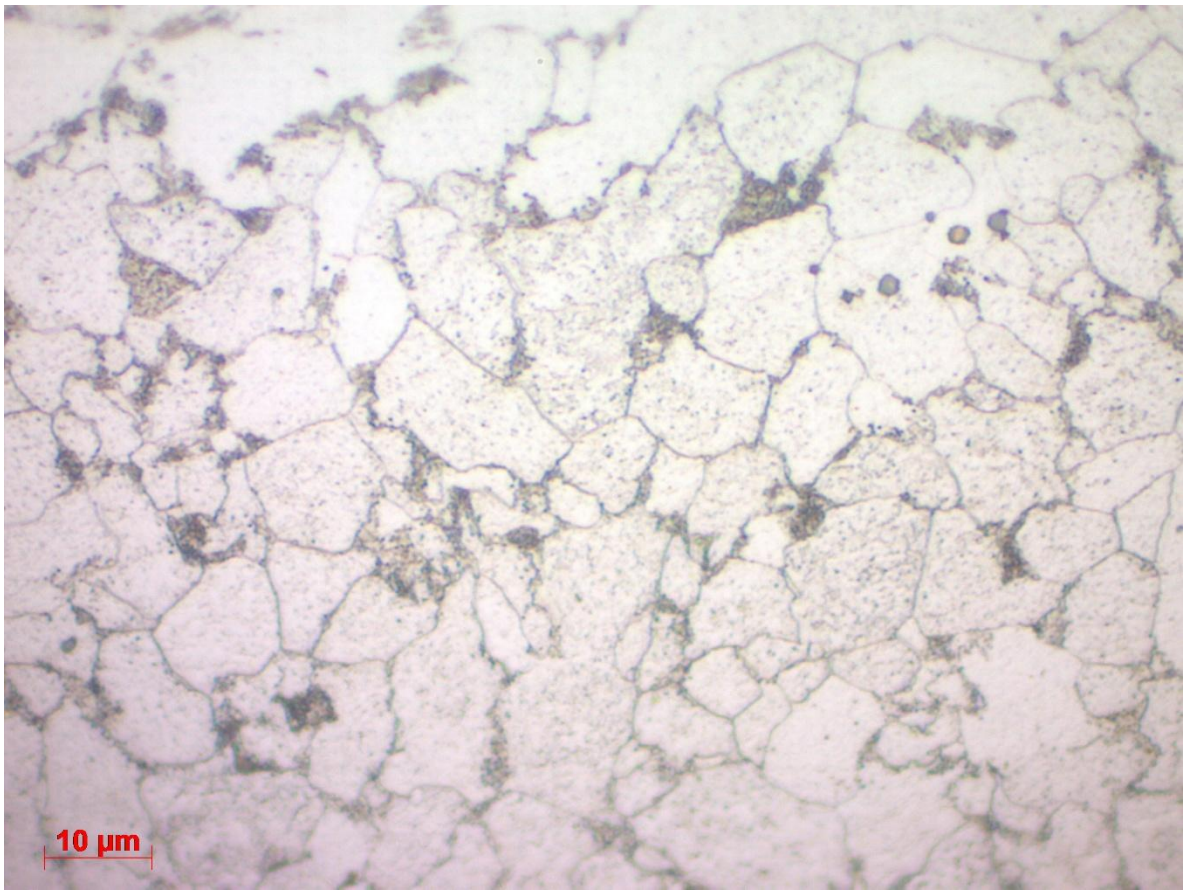
Figura 74. Micrografía a alta resolución de la ZAC izquierda con PWHT, mostrando granos ferríticos poligonales y colonias perlíteras finas en los bordes intergranulares. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026).

En la Figura 75 se presenta la micrografía a máxima resolución de 1000X (escala gráfica de 10 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la junta sometida a tratamiento térmico (PWHT). A esta magnificación se observan con elevada nitidez los contornos de los granos ferríticos poligonales (fase clara) y las finas colonias de perlita (fase oscura) alojadas en las fronteras intergranulares y puntos triples. Tomando como referencia la escala gráfica integrada de 10 µm, el diámetro promedio de los granos ferríticos oscila entre 7 µm y 12 µm, lo que corresponde a un número de tamaño de grano ASTM 10 a 11 de acuerdo con la norma ASTM E112.

Figura 75. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la ZAC izquierda con PWHT, mostrando la morfología ferrítica fina con perlita fina intergranular. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).



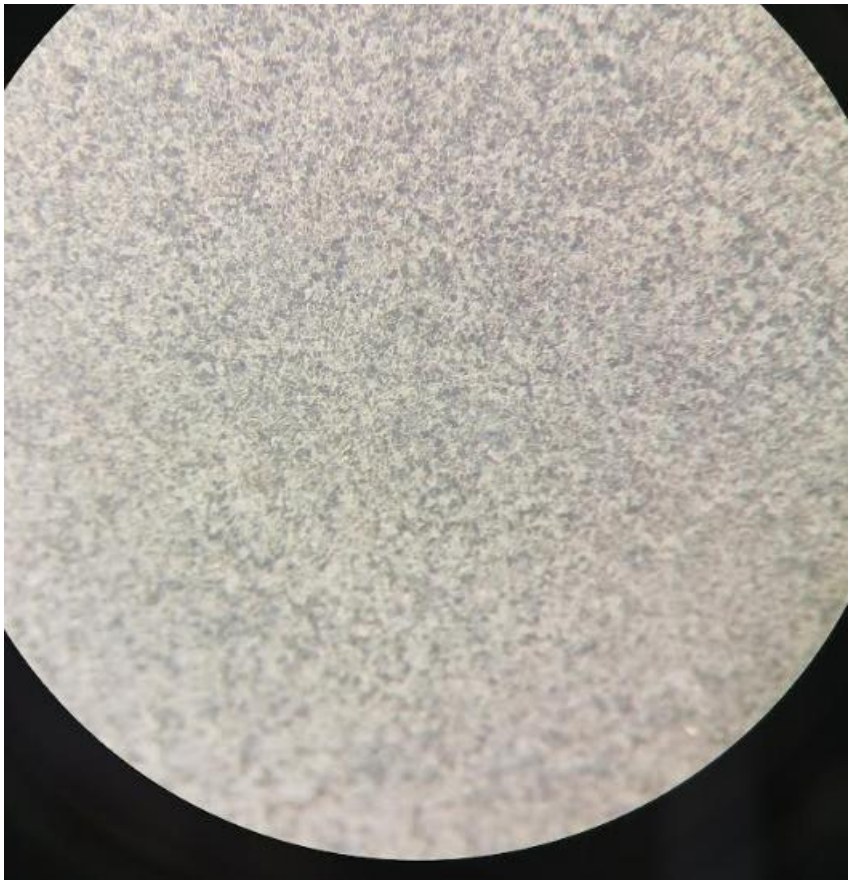
Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

5.7.6. Macrofotografía en Estereomicroscopio de la Superficie de la Junta Soldada con PWHT.

En la Figura 76 se muestra la macrofotografía obtenida mediante estereomicroscopio a un aumento de 8X sobre la superficie de la probeta con tratamiento térmico (PWHT). A este nivel de amplificación macroscópica se observa con claridad la textura uniforme de la matriz tras el ataque químico, caracterizada por la dispersión homogénea de las fases ferrítico-perlíteras a escala general. La

vista en el estereoscopio a 8X permite evaluar la calidad macroestructural del material, confirmando la ausencia de discontinuidades superficiales tales como fisuras, porosidades, inclusiones de escoria o grietas de alivio de tensiones, respaldando la integridad mecánica de la unión soldada tras el ciclo térmico.

Figura 76. Macrofotografía a 8X en estereomicroscopio de la junta soldada con PWHT, mostrando una textura superficial uniforme y sin defectos macroestructurales. Aumento: 8X.



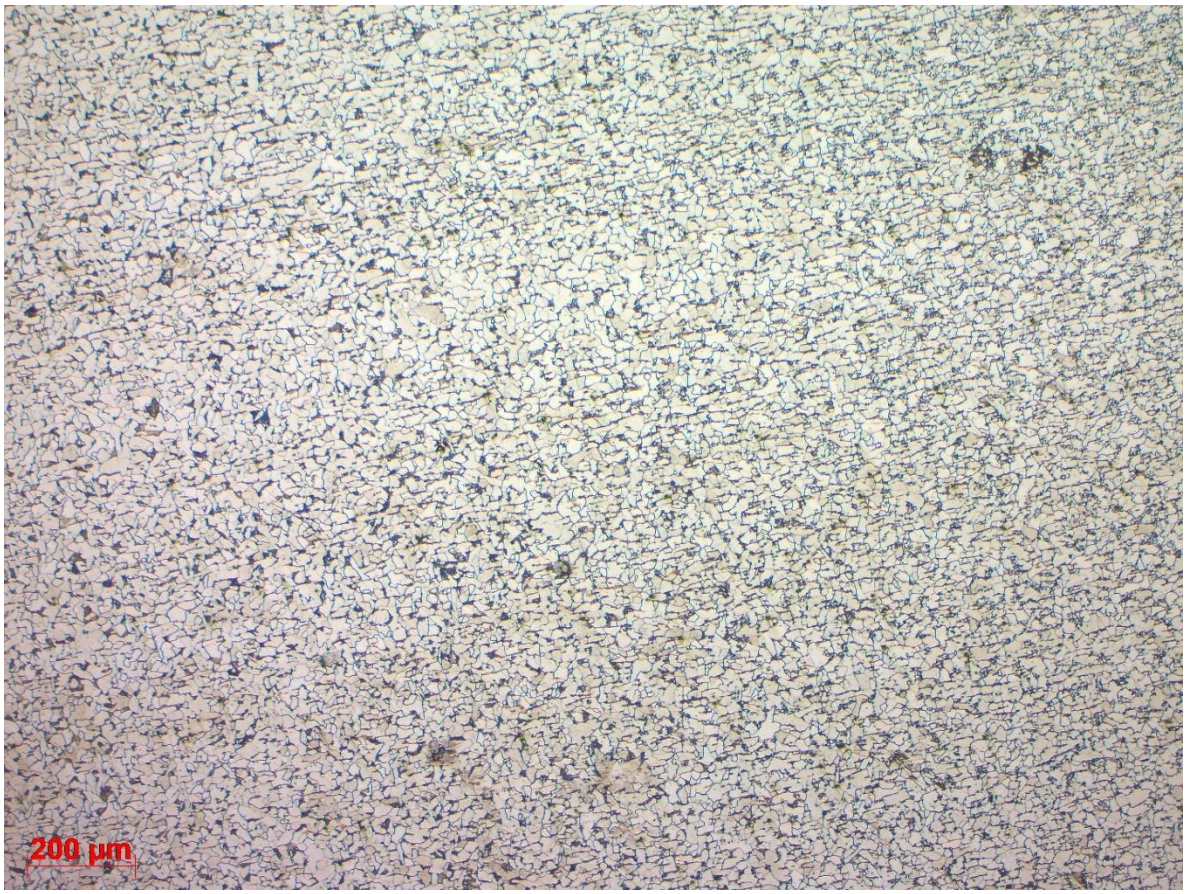
Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

5.8. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA PROBETA SIN TRATAMIENTO TÉRMICO (PWHT)

5.8.1. Zona del Material base

En la Figura 77 se presenta la micrografía panorámica a 5X (escala gráfica de 200 µm del Metal Base (MB) correspondiente al acero estructural ASTM A36 en estado de recepción (sin PWHT) al ser atacado con Nital al 5%. A este aumento se observa la estructura característica de un acero de bajo carbono, constituida por una matriz predominantemente ferrítica (fase clara) con colonias de perlita (fase oscura) distribuidas en bandas leves orientadas en la dirección del laminado. La microestructura muestra una clara homogeneidad isotrópica en todo el campo observado, sin afectación por el ciclo térmico de la soldadura en esta región alejada de la junta.

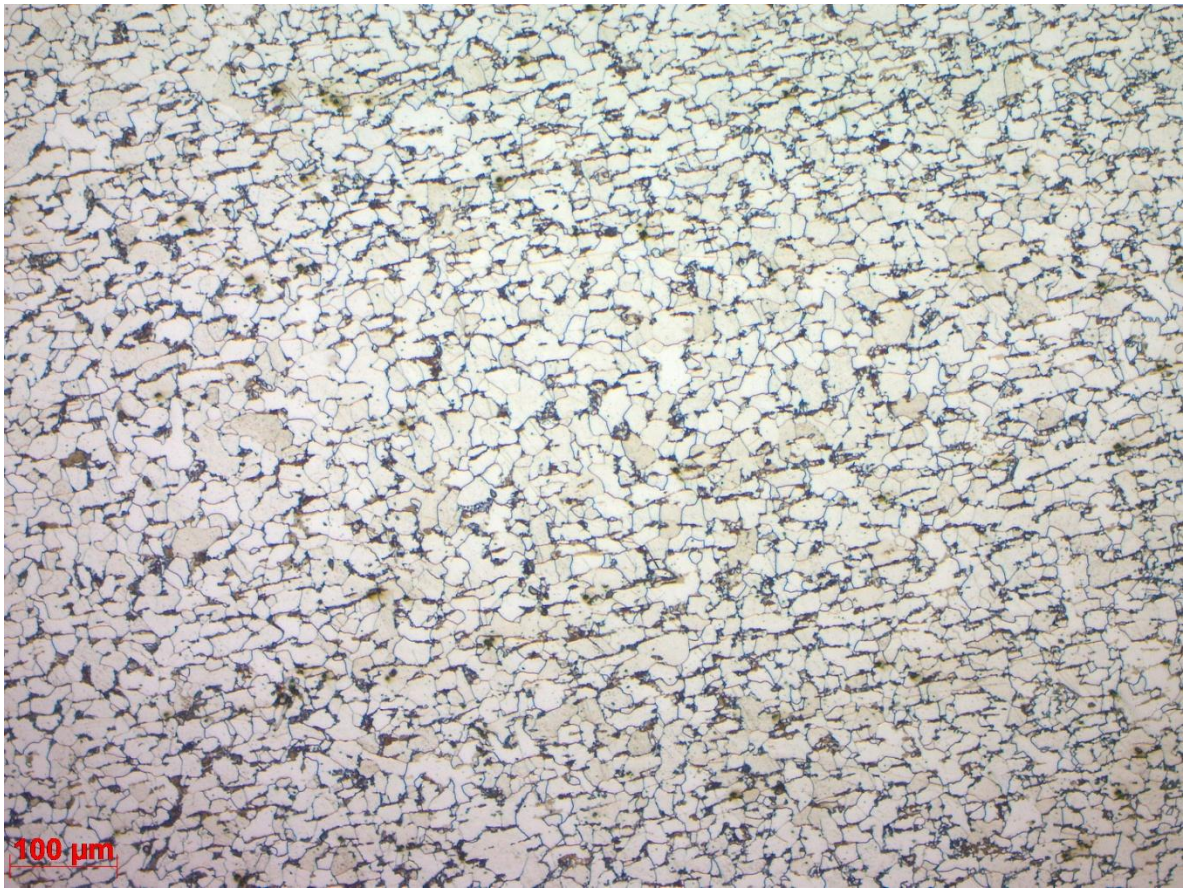
Figura 77. Micrografía del Metal Base (MB) de acero ASTM A36 en la probeta sin PWHT atacado con Nital al 5%, mostrando la matriz ferrítico-perlíterica. Aumento: 5X (Escala: 200 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 78 se aprecia la micrografía a 100X (Escala gráfica de 100 µm) del Metal Base (MB) de acero ASTM A36 en la probeta sin PWHT. A este aumento se distinguen claramente las bandas alternadas compuestas por matriz ferrítica (granos claros equiaxiales) y pequeñas colonias de perlita (fase oscura) alineadas según el sentido de deformación por laminado en caliente. Esta microestructura es típica del material en estado de entrega comercial, mostrando la continuidad de grano antes de las alteraciones térmicas sufridas en la zona de soldadura.

Figura 78. Micrografía del Metal Base (MB) de acero ASTM A36 en probeta sin PWHT, destacando las bandas de ferrita y perlita. Aumento: 10X (Escala: 100 µm).

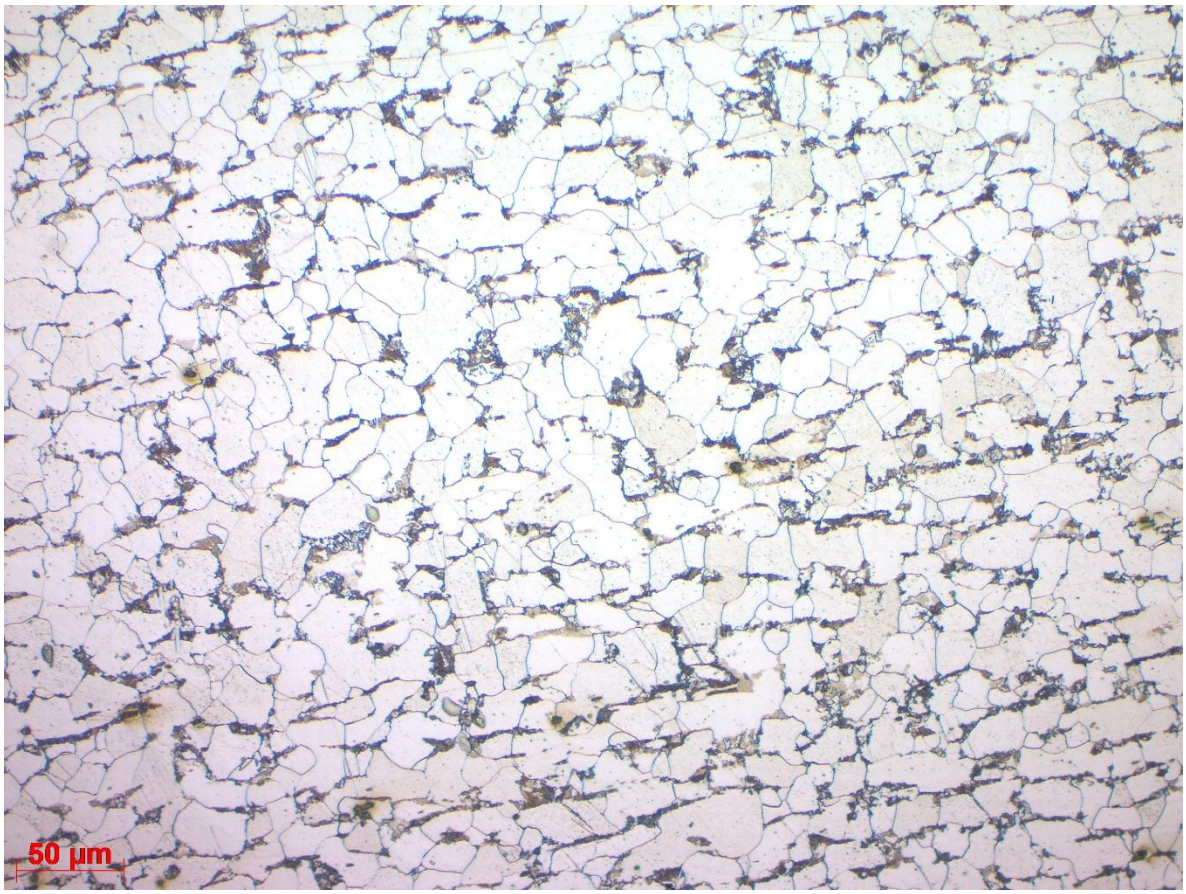


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 79 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) del Metal Base (MB) de acero ASTM A36 en la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A esta resolución se aprecia la morfología de los granos ferríticos poligonales y equiaxiales (fase clara), delimitados por fronteras de grano bien

definidas. Asimismo, se observa la alineación paralela de las colonias perlíteras (fase oscura) a lo largo de las líneas de deformación por laminado.

Figura 79. Micrografía a detalle a 200X del Metal Base (MB) sin PWHT, mostrando granos ferríticos equiaxiales y bandas perlíteras alineadas. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).

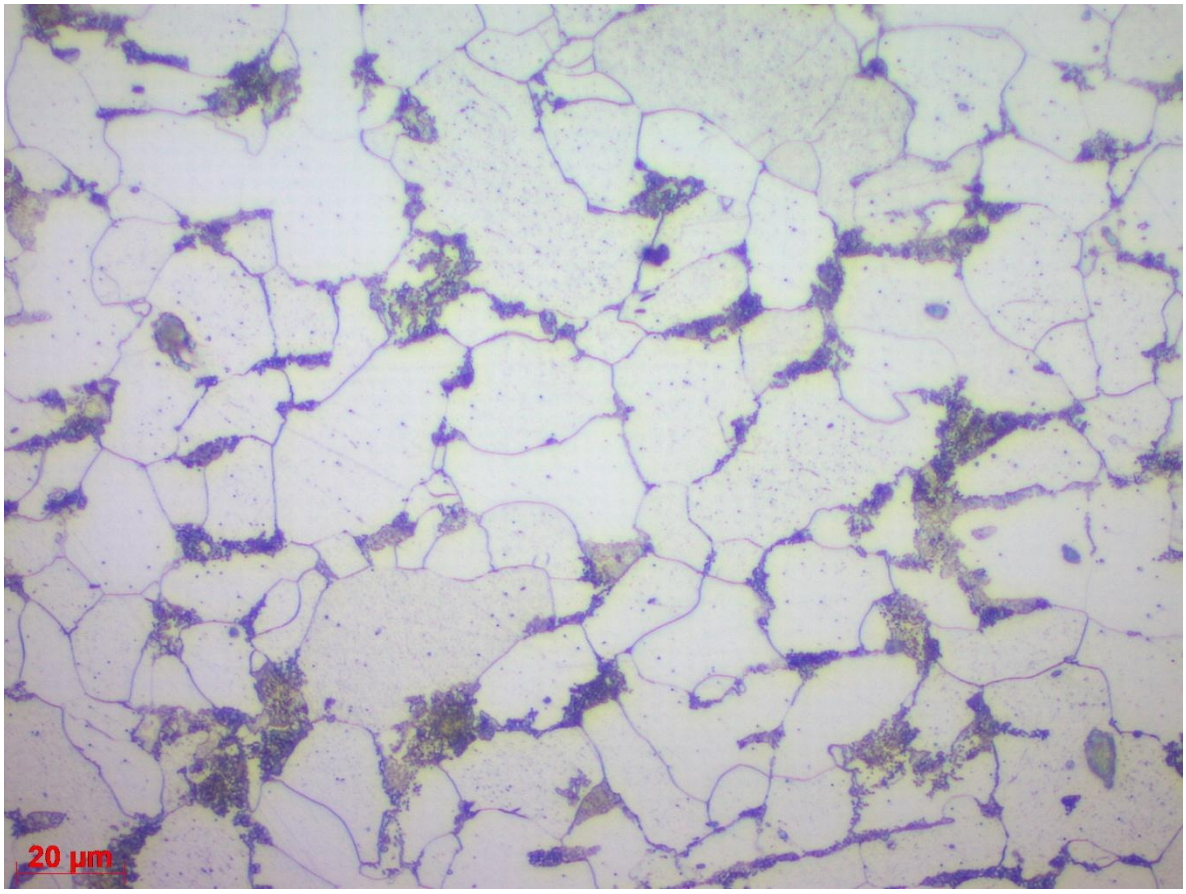


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 80 se muestra la micrografía de 500X (escala gráfica de 20 µm) del Metal Base (MB) de acero ASTM A36 en la probeta sin tratamiento térmico (sin

PWHT). A esta magnificación se distinguen claramente los límites de grano ferríticos de la matriz de fase clara, así como las finas colonias perlíteras (fase oscura) alojadas en las fronteras intergranulares y puntos triples de la estructura equiaxial. Esta disposición homogénea confirma las características estructurales nativas del material base laminado en caliente, previo a la influencia del calor generado durante el proceso de soldadura.

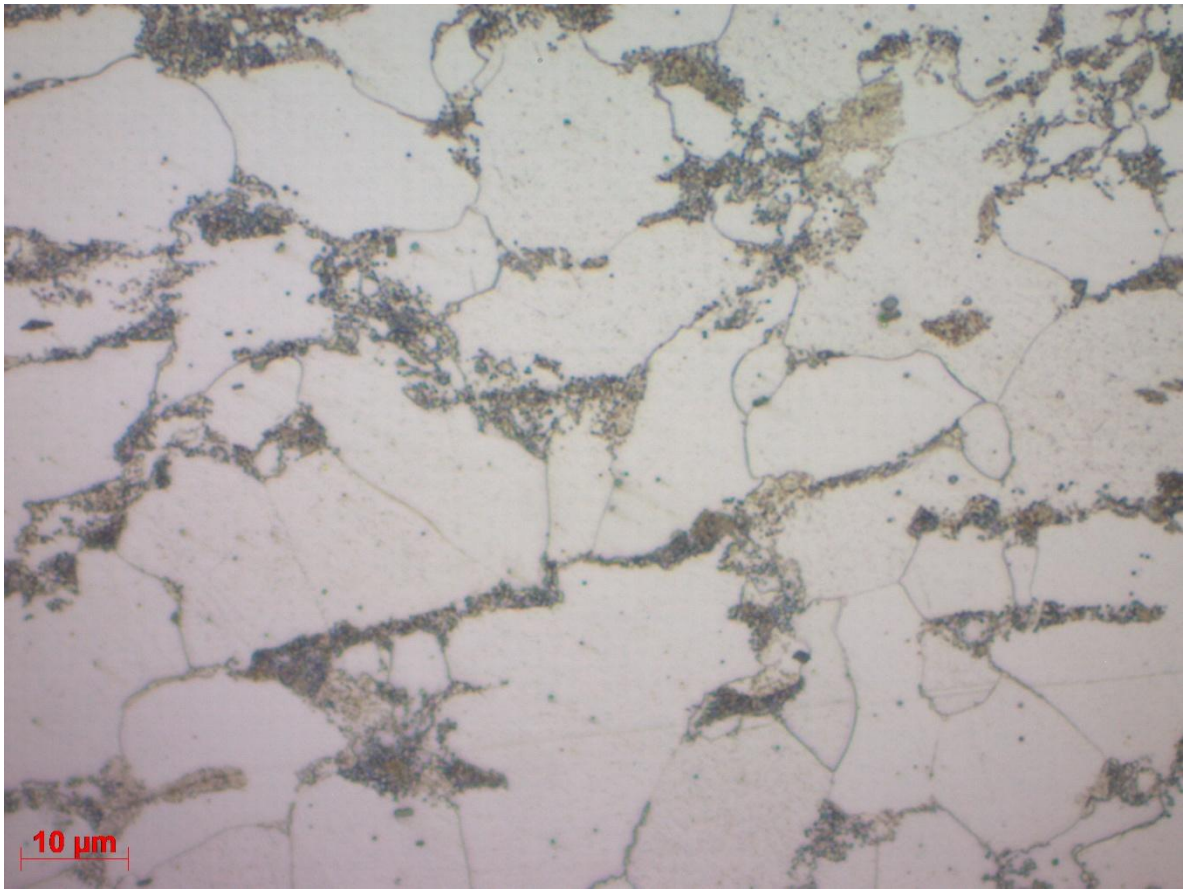
Figura 80. Micrografía a alta magnificación (500X) del Metal Base (MB) sin PWHT, evidenciando las fronteras de grano de la ferrita poligonal y la distribución intergranular de la perlita. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026

En la Figura 81 se presenta la micrografía a máxima resolución de 1000X (escala gráfica de 10 µm) correspondiente al Metal Base (MB) de acero ASTM A36 en la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A esta magnificación se observan con detalle los límites de grano ferríticos (fase clara) de geometría poligonal y equiaxial, así como las colonias de perlita (fase oscura) dispuestas en las fronteras intergranulares y agregadas en bandas leves. Tomando como referencia la escala gráfica de 10 µm, el tamaño promedio de los granos ferríticos en el metal base oscila entre 15 µm y 25 µm, lo que equivale a un número de tamaño de grano ASTM 8 a 8.5 según la norma ASTM E112.

Figura 81. Micrografía a máxima resolución (1000X) del Metal Base (MB) sin PWHT, mostrando granos ferríticos poligonales y colonias de perlita fina. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).



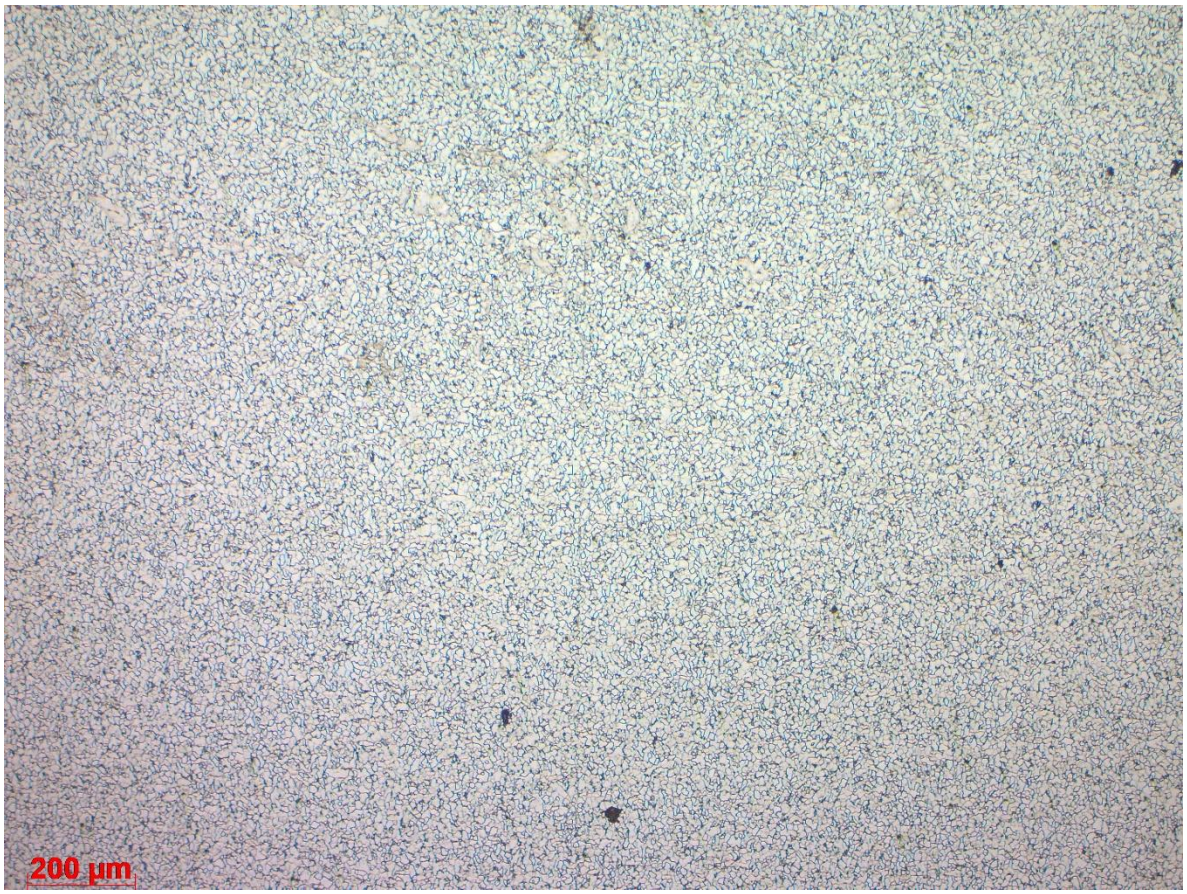
Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

5.8.2. Zona de raíz

En la Figura 82 se presenta la micrografía panorámica a 5X (escala gráfica de 200 µm) de la zona de la raíz en la junta de acero ASTM A36 (sin PWHT). A este aumento se observa una microestructura refinada e isotrópica, correspondiente a la zona de re-fusión y recalentamiento del pase de raíz producto de la aportación de

calor de los pases posteriores. La matriz está compuesta principalmente por una mezcla homogénea de ferrita equiaxial/alotriomórfica y pequeñas agrupaciones perlíteras intergranulares, exhibiendo una reducción sustancial del tamaño de grano en comparación con el metal base.

Figura 82. Micrografía panorámica a 50X de la zona de la raíz sin PWHT, evidenciando una estructura fina y homogénea recalentada por los pases de soldadura posteriores. Aumento: 50X (Escala: 200 µm).

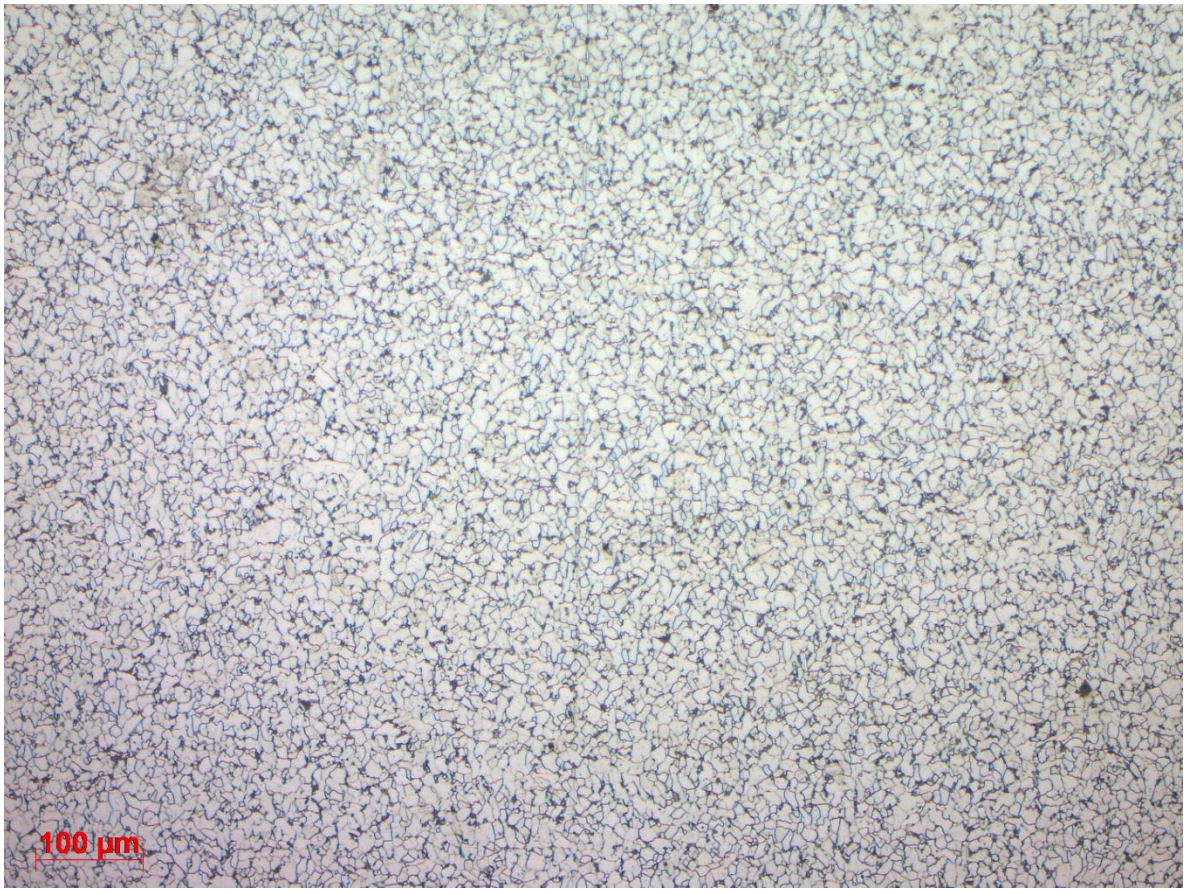


.

Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 83 se muestra la micrografía a 10X (escala gráfica de 100 µm|) de la zona de la raíz en la junta de acero ASTM A36 en estado de soldadura (sin PWHT). A este aumento se aprecia con mayor claridad la distribución uniforme de la matriz ferrítica fina (fase clara) e intergranulares perlíteras (fase oscura) producto de la recristalización inducida por los pases de relleno posteriores.

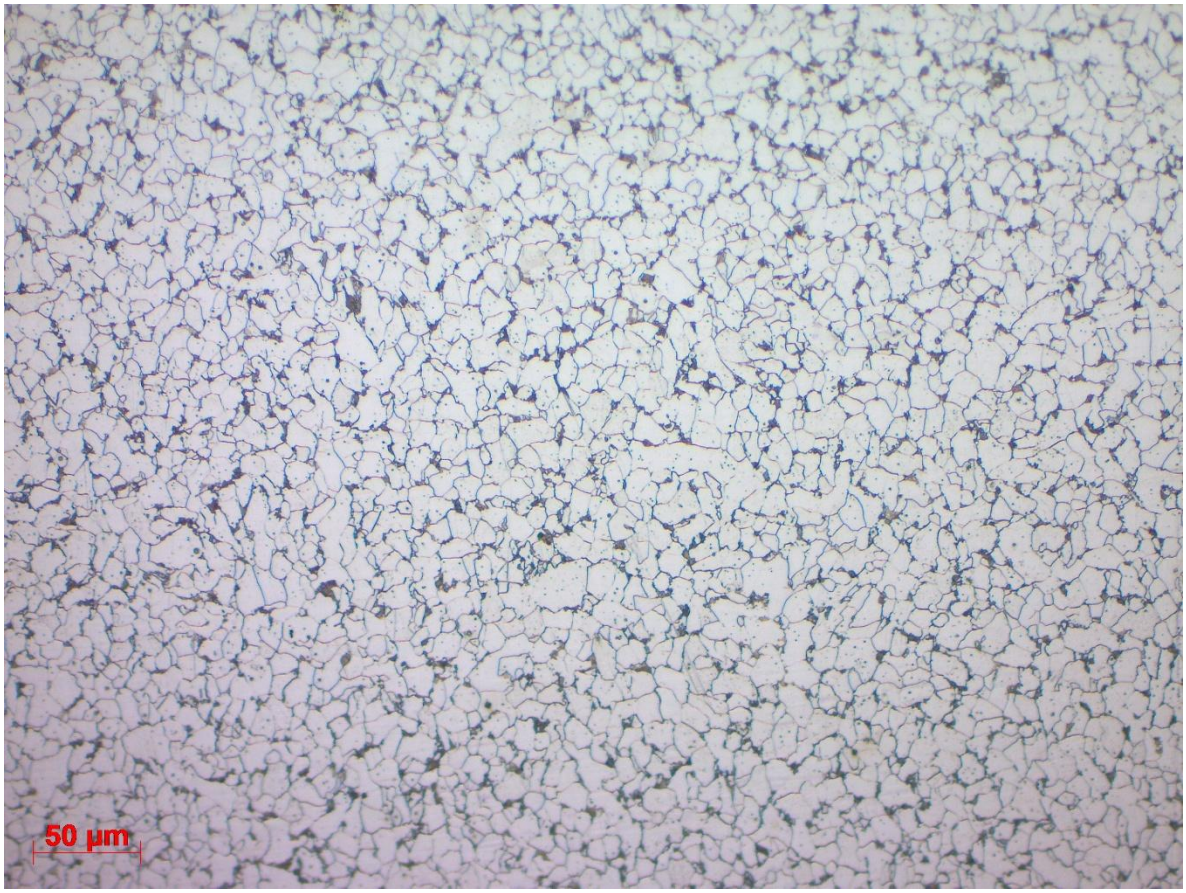
Figura 83. Micrografía a 10X de la zona de la raíz sin PWHT, mostrando el refinamiento de grano ferrítico-perlítero por efecto del recalentamiento de los pases posteriores. Aumento: 10X (Escala: 100 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 84 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) de la zona de la raíz en la junta de acero ASTM A36 en estado de soldadura (sin PWHT). A esta resolución se distingue la morfología equiaxial de los pequeños granos de ferrita (fase clara) y la fina dispersión intergranular de las colonias perlíteras (fase oscura). Esta microestructura refinada se debe al efecto de normalizado/recristalización que sufren los primeros pases de soldadura al ser recalentados por los pases de relleno subsiguientes, garantizando un grano fino en el núcleo de la raíz.

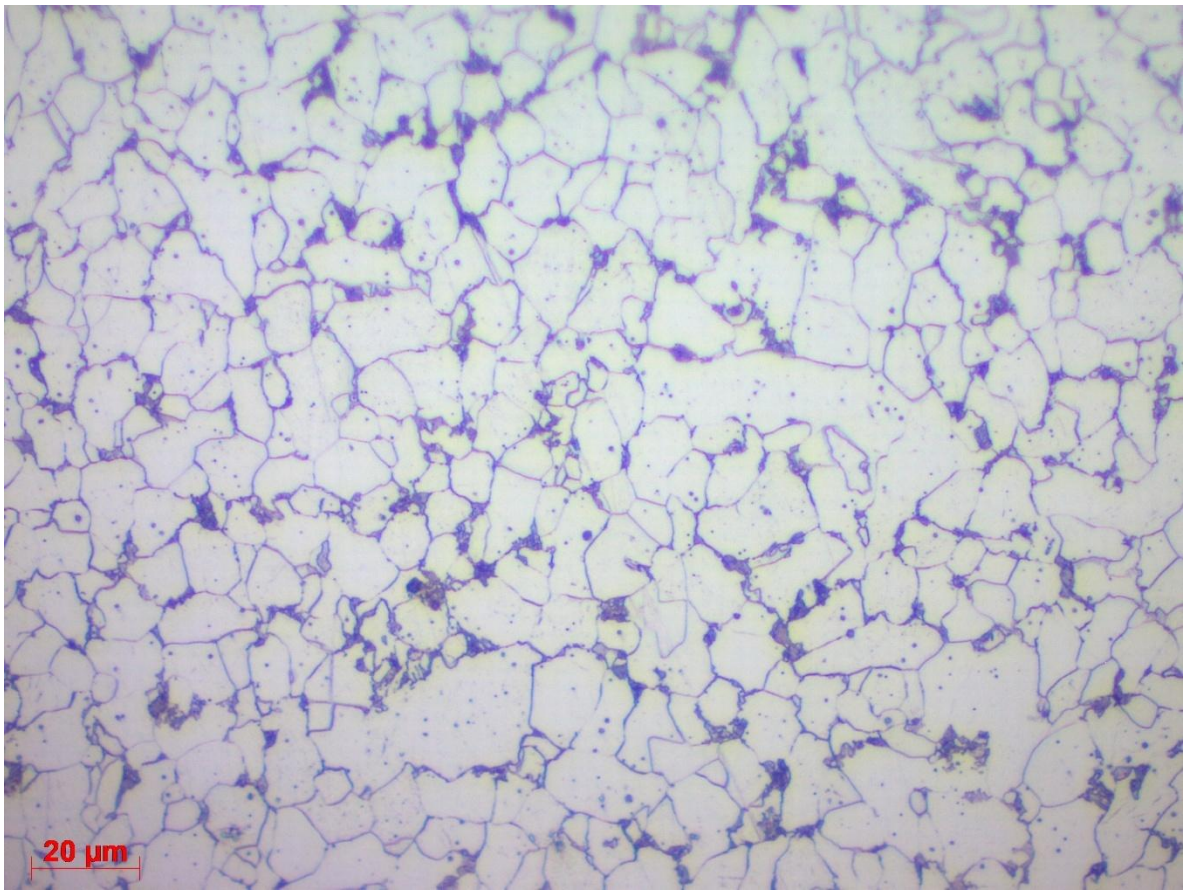
Figura 84. Micrografía a detalle a 200X de la zona de la raíz sin PWHT, evidenciando granos equiaxiales finos de ferrita con perlita intergranular recalentada. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 85 se muestra la micrografía a alta resolución de 500X (escala gráfica de 20 µm) correspondiente a la zona de la raíz en la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A esta magnificación se aprecian los contornos de los granos ferríticos poligonales (fase clara) y la distribución de las colonias de perlita (fase oscura) alojadas en los bordes de grano y puntos triples.

Figura 85. Micrografía a alta magnificación (500X) de la zona de la raíz sin PWHT, evidenciando la nitidez de los bordes intergranulares de la ferrita poligonal y perlita fina. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).

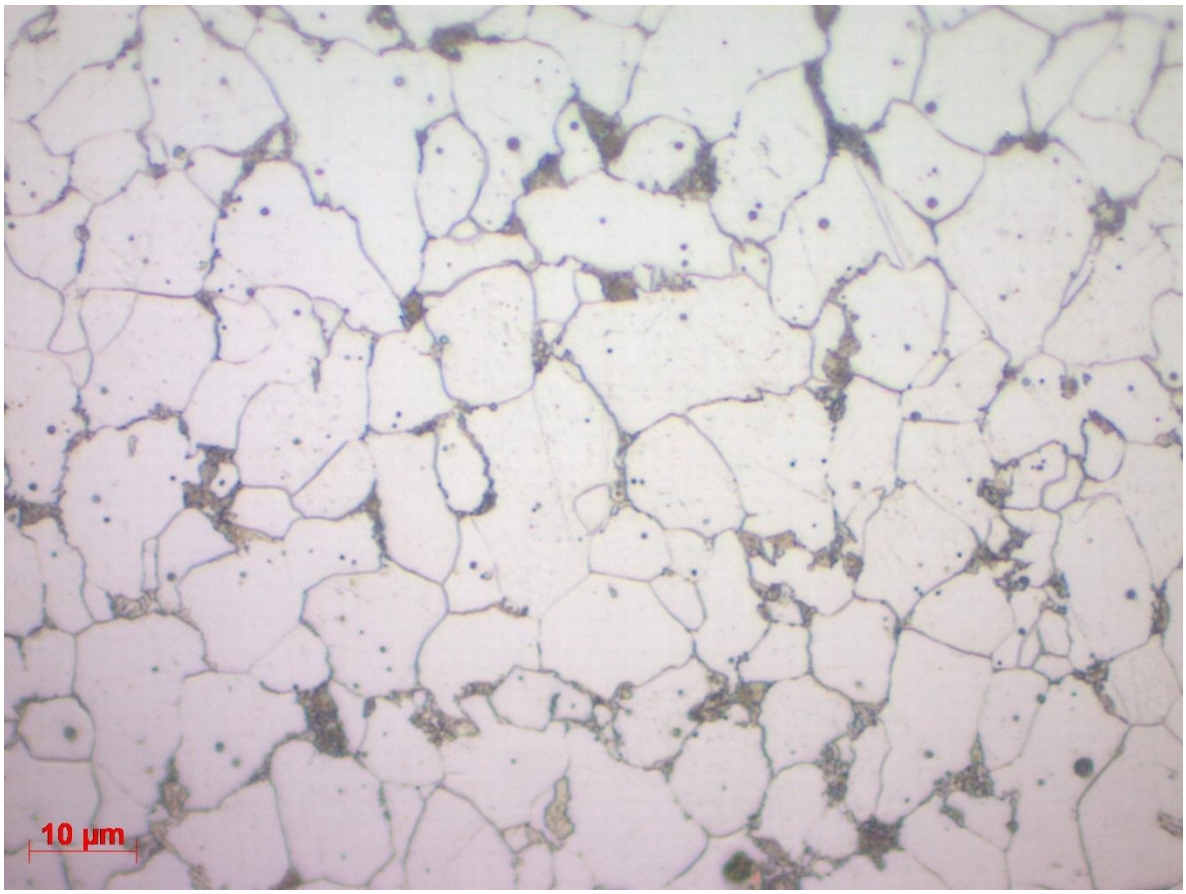


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 86 se presenta la micrografía a máxima resolución de 1000X (escala gráfica de 10 µm) correspondiente a la zona de la raíz en la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A esta magnificación se definen con nitidez los límites de los granos ferríticos poligonales (fase clara) y las finas colonias de perlita (fase oscura) alojadas en los bordes de grano y puntos triples. Tomando como referencia la escala gráfica integrada de 10 µm, el diámetro promedio de los granos ferríticos oscila entre

6 µm y 10 µm, lo que equivale a un número de tamaño de grano ASTM 10.5 a 11.5 según la norma ASTM E112.

Figura 86. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la zona de la raíz sin PWHT, mostrando granos ferríticos poligonales fino y perlita intergranular. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).

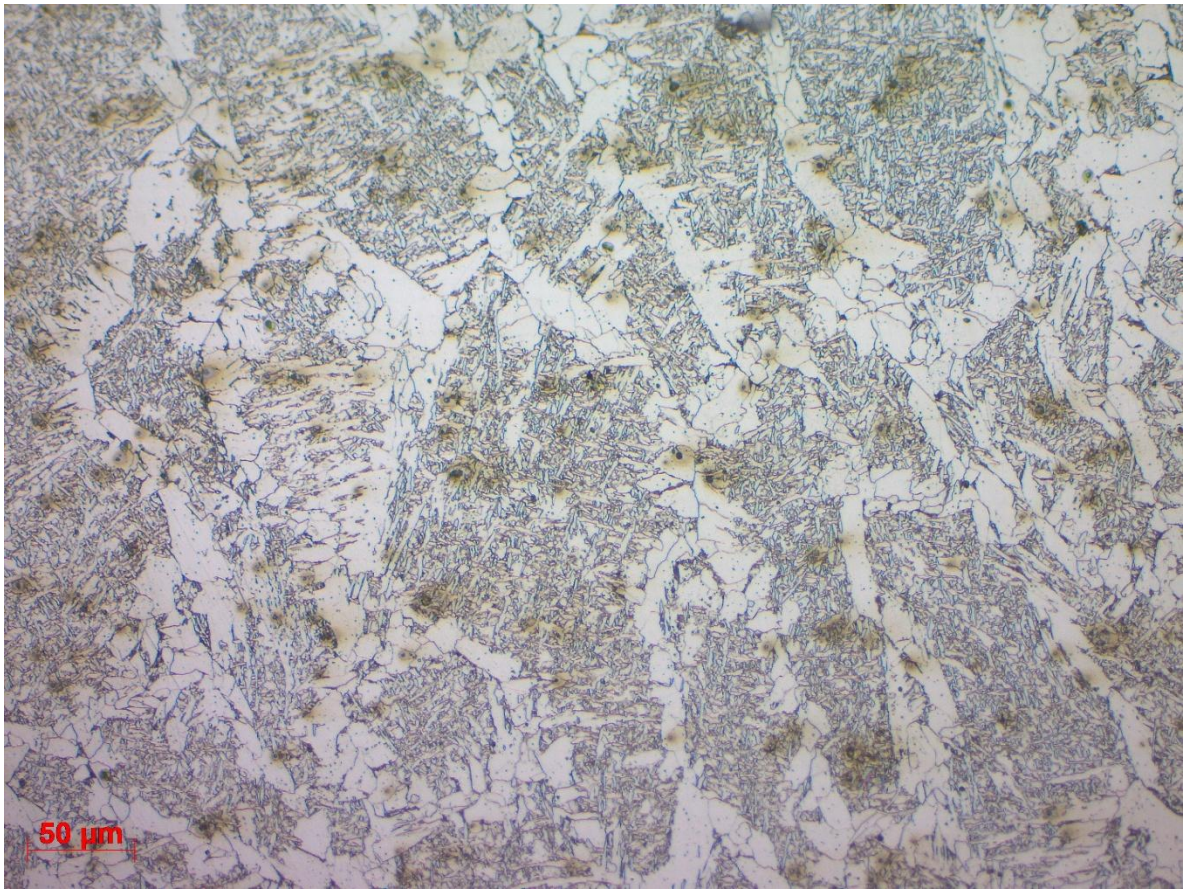


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

5.8.3. Zona de relleno de soldadura

En la Figura 87 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm|) correspondiente a la zona de relleno en el metal de soldadura de la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A esta magnificación se observa la microestructura de solidificación primaria del cordón, caracterizada por la presencia de red de ferrita al interior/borde de grano primario (fase clara alargada) y una matriz intragranular predominantemente compuesta por ferrita acicular en disposición entrelazada, junto con ferrita con segunda fase no alineada y pequeñas colonias de perlita/fases oscuras.

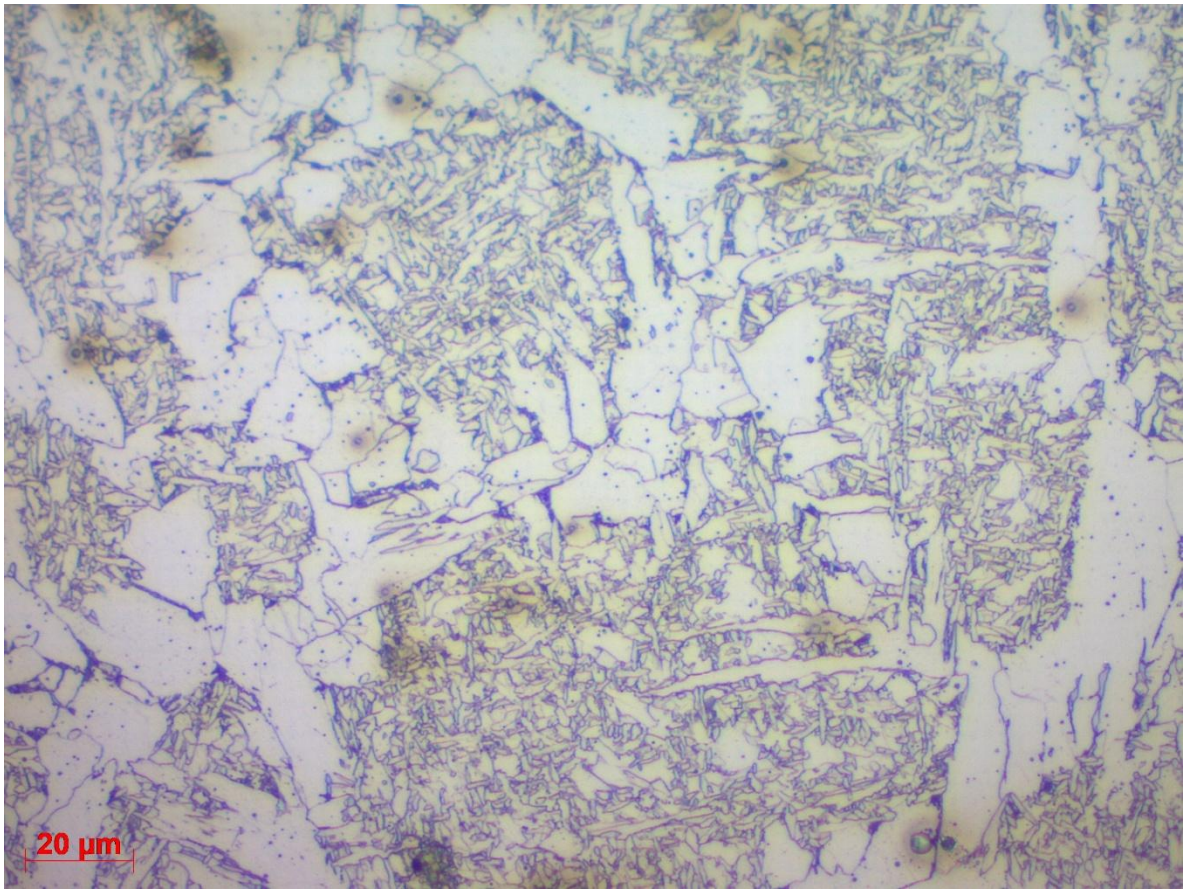
Figura 87. Micrografía a 200X de la zona de relleno (metal de soldadura) sin PWHT, evidenciando red de ferrita primaria y matriz intragranular con ferrita acicular entrelazada. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 88 se muestra la micrografía a alta resolución de 500X (escala gráfica de 20 µm) correspondiente a la zona de relleno en la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A este aumento se definen con claridad las agujas entrelazadas de la ferrita acicular en el núcleo de los granos, así como la ferrita de borde de grano (alotriomórfica) delimitando los límites austeníticos previos. Asimismo, se aprecian finos agregados de perlita e inclusiones no metálicas dispersas.

Figura 88. Micrografía a alta magnificación (500X) de la zona de relleno sin PWHT, evidenciando el entramado de ferrita acicular e islas de ferrita de borde de grano. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).

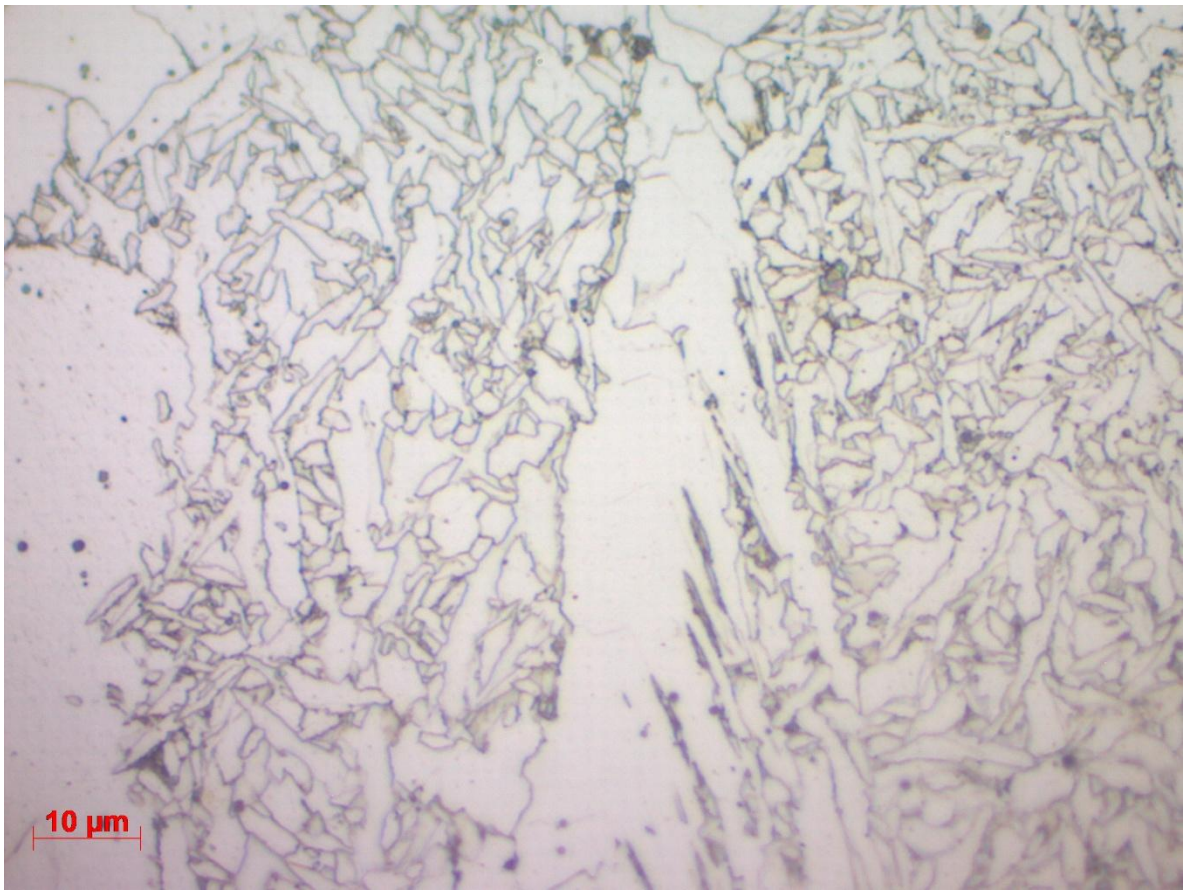


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 89 se presenta la micrografía a máxima resolución de 1000X (escala gráfica de 10 µm) correspondiente a la zona de relleno en el metal de soldadura de la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A este aumento se aprecia la morfología de las placas y agujas entrelazadas de ferrita acicular creciendo al interior del grano austenítico previo, junto con la ferrita de borde de grano y ferrita con segunda fase no alineada. Tomando como referencia la escala gráfica integrada

de 10 µm, la fina red de agujas ferríticas presenta anchos típicos de subgrano entre 1 µm y 3 µm.

Figura 89. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la zona de relleno sin PWHT, mostrando en detalle las agujas entrelazadas de ferrita acicular y ferrita de borde de grano. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).

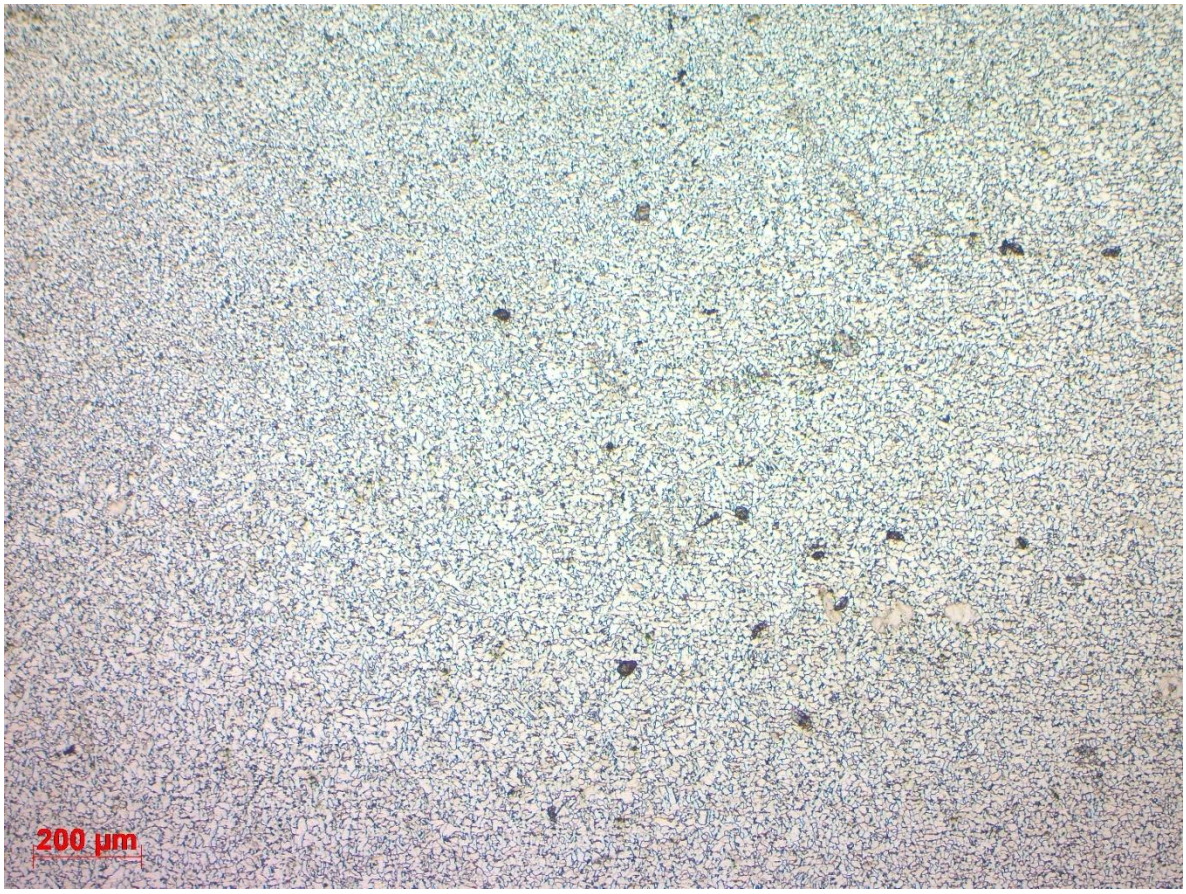


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

5.8.4. Zona ZAC derecha

En la Figura 90 se presenta la micrografía panorámica a 50X (escala gráfica de 200 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la junta de acero ASTM A36 en estado de soldadura (sin PWHT). A este aumento panorámico se aprecia una estructura uniforme de grano fino, correspondiente a la subzona de grano refinado o normalizado de la ZAC. La matriz está compuesta por una fina mezcla de ferrita equiaxial (fase clara) y pequeña dispersión perlítera (fase oscura), evidenciando la recristalización completa alcanzada en esta región debido a las temperaturas de pico austeníticas durante el paso de soldadura.

Figura 90. Micrografía panorámica a 50X de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha sin PWHT, mostrando un marcado refinamiento microestructural. Aumento: 500X / Objetivo 5X (Escala: 200 µm).

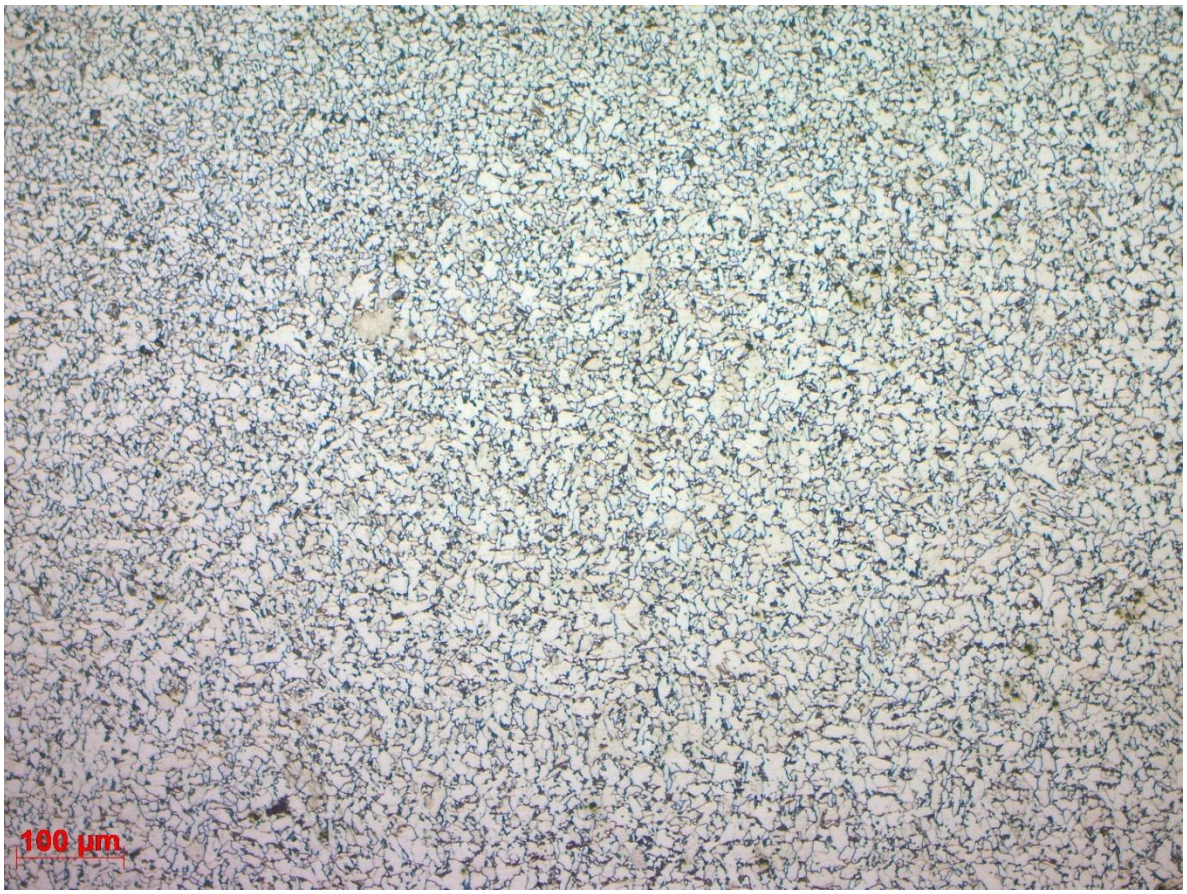


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 91 se muestra la micrografía a 100X (escala gráfica de 100 µm) correspondiente a la subzona de grano fino de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A esta resolución se observa con nitidez una matriz altamente refinada e isotrópica compuesta por granos equiaxiales de ferrita (fase clara) y finas colonias de perlita (fase oscura) alojadas en los bordes intergranulares. Esta microestructura homogénea evidencia

la transformación de fase completa y el efecto de refinamiento producido por el ciclo térmico de la soldadura SMAW sobre el material base ASTM A36.

Figura 91. Micrografía a 100X de la ZAC derecha sin PWHT, evidenciando una estructura de grano fino recristalizada de ferrita y perlita. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).

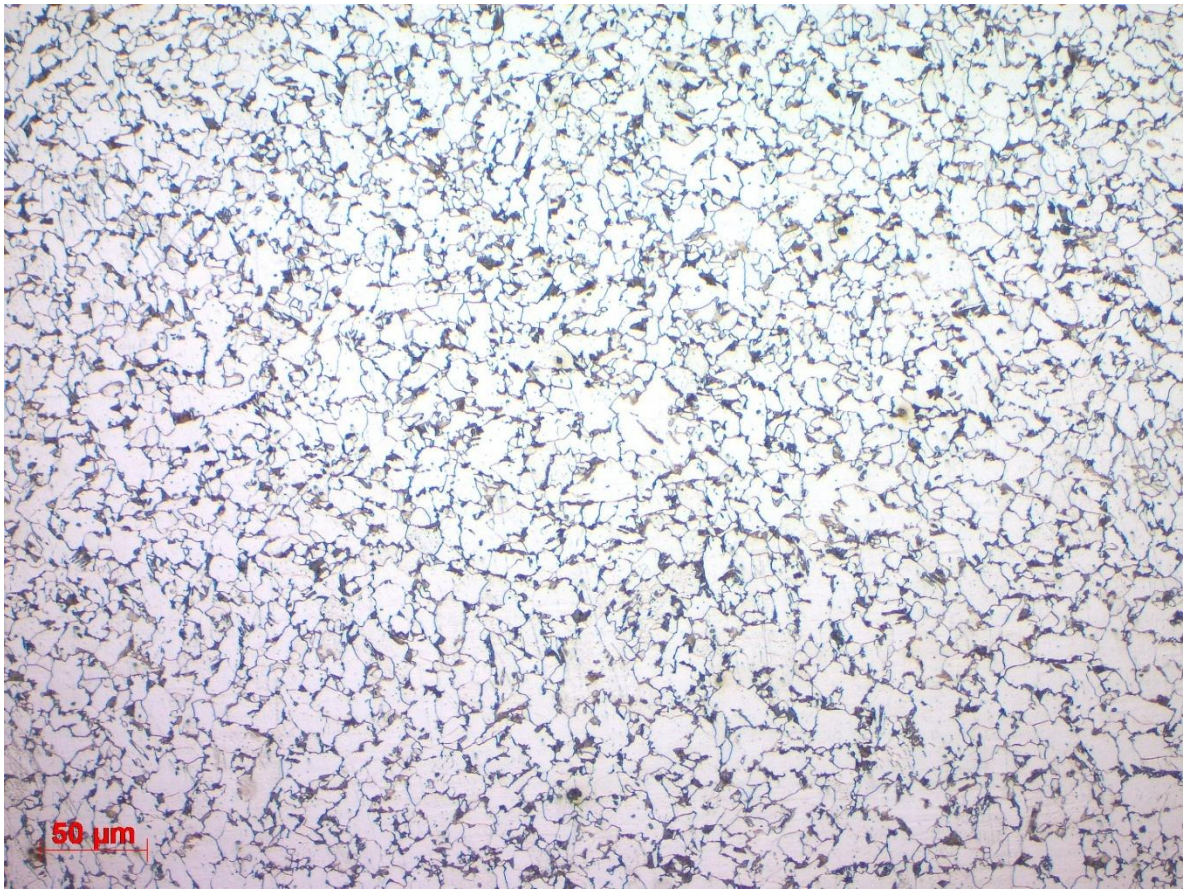


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 92 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la junta de acero

ASTM A36 sin tratamiento térmico (sin PWHT). A este aumento se aprecia con mayor nivel de detalle la morfología de los granos ferríticos finos y equiaxiales (fase clara), delimitados por la presencia intergranular de finas colonias de perlita (fase oscura). La ausencia de bandas preferenciales en comparación con el metal base confirma la recristalización completa provocada por las temperaturas de pico alcanzadas durante la soldadura.

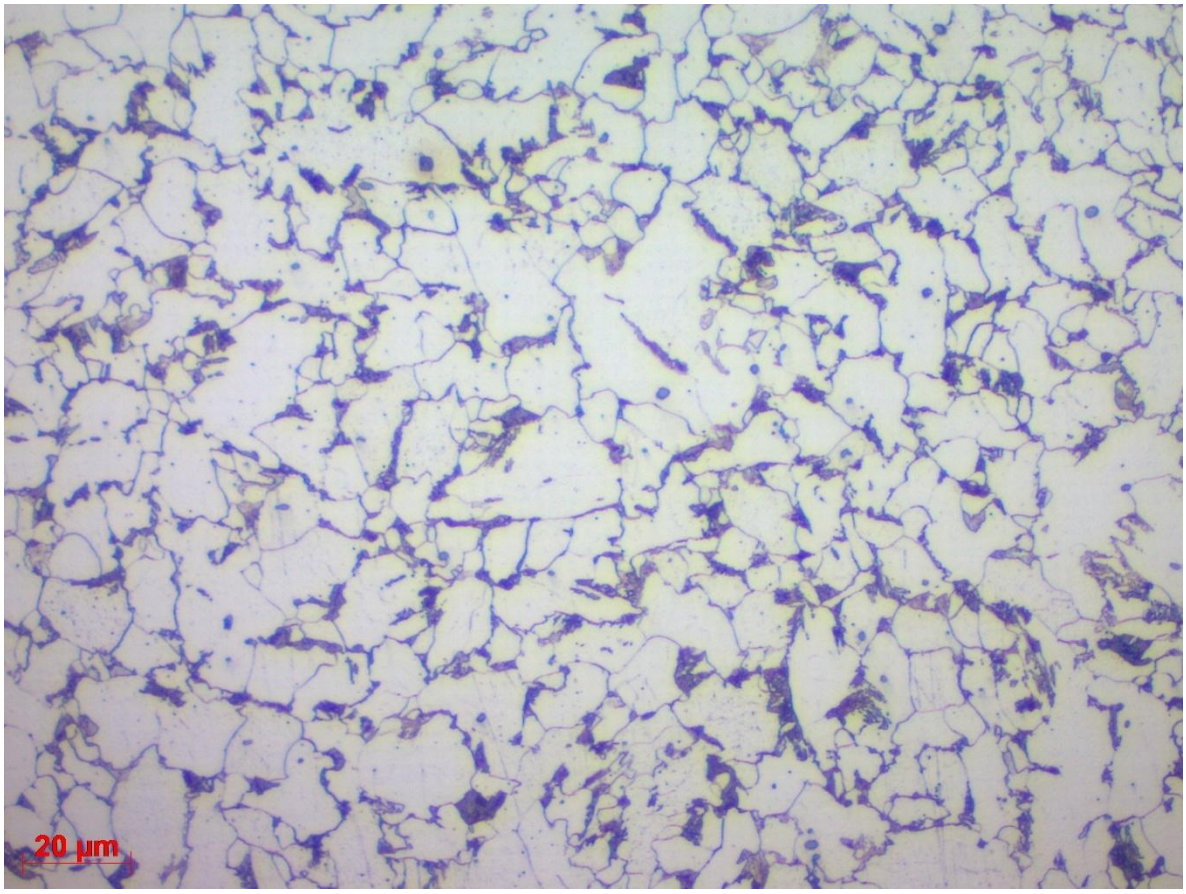
Figura 92. Micrografía a detalle a 200X de la ZAC derecha sin PWHT, evidenciando morfología equiaxial fina de ferrita y distribución uniforme de perlita intergranular. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 93 se muestra la micrografía a alta resolución de 500X (escala gráfica de 20 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A esta magnificación se observan con claridad las fronteras de grano de la matriz ferrítica poligonal (fase clara) y la presencia de colonias perlíteras finas (fase oscura) perfectamente delineadas en las uniones intergranulares y puntos triples.

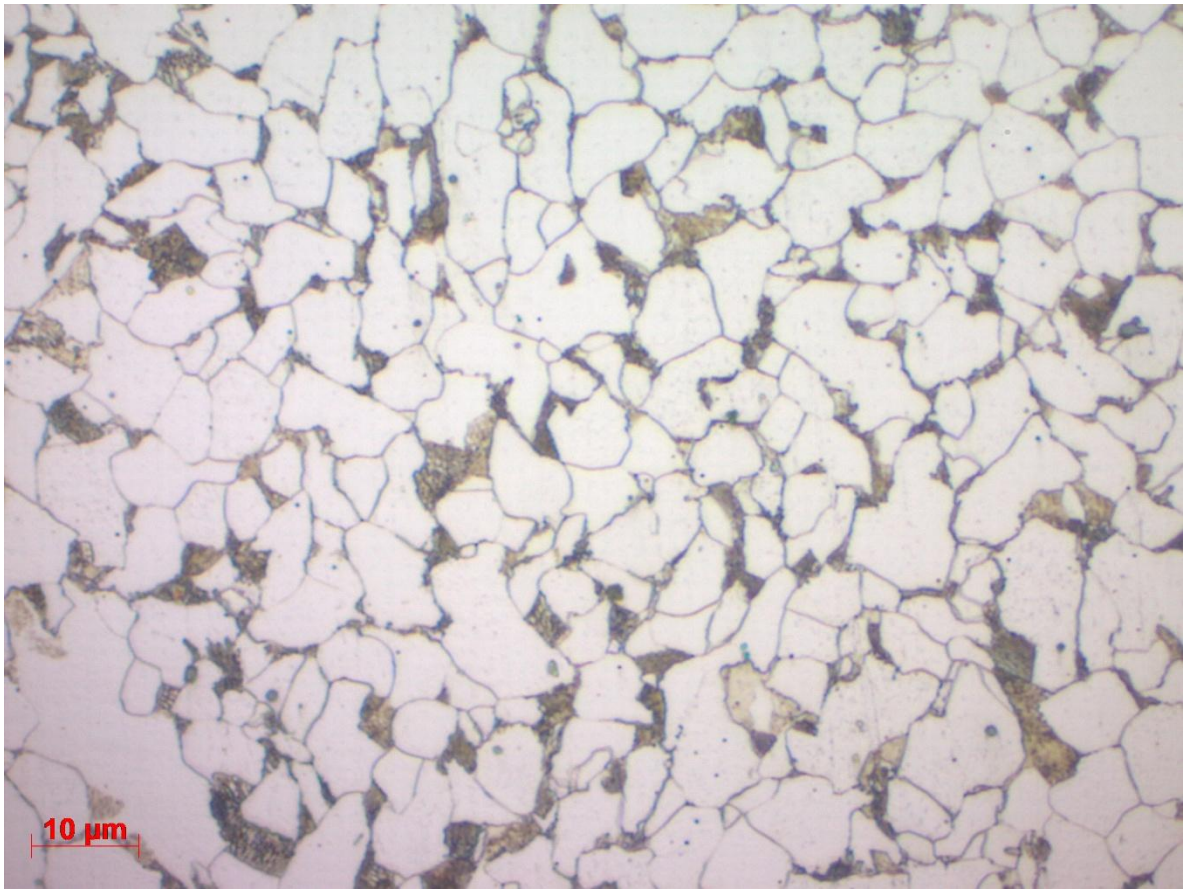
Figura 93. Micrografía a alta magnificación (500X) de la ZAC derecha sin PWHT, evidenciando los límites intergranulares de la ferrita equiaxial y la perlita fina. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 94 se presenta la micrografía a máxima resolución de 1000X (escala gráfica de 10 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) derecha en la junta de acero ASTM A36 en estado de soldadura (sin PWHT). A esta magnificación se observan con elevada nitidez los contornos de los granos ferríticos poligonales (fase clara) y la fina estructura laminar de las colonias de perlita (fase oscura) alojadas en los bordes de grano e intersecciones triples. Tomando como referencia la escala gráfica de 10 µm, el tamaño medio de los granos ferríticos se sitúa en un rango aproximado de 6 µm a 10 µm, correspondiendo a un número de tamaño de grano ASTM 10.5 a 11.5 según la norma ASTM E112.

Figura 94. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la ZAC derecha sin PWHT, evidenciando granos equiaxiales finos de ferrita y perlita en bordes intergranulares. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).



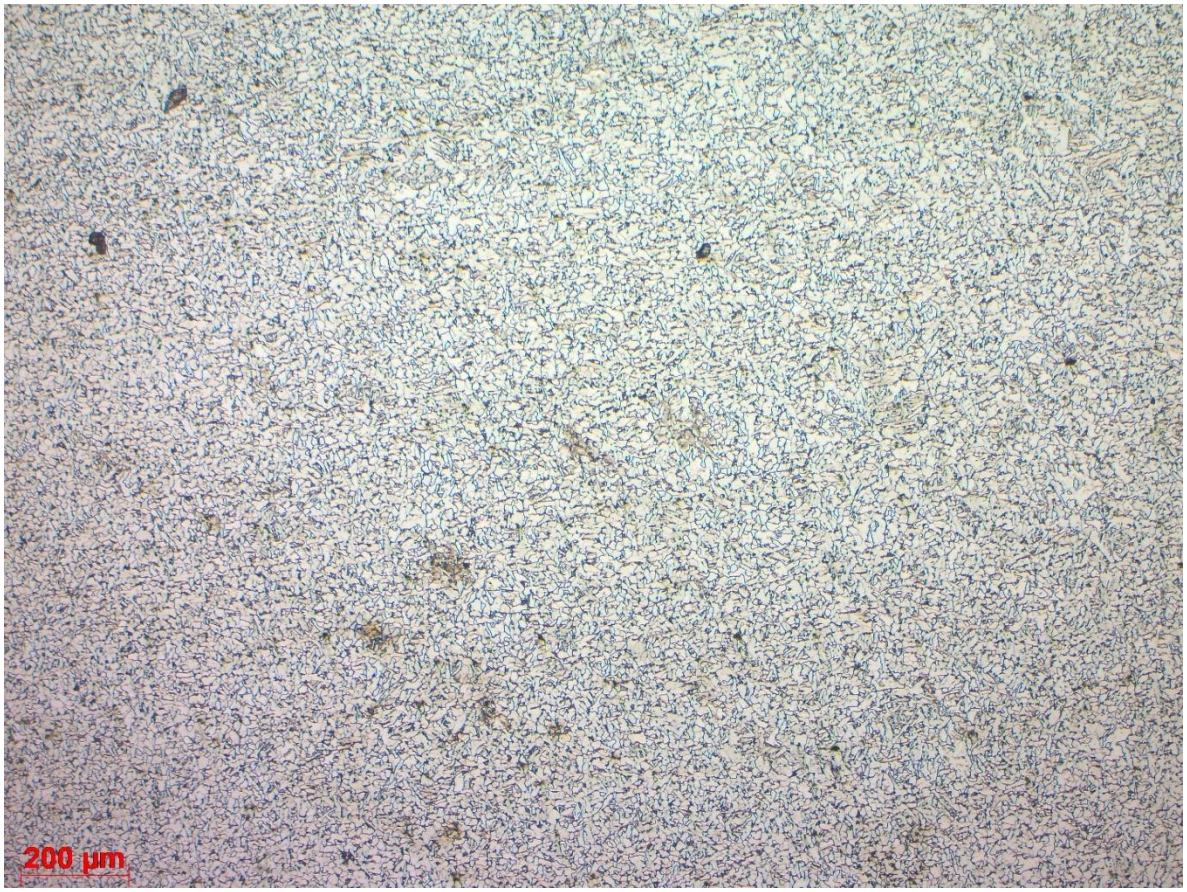
Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

5.8.5. Zona ZAC izquierda

En la Figura 95 se presenta la micrografía panorámica a 50X (escala gráfica de 200 µm) de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la junta de acero ASTM A36 en estado de soldadura (sin PWHT). A este aumento se observa una matriz fina y homogénea correspondiente a la subzona de grano refinado, caracterizada por la recristalización completa por transformación de fase austenítica provocada

por el ciclo térmico de la soldadura SMAW. La microestructura muestra una mezcla isotrópica de ferrita (fase clara) y perlita (fase oscura) dispersa.

Figura 95, Micrografía panorámica a 50X de la ZAC izquierda sin PWHT, evidenciando refinamiento microestructural e isotropía de grano en la subzona recristalizada. Aumento: 50X (Escala: 200 µm).

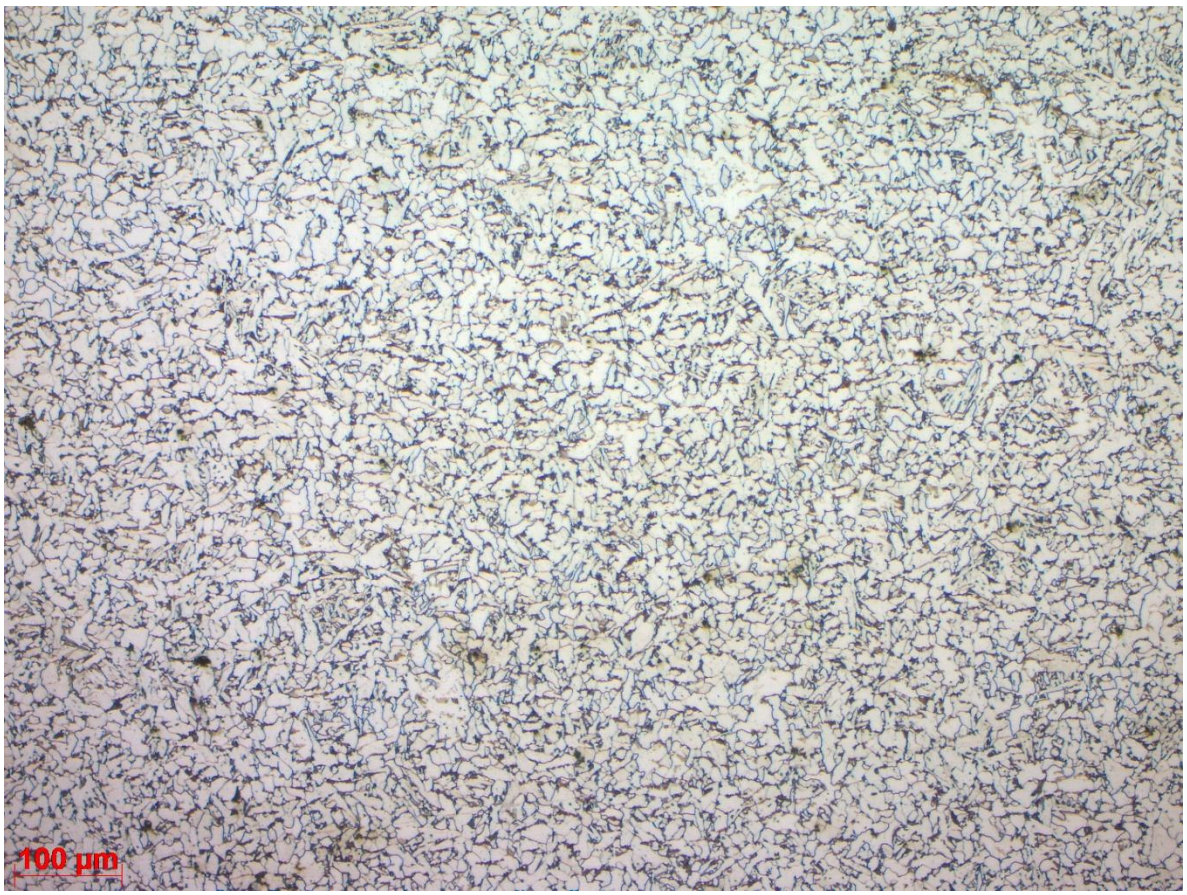


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 96 se muestra la micrografía a 100X (escala gráfica de 100 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la probeta sin tratamiento térmico (sin PWHT). A esta resolución se distingue una matriz con

marcado refinamiento microestructural en la subzona de grano fino, integrada por una red de granos ferríticos poligonales (fase clara) y colonias de perlita (fase oscura) distribuidas en los bordes intergranulares.

Figura 96. Micrografía a 100X de la ZAC izquierda sin PWHT, evidenciando una estructura fina y recristalizada de ferrita y perlita. Aumento: 100X (Escala: 100 µm).

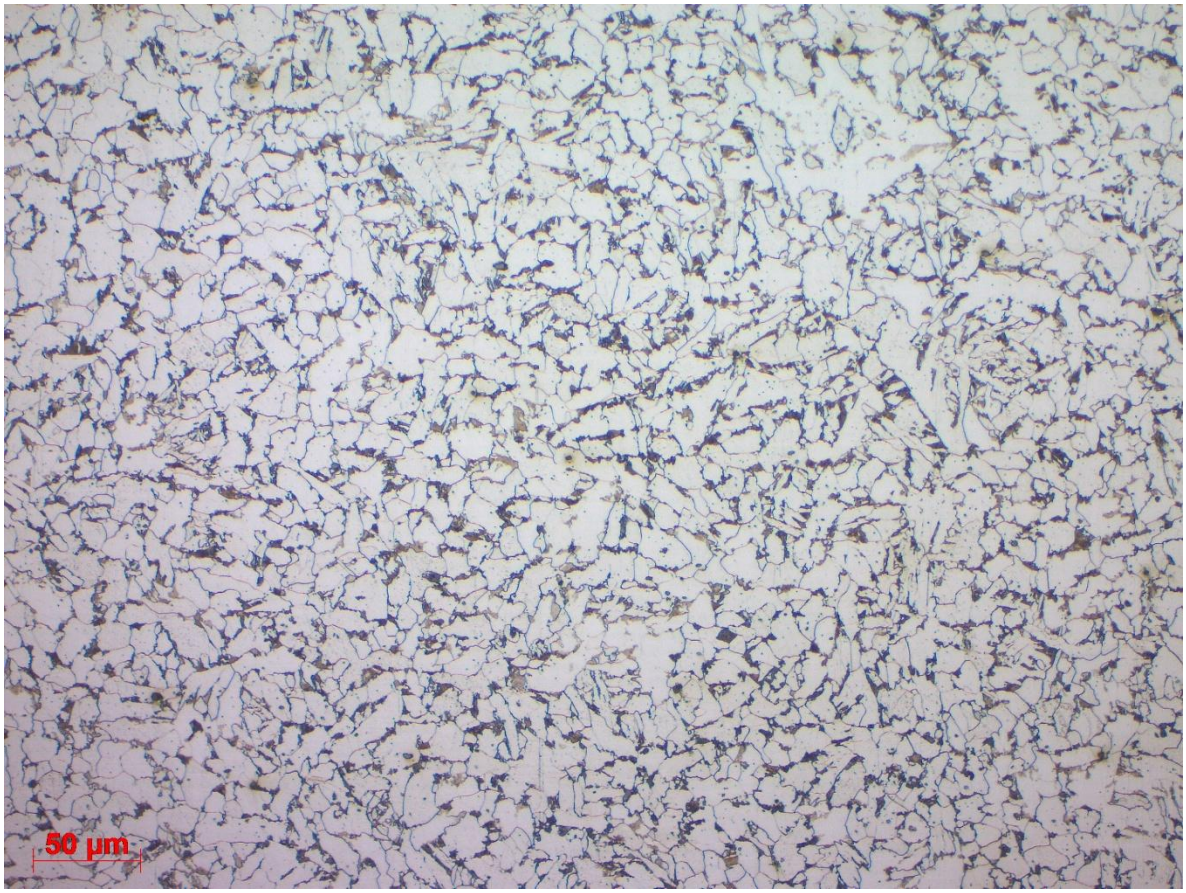


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 97 se presenta la micrografía a 200X (escala gráfica de 50 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la junta de acero

ASTM A36 en estado de soldadura (sin PWHT). A este aumento se aprecia con detalle la morfología equiaxial de los granos ferríticos (fase clara) y la distribución uniforme de la perlita (fase oscura) alojada en los bordes de grano intergranulares.

Figura 97. Micrografía a detalle a 200X de la ZAC izquierda sin PWHT, evidenciando morfología de granos equiaxiales de ferrita y perlita intergranular de grano fino. Aumento: 200X (Escala: 50 µm).

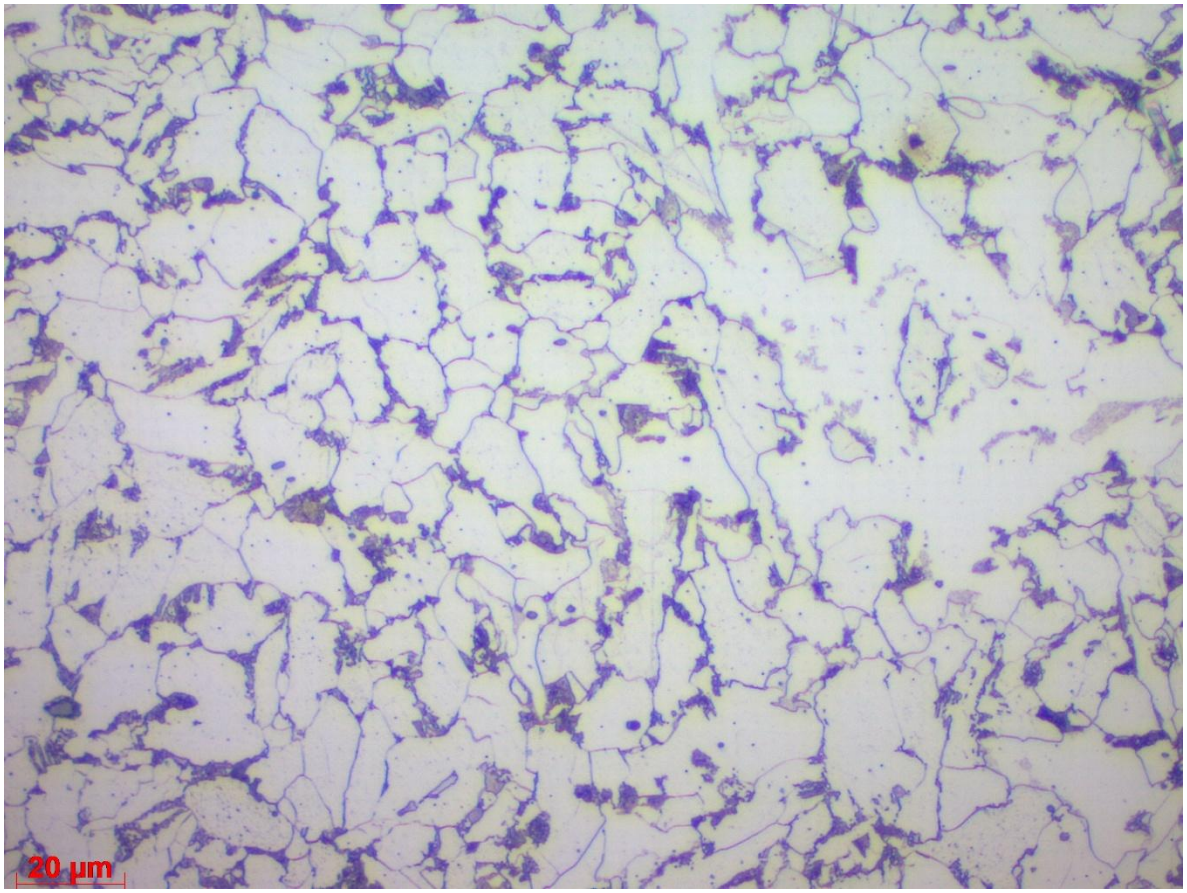


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 98 se presenta la micrografía a alta resolución de 500X (escala gráfica de 20 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda en la

junta de acero ASTM A36 en estado de soldadura (sin PWHT). A esta magnificación se definen claramente los límites de grano de la matriz de ferrita poligonal (fase clara) y las colonias perlíteras (fase oscura) alojadas en las uniones intergranulares.

Figura 98. Micrografía a alta magnificación (500X) de la ZAC izquierda sin PWHT, mostrando detalles de los límites intergranulares de la ferrita y la perlita fina. Aumento: 500X (Escala: 20 µm).

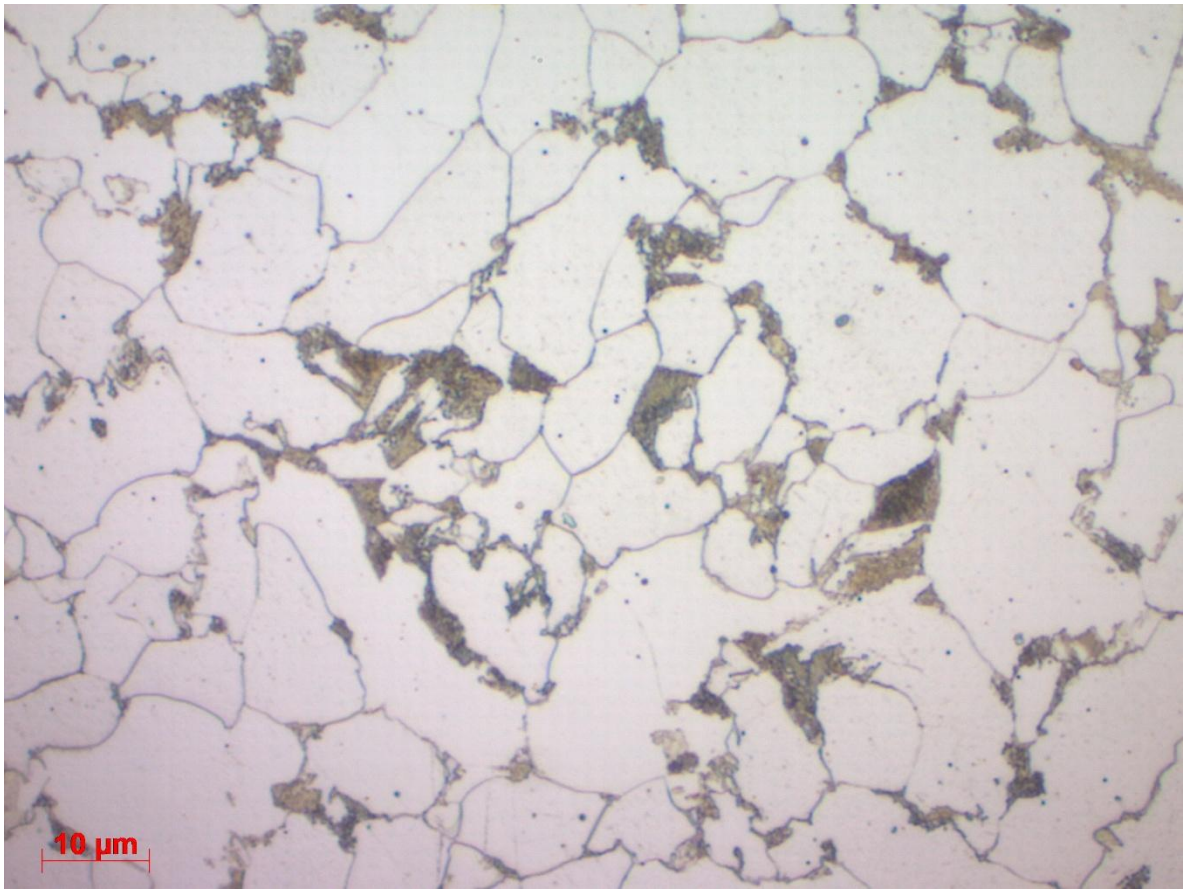


Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

En la Figura 99 se presenta la micrografía a máxima resolución de 1000X (escala gráfica de 10 µm) correspondiente a la Zona Afectada por el Calor (ZAC) izquierda

en la junta de acero ASTM A36 en estado de soldadura (sin PWHT). A esta magnificación se aprecian con elevada definición las fronteras de los granos ferríticos poligonales (fase clara) y la distribución de las colonias de perlita (fase oscura) alojadas en los bordes de grano e intersecciones triples. Con base en la escala gráfica de 10 µm, el tamaño medio de los granos ferríticos se sitúa en un rango de aproximadamente 8 µm a 12 µm, lo que equivale a un número de tamaño de grano ASTM 10 a 11 según la norma ASTM E112.

Figura 99. Micrografía a máxima resolución (1000X) de la ZAC izquierda sin PWHT, evidenciando granos equiaxiales de ferrita y perlita en bordes intergranulares. Aumento: 1000X (Escala: 10 µm).



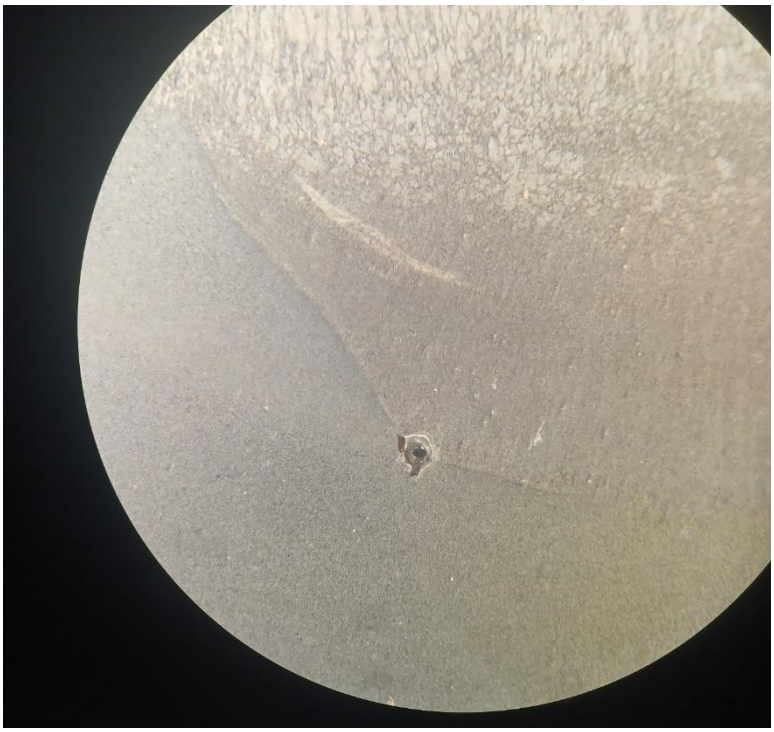
Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026

5.8.6. Macrofotografía en Estereomicroscopio de la Superficie de la Junta Soldada sin PWHT.

Se muestra el poro mediante estereomicroscopio de la sección transversal de la junta soldada de acero ASTM A36 sin tratamiento térmico (sin PWHT). A diferentes aumentos se aprecia la transición de las zonas de la junta y se observa la presencia de un poro de geometría cavitaria en el sector central.

Este poro es una discontinuidad volcánica o de atrapamiento de gas que permanece en la estructura tras la solidificación del cordón. Se genera debido a que los gases disueltos en el baño de fusión provenientes de la descomposición del revestimiento del electrodo, humedad residual o contaminación superficial no lograron escapar a la superficie antes de que el metal líquido solidificara por completo, quedando atrapados en forma de burbujas en el interior del metal de soldadura.

Figura 100. Macrofotografía a 2X en estereomicroscopio de la sección transversal de la junta soldada sin PWHT. Aumento: 2X.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

Figura 101. Macrofotografía a 2.5X en estereomicroscopio de la junta soldada sin PWHT, evidenciando la estructura macroscópica y patrones de solidificación del cordón. Aumento: 2.5X.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

Figura 102. Macrofotografía a 2.5X en estereomicroscopio del poro interno en la junta soldada sin PWHT, mostrando en detalle la cavidad. Aumento: 2.5X.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

Figura 103. Macrofotografía a 5X en estereomicroscopio del poro interno en la junta soldada sin PWHT, mostrando en detalle la cavidad y la morfología del borde del poro. Aumento: 5X.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

Figura 104. Macrofotografía a 8X en estereomicroscopio del poro interno en la junta soldada sin PWHT. Aumento: 8X.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

5.9. ENSAYOS DE MICRODUREZA VICKERS ($HV_{0.2}$) EN LAS JUNTAS SOLDADAS CON Y SIN PWHT

5.9.1. Equipo para Ensayos de Microdureza: Microdurómetro Shimadzu HMV

Para la determinación del perfil de dureza en las diferentes zonas de las uniones soldadas (Metal Base, ZAC y Metal de Soldadura) en las probetas con y sin PWHT, se utilizó un microdurómetro digital Shimadzu serie HMV (Figura 105). Este equipo cuenta con un indentador de pirámide de diamante con un ángulo entre caras de 136°, adecuado para la escala Vickers (HV) conforme a la norma ASTM E384.

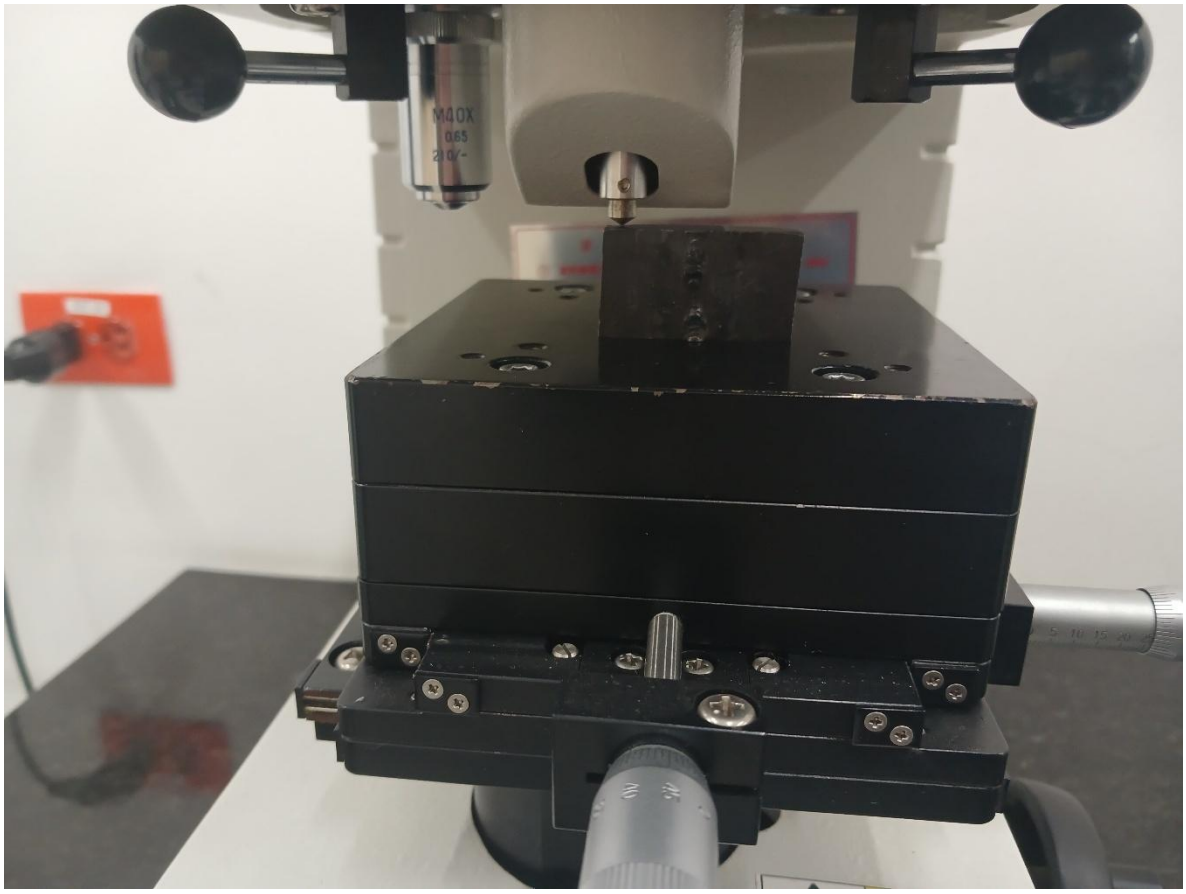
El equipo está dotado de una mesa micrométrica XY para el posicionamiento preciso de las indentaciones a lo largo del perfil de la junta, un sistema óptico de medición directa mediante ocular micrométrico y una pantalla digital para la configuración de parámetros como la carga aplicada (gramos-fuerza o Newtons) y el tiempo de permanencia.

Figura 105. Microdurómetro Shimadzu HMV utilizado para la medición de perfiles de microdureza Vickers (HV) en las uniones soldadas de acero ASTM A36.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

Figura 106. Posicionamiento de la probeta de ensayo sobre la mesa micrométrica XY del microdurómetro durante la toma del perfil de dureza.



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

5.9.2. Parámetros del Ensayo de Microdureza Vickers

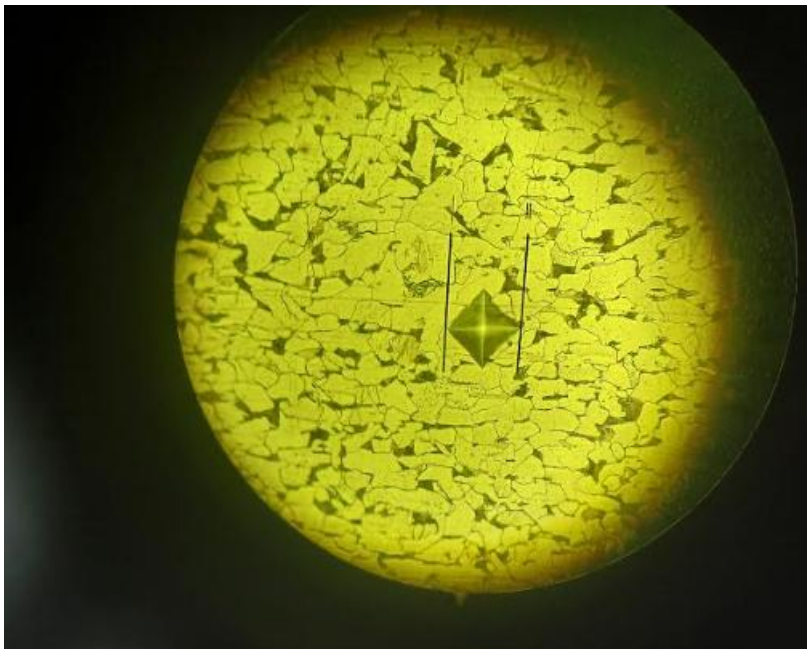
Para la caracterización mecánica del perfil de dureza en las uniones soldadas, se definieron los siguientes parámetros operativos en el microdurómetro conforme a los lineamientos de la norma ASTM E384:

- Carga aplicada (P): 1.961 N ($HV_{0.2}/200gf$)

- Tiempo de permanencia: 10 segundos.
- Número de indentaciones: 5 mediciones por cada zona de la junta (Metal Base, ZAC Izquierda, Metal de Soldadura, ZAC Derecha).

En la Figura 107 se muestra la vista a través del ocular micrométrico del microdurómetro Shimadzu HMV durante la lectura de una impronta de microdureza Vickers. En el centro del campo de visión se distingue la indentación piramidal de aristas definidas, realizada sobre la matriz microestructural compuestas por granos ferríticos y colonias perlíteras. Las líneas paralelas verticales corresponden a los retículos del filamento móvil del ocular, los cuales se alinean con los vértices opuestos de la huella para determinar la longitud de las diagonales (d_1 y d_2). A partir de la media aritmética de estas diagonales y la carga aplicada de 1.961 N, el equipo calcula automáticamente el valor cuantitativo de dureza Vickers conforme a la norma ASTM E384.

Figura 107. Vista a través del ocular micrométrico del microdurómetro Shimadzu HMV



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

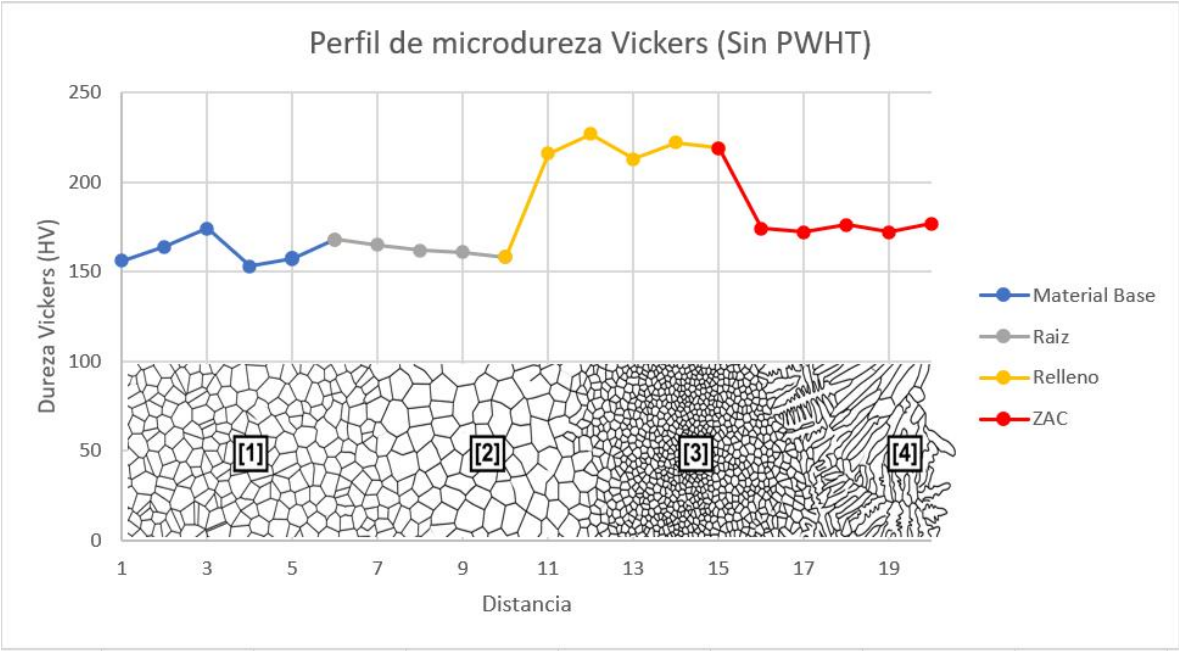
5.9.3. Perfil de Microdureza en la Junta Soldada Sin PWHT

Tabla 3. Valores de microdureza Vickers (HV) obtenidos del microdurometro durante la practica en las diferentes zonas de la junta soldada en estado sin tratamiento térmico posterior a la soldadura (Sin PWHT).

Sin PWHT			
Material Base	Raiz	Relleno	ZAC
156	168	216	174
164	165	227	172
174	162	213	176
153	161	222	172
157	158	219	177

Fuente: Elaboración propia

Figura 108. Perfil de microdureza Vickers (HV0.2) a lo largo de las distintas zonas de la junta soldada en estado de soldadura (Sin PWHT).



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 108 se presenta el perfil transversal de microdureza Vickers ($HV_{0.2}$) correspondiente a la junta soldada en estado de soldadura sin PWHT). A partir de la tendencia observada en las distintas zonas evaluadas, se observan los siguientes comportamientos:

Material Base [1]: Presenta una dureza estable con valores promedio que oscilan entre 153 HV y 174 HV, representativos de la microestructura ferrítico-perlílica convencional del acero estructural ASTM A36.

Pase de Raíz [2]: Mantiene valores moderados (158 HV a 168 HV), ligeramente similares al material base. Esto se debe al efecto de recalentamiento y normalizado parcial que sufre la raíz tras la aportación de los pases posteriores de soldadura.

Pase de Relleno [3]: Representa la zona de mayor dureza en la junta, alcanzando un valor pico de 227 HV. Este incremento significativo se atribuye a las elevadas velocidades de enfriamiento tras la deposición del último pase, la estructura colamnar/dendrítica propia del metal de soldadura y el mayor refinamiento o presencia de fases de mayor dureza sin aliviar.

Zona Afectada por el Calor - ZAC [4]: Muestra un descenso de dureza manteniéndose en un rango promedio entre 172 HV y 177 HV. Este comportamiento refleja los ciclos térmicos sufridos por el material adyacente a la línea de fusión, donde ocurren transformaciones de fase y refinamiento de grano.

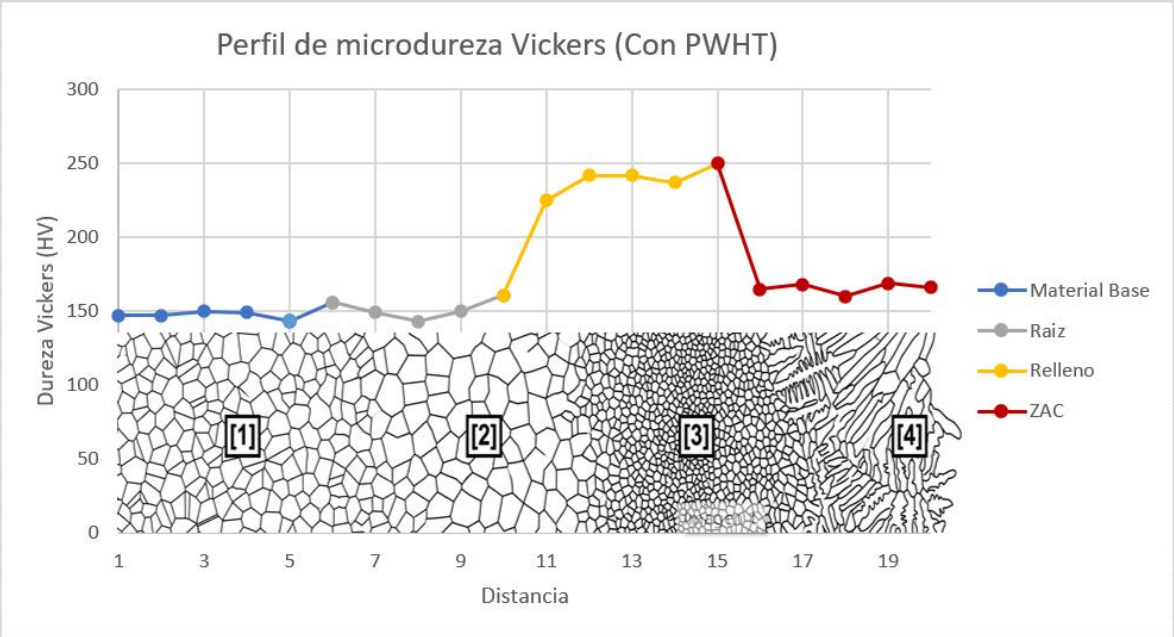
5.9.4. Perfil de Microdureza en la Junta Soldada Con PWHT

Tabla 4. Valores de microdureza Vickers (HV) obtenidos del microdurometro durante la practica en las diferentes zonas de la junta soldada en estado sin tratamiento térmico posterior a la soldadura (Con PWHT).

Con PWHT			
Material Base	Raiz	Relleno	ZAC
147	156	225	165
147	149	242	168
150	143	242	160
149	150	237	169
143	161	250	166

Fuente: Elaboración propia

Figura 109. Perfil de microdureza Vickers ($\mathrm{HV}\,0.2$) a lo largo de las distintas zonas de la junta soldada en estado de soldadura (Sin PWHT).



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 109 se muestra el perfil transversal de microdureza Vickers ($HV_{0.2}$) correspondiente a la junta soldada sometida a tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT) de acuerdo con los lineamientos de la norma AWS D1.1. El comportamiento registrado por zonas se describe a continuación:

Material Base [1]: Presenta una tendencia homogénea con valores entre 143 HV y 150 HV, mostrando una leve reducción general de dureza en comparación con la condición sin tratamiento térmico, debido a la relajación de esfuerzos y estabilidad alcanzada en la matriz ferrítico-perlílica del acero ASTM A36.

Pase de Raíz [2]: Mantiene valores estables y reducidos en el rango de 143 HV a 161 HV. El tratamiento térmico promueve un efecto de revenido/alivio en esta zona, reduciendo gradientes de dureza locales respecto al metal base.

Pase de Relleno [3]: Aunque continúa siendo la región con los valores más altos de la junta (alcanzando un pico de 250 HV), el perfil muestra una meseta más uniforme (225 HV a 250 HV). Este comportamiento es característico en la estructura de soldadura tras el sostenimiento térmico, donde se homogeniza la microestructura aliviando tensiones de enfriamiento.

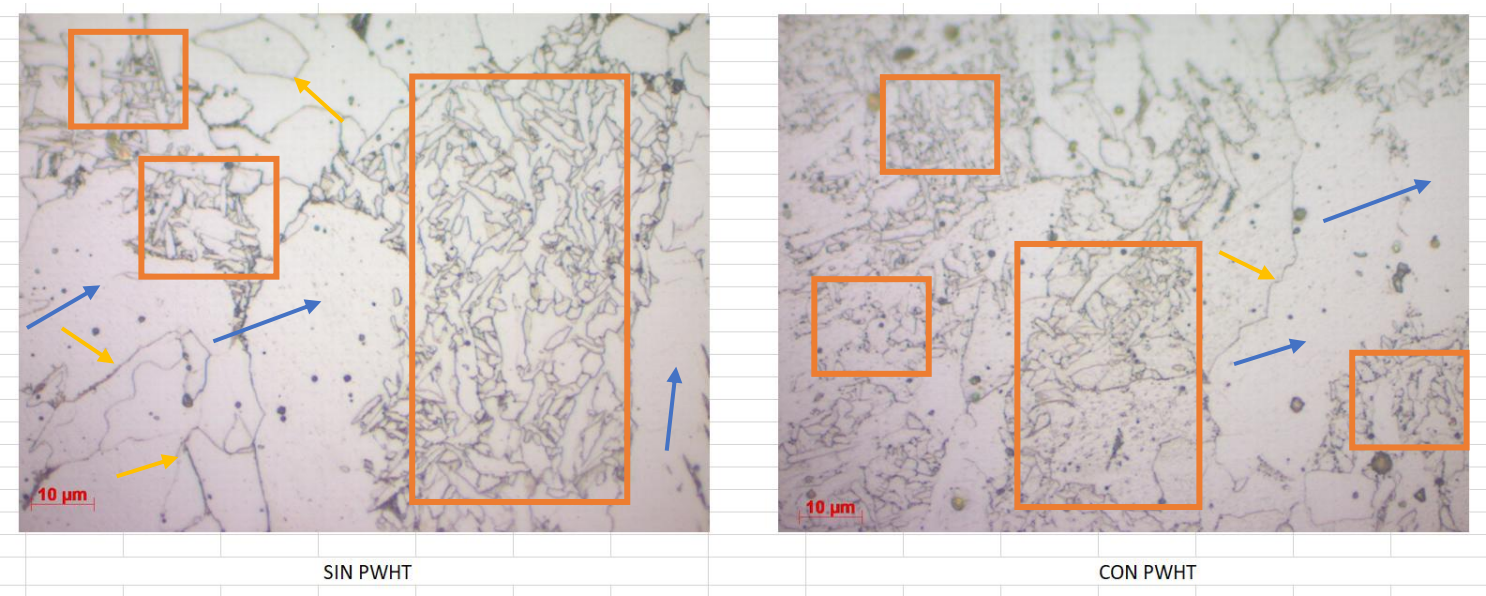
Zona Afectada por el Calor - ZAC [4]: Registra valores de dureza muy estables que oscilan entre 160 HV y 169 HV. Se evidencia una ligera disminución global frente a la muestra sin PWHT, lo que confirma el efecto ablandador/aliviador del tratamiento sobre las zonas recalentadas térmicamente por la soldadura.

6. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA MICROESTRUCTURA Y MICRODUREZA DE LAS PROBETAS PARA EVALUAR EL IMPACTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO.

Se evalúa la influencia del Tratamiento Térmico Posterior a la Soldadura (PWHT) sobre la junta soldada mediante el proceso SMAW en acero estructural ASTM A36, comparando la evolución microestructural y el comportamiento de la microdureza Vickers ($HV_{0.2}$) entre ambas condiciones.

6.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL PERFIL DE MICRODUREZA

Figura 110. Análisis microestructural comparativo a 1000x entre la condición en estado de soldadura (Sin PWHT) y tras el tratamiento térmico posterior a la soldadura (Con PWHT) en acero ASTM A36. 1000x



Fuente: Elaboración propia (Laboratorio de Metalografía, 2026)

Ferrita poligonal

Colonia Perlítica / Región Laminar

Límites de Grano

Probeta Sin PWHT: Muestra acentuados bordes de grano rígidos, interfases muy definidas y agujas o colonias con alineamientos agudos derivados de la rápida solidificación del baño fundido y los ciclos térmicos severos del proceso SMAW.

Esta concentración de distorsiones en la red cristalina y límites de fase es la responsable directa de la mayor dureza observada en esta condición (227 HV en la ZAC/Relleno) y del almacenamiento de altas tensiones residuales internas.

Probeta Con PWHT: Se observa un suavizado y difusión en los límites de grano e interfases. El sostenimiento térmico del PWHT favoreció la recuperación del material, promoviendo una leve esferoidización/coalescencia de las fases más duras y la liberación de tensiones de red. Este fenómeno explica la caída y estabilización de la microdureza a valores más tenaces y homogéneos (160-169 HV en ZAC).

Tabla 5. Comparación entre la probeta tratada térmicamente y la no tratada

Característica	Sin PWHT	Con PWHT
Morfología de las fases	Se observan estructuras laminares más definidas y con contornos más marcados.	Las estructuras presentan una apariencia más homogénea y menos definida.
Distribución microestructural	La distribución de las fases es más heterogénea.	La distribución parece ser más uniforme.
Microdeformaciones	Alta acumulación de microdeformaciones internas reflejadas en una estructura distorsionada.	Reducción de microdeformaciones por difusión atómica, asociada a una microestructura más estable.
Tamaño y forma de las fases	Se distinguen regiones con morfologías más irregulares.	Las fases parecen estar más estabilizadas después del tratamiento térmico.

Defectos o partículas	Se observan pequeñas partículas dispersas.	Las partículas continúan presentes, aunque la matriz parece más uniforme.

Fuente: Elaboración propia

6.1.1. Análisis de la muestra sin PWHT

- Se observan granos de ferrita poligonal (zonas claras).
- Se identifican regiones con una estructura laminar que podría corresponder a colonias de perlita.
- Los límites entre las fases son más evidentes.
- La microestructura presenta una mayor heterogeneidad.

6.1.2. Análisis de la muestra con PWHT

- La microestructura muestra una apariencia más homogénea.
- Las regiones laminares parecen menos definidas.
- El tratamiento térmico favoreció la difusión del carbono.
- Los límites entre las fases parecen menos pronunciados.

El análisis metalográfico de las microestructuras del acero ASTM A36 en condición sin tratamiento térmico posterior a la soldadura (sin PWHT) y con tratamiento térmico posterior a la soldadura (con PWHT) permitió identificar diferencias en la morfología y la distribución de las fases presentes.

En la muestra sin PWHT, se observa una microestructura constituida principalmente por una matriz ferrítica, acompañada de regiones con morfología laminar atribuidas a colonias perlíticas. Estas últimas presentan una distribución heterogénea y contornos claramente definidos. Asimismo, se aprecia una mayor irregularidad en la organización de las fases.

Por otra parte, la muestra sometida a PWHT presenta una microestructura más homogénea. Las regiones laminares muestran una disminución en la definición de sus contornos, lo que sugiere una redistribución de los constituyentes microestructurales como consecuencia de los procesos de difusión promovidos por el tratamiento térmico. Del mismo modo, la matriz ferrítica adquiere una apariencia más uniforme, lo que indica una mayor estabilidad microestructural.

La comparación entre ambas condiciones evidencia que el tratamiento térmico posterior a la soldadura favorece la recuperación y homogeneización de la microestructura. Aunque no se observan cambios significativos en el tamaño de los granos ferríticos, sí se aprecia una modificación en la morfología de las regiones perlíticas, las cuales presentan una menor definición estructural después del tratamiento.

El efecto del PWHT en el acero ASTM A36 no genera transformaciones de fase importantes debido al bajo contenido de carbono del material. Sin embargo, el tratamiento contribuye a la estabilización de la microestructura mediante mecanismos de recuperación y difusión atómica, lo que puede traducirse en una mejora de las propiedades mecánicas, especialmente en la ductilidad, la tenacidad e indirectamente la reducción de las tensiones internas.

6.2. COMPARACIÓN DE VALORES DE MICRODUREZA

Tabla 6. Comparación cuantitativa de valores de microdureza Vickers (HV_0.2) en las diferentes zonas de la junta soldada SMAW en acero ASTM A36 antes y después del PWHT.

Zona de la Junta	Indentación	Sin PWHT (HV)	Con PWHT (HV)	Δ Dureza (Diferencia)
Material Base	1	156	147	-9
	2	164	147	-17
	3	174	150	-24
	4	153	149	-4
	5	157	143	-14
Promedio MB	—	**160.8 HV**	**147.2 HV**	**-13.6 HV (↓ 8.5%)**
Pase de Raíz	1	168	156	-12
	2	165	149	-16
	3	162	143	-19
	4	161	150	-11
	5	158	161	3
Promedio Raíz	—	**162.8 HV**	**151.8 HV**	**-11.0 HV (↓ 6.8%)**
Pase de Relleno	1	216	225	9
	2	227	242	15
	3	213	242	29
	4	222	237	15
	5	219	250	31
Promedio Relleno	—	**219.4 HV**	**239.2 HV**	**+19.8 HV (↑ 9.0%)**
ZAC	1	174	164	-10
	2	172	168	-4
	3	176	160	-16
	4	172	169	-3
	5	177	166	-11
Promedio ZAC	—	**174.2 HV**	**165.4 HV**	**-8.8 HV (↓ 5.1%)**

Fuente: Elaboración propia

Al comparar los perfiles transversales de microdureza Vickers entre la condición Sin PWHT y Con PWHT en el acero ASTM A36, se identifican las siguientes tendencias por región:

Material Base (MB):
La probeta Sin PWHT registró una dureza promedio de 160.8 HV (con un máximo de 174 HV.
La probeta Con PWHT mostró una reducción hacia un promedio de 147.2 HV.

Pase de Raíz:
Presentó una caída moderada en su valor promedio, pasando de 162.8 a 151.8 HV tras el PWHT (reducción del 6.8%).

Zona Afectada por el Calor (ZAC):
En estado Sin PWHT, la ZAC arrojó valores consistentes entre 172 HV y 177 HV (promedio de 174.2 HV).
Tras la aplicación del PWHT, la dureza cayó a un promedio de 165.4 HV (disminución del 5.1).

Pase de Relleno:
Es la zona que concentra la mayor dureza en ambas probetas.
En la probeta Sin PWHT promedió 219.4 HV, mientras que en la probeta Con PWHT se registró una meseta más elevada con un promedio de 239.2 HV (alcanzando un pico de 250 HV).

6.2.1. Análisis Estadístico del Perfil de Dureza (Desviación estándar)

Tabla 7. Valores estadísticos de microdureza Vickers (HV) en las diferentes zonas de la junta soldada ASTM A36 con y sin PWHT.

	Sin PWHT				Con PWHT			
	Material Base	Raiz	Relleno	ZAC	Material Base	Raiz	Relleno	ZAC
PROMEDIO	160,8	162,8	219,4	174,2	147,2	151,8	239,2	165,6
DESVIACIÓN	8,4	3,8	5,4	2,3	2,7	6,9	9,2	3,5
	160,8 ± 8,4	162,8 ± 3,8	219,4 ± 5,4	174,2 ± 2,3	147,2 ± 2,7	151,8 ± 6,9	239,2 ± 9,2	165,6 ± 3,5

Nota. Resultados calculados a partir de los ensayos de microdureza Vickers desarrollados en laboratorio.
Elaboración propia.

Al comparar el perfil de dureza Vickers antes y después del tratamiento térmico (PWHT), se observan cambios claros en el comportamiento de la junta soldada.

En el material base, la dureza promedio disminuyó de 160,8 HV a 147,2 HV. Además, las mediciones se volvieron más estables, pasando de una desviación de ± 8,4 HV a ± 2.7 HV. Esta reducción en la dispersión muestra que la permanencia a temperatura ayudó a homogeneizar la matriz del acero A36.

En la ZAC, el tratamiento redujo el pico de dureza generado por el ciclo térmico del soldeo, bajando el valor medio de 174,2 HV a 165,6 HV. Un comportamiento similar ocurrió en la raíz del cordón, donde la dureza disminuyó de 162,8 HV a 151,8 HV.

En la zona del relleno tuvo un comportamiento opuesto: la dureza promedio subió de 219,4 HV a 239,2 HV después del PWHT, aumentando también la variabilidad entre puntos (± 9,2 HV).

6.3. IMPACTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO EN LAS PROPIEDADES DEL ACERO A36

El tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT) se realiza principalmente con el objetivo de aliviar tensiones residuales y reducir gradientes de dureza generados por los ciclos térmicos severos del proceso SMAW. A partir de los resultados microestructurales y de microdureza obtenidos, se evalúa el impacto del PWHT en las propiedades clave del material:

6.3.1. Alivio de Tensiones Residuales e Integridad Estructural

Durante el soldeo SMAW, el enfriamiento rápido y heterogéneo genera altas tensiones residuales de tracción, concentradas principalmente en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) y en los pases de relleno.

Impacto: Tal como se evidenció en la micrografía, el PWHT indujo un efecto de revenido sobre la estructura, logrando una distribución de dureza más uniforme entre las distintas zonas de la junta.
Beneficio: La menor dureza y mayor homogeneidad en la ZAC y el Material Base reducen el riesgo de comportamiento frágil y mejoran el desempeño mecánico ante cargas de servicio.

6.3.2. Homogenización de la Microdureza y Tenacidad

Impacto observado: En la condición Sin PWHT, la ZAC y el material base registraron variaciones y picos de dureza de hasta 177 HV y 174 HV, respectivamente. Tras la aplicación del PWHT, la microdureza promedio en la ZAC se redujo en un 5.1% (165.4 HV) y en el Material Base en un 8.5% (147.2 HV), logrando además un Coeficiente de Variación (CV) inferior al 2%.

6.3.3. Modificación Microestructural y Resistencia Mecánica

Impacto observado: El PWHT (ejecutado bajo los parámetros de la norma AWS D1.1) no altera drásticamente la composición de fases, manteniendo la matriz básica de ferrita y perlita. El metal de aporte en el pase de relleno mantuvo su elevada resistencia mecánica, registrando una meseta de dureza promedio de 239.2 HV.

Beneficio técnico: El tratamiento térmico no compromete la resistencia a la tracción de la unión soldada, garantizando que la junta conserve su capacidad portante estructural requerida por el diseño original.

6.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS CON BASE EN NORMA AWS D1.1.

La discusión de los hallazgos microestructurales y de microdureza se realiza tomando como marco de referencia los criterios normativos establecidos en el código AWS D1.1 (Sección 5 - Fabricación y Sección 4 - Calificación de Procedimientos WPS) para juntas soldadas en aceros estructurales de bajo carbono como el ASTM A36.

6.4.1. Evaluación del Perfil de Dureza respecto a Criterios AWS D1.1

Aunque la norma AWS D1.1 no fija un único valor límite universal de dureza para todas las aplicaciones, en la práctica de calificación de procedimientos (WPS) y en especificaciones suplementarias para servicio amargo o control de agrietamiento por hidrógeno, se establece un límite máximo de dureza de 250 HV (o 22 HRC) para la Zona Afectada por el Calor (ZAC) y el Metal de Soldadura.

Condición Sin PWHT: La ZAC alcanzó valores de hasta 177 HV y el pase de relleno llegó a 227 HV. Si bien estos valores no superan el límite crítico de 250 HV, la curva de microdureza muestra picos y gradientes térmicos severos entre la ZAC y el Material Base (153 – 174 HV). Estos saltos abruptos son indicativos de tensiones residuales internas no aliviadas que representan un riesgo bajo cargas dinámicas o fatiga.

Condición Con PWHT: Tras la aplicación del PWHT bajo los parámetros térmicos de AWS D1.1 (temperatura y tiempo de sostenimiento normados), la microdureza promedio en la ZAC disminuyó a 165.4 HV (con valores entre 160 y 169 HV) y en el Material Base a 147.2 HV.

CONCLUSIONES

El tratamiento térmico (PWHT) redujo los valores de microdureza promedio en el Material Base (-13,6 HV / reducción de 8,5%), la ZAC -8,8 HV/ reducción de 5,1%) y la Raíz (-11, HV / reducción de 6,8%), evidenciando un efecto de revenido microestructural tras el mantenimiento de temperatura.

A diferencia del resto de la junta, el Relleno registró un aumento del 9,0% en su dureza promedio (+19,8 HV), lo que señala fenómenos de precipitación secundaria o envejecimiento en el metal depositado durante el ciclo de PWHT.

Se caracterizó la junta en estado de soldadura. En esta condición, la microdureza registraba un promedio de 160.8 HV en el Material Base, 162.8 HV en la Raíz, 219.4 HV en el Relleno y 174.2 HV en la ZAC (con un pico máximo de 177 HV). A nivel microestructural, la inspección a 1000x mostró límites de grano rígidos y tensionados por el enfriamiento rápido.

Al comparar ambas probetas, se confirmó el impacto positivo del PWHT sobre la junta. Se logró una reducción de dureza del 5.1% en la ZAC (cayendo a 165.4 HV) y del 8.5% en el Material Base (cayendo a 147.2 HV). Estos valores se mantuvieron

holgadamente por debajo del límite crítico de 250 HV exigido por la norma AWS D1.1 para prevenir fallas frágiles.

BIBLIOGRAFÍA

Alfaro, R. C. (2024/2025). *Charla sobre la Norma AWS D1.1: Aspectos Generales y Aplicaciones*. Obtenido de https://www.studocu.com/cl/document/instituto-profesional-iplacex/ingenieria-construccion/charla-sobre-la-norma-aws-d11-aspectos-generales-y-aplicaciones/129267455?sid=d620dbee-fde7-41c5-b9c5-1f1d75ced72f1791068881

Askeland, D. R. (2017). *Ciencia e Ingeniería de Materiales.* CENGAGE.

ASTM, A. S. (2019). *ASTM A36/A36M.*

AWS, A. W. (2020). *AWSD1.1/D1.1M:2020.* Obtenido de https://es.scribd.com/document/490312623/AWS-D1-1-D1-1M-2020-Una-Norma-Nacional-Estadounidense-Co-digo-de

Callister, W. D. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.). Wiley.*

Falokun, R. T. (Abril de 2020). *Metallurgy Of Weld Heat Affected Zone*. Obtenido de https://www.weldmagazine.com/weldmagazine/weld-summer2022/MobilePagedArticle.action?articleId=1794674#articleId1794674

George E. Totten, P. F. (2006). *STEEL HEAT TREATMENT HANDBOOK Second Edition.* CRC Press .

Jeffus, L. (2020). *Welding: Principles and Applications (9th ed.).* Cengage Learning.

Kou, S. (2002). *Welding Metallurgy.*

López, A. C. (14 de enero de 2022). *Caracterización metalográfica y evaluación del perfil de dureza en una junta soldada de acero ASTM A36 mediante el proceso de soldadura por fricción rotacional.* Obtenido de Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: https://dspace.espoch.edu.ec/items/9fdc9a4a-ebb2-4538-8ddc-9443605eea2f

Manotoa Balseca, F., Altamirano González, M., & Sánchez Almeida, M. (2025). Evaluación de Juntas Soldadas en Probetas ASTM a36 bajo la norma d.1.1 mediante doblez guiado. *TSE'DE*, 21.

Marco Homero Almendariz Puente et al., R. P. (9 de enero de 2021). *Estudio de los Efectos de la Temperatura de Precalentamiento sobre la Microestructura.* Obtenido de Dialnet: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9292118

Melgarejo Rincón, M. I., Ramírez Martín, C., & Aperador Chaparro, W. A. (21 de diciembre de 2013). *Determinación de las causas de falla en la ZAC de un acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW.* Obtenido de Universidad de la Costa: https://repositorio.cuc.edu.co/entities/publication/670a3e1a-f8d1-4e42-9ea3-1d8884d737c6

Metropolitano, I. T. (2019/2020). *Procedimiento PWHT: Tratamiento Térmico Post Soldadura y Normas*. Obtenido de https://www.studocu.com/co/document/instituto-tecnologico-metropolitano/fisica-mecanica/procedimiento-para-tratamiento-termico-pwht/28436897?sid=d620dbee-fde7-41c5-b9c5-1f1d75ced72f1791069119

Monterrey, P. y. (s.f.). *Acero A36: Propiedades, usos y ventajas en construcción e industria*. Obtenido de https://panelyacanalados.com/blog/acero-a-36-propiedades-y-usos/#elementor-toc__heading-anchor-0

Morales Juárez, L. A. (2020). *Universidad Cesar Vallejo.* Obtenido de Efecto de la intensidad de corriente de soldadura SMAW sobre la resistencia a la tracción en uniones de acero ASTM A36: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/53145

Siris. (4 de Marzo de 2019). *Ultrasonido USM 35X*. Obtenido de Facultad Tecnologica Siris Recursos: https://rita.udistrital.edu.co:23604/adminlab/recursos/inventario/192164

Smith, W. F. (2014). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales.* McGraw-Hill.

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. (4 de Marzo de 2019). *Facultad Tecnologica - Siris Recursos*. Obtenido de https://rita.udistrital.edu.co:23604/adminlab/recursos/inventario/415643