Evaluación de la formación de corrosión en una junta de soldadura a tope con proceso SMAW en ambiente de cloruros

Autores

Nestor Felipe Escobar Arias

Luis Ernesto Sanchez Sandoval

Docente director

Ing. Alexander Alvarado Moreno

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Ingeniería Mecánica

Bogotá, Colombia

Julio 3 del Año 2026



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

CONTENIDO

1. RESUMEN 9

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 10

3. OBJETIVOS 11

3.1. OBJETIVO GENERAL 11

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11

4. JUSTIFICACIÓN 12

5. ESTADO DEL ARTE 13

5.1 Análisis metalográfico de microdureza en una unión soldada de acero inoxidable martensítico AISI 420 y acero AISI/SAE 4340 con diferentes postratamientos térmicos. (Lozano Marín y Pérez Bernal, 2024). 13

5.2 Evaluación de la aptitud para el servicio de una tubería con corrosión por picadura mediante la aplicación de la norma API 579-1/ASME FFS-1 (Fitness For Service), Apartado 6. (Alfonso Ciendúa y Bernal Aponte, 2026). 13

5.3 Evaluación de la aptitud para el servicio de una tubería con defecto tipo abolladura mediante la aplicación de la norma API 579-1/ASME FFS-1, Apartado 12. (Báquero Hernández y Páez López, 2024)..... 14

5.4 Evaluación de la tasa de corrosión en tuberías de intercambiadores de calor ASTM A 106 Grado B con protección catódica operados con agua de mar. (Ochoa Varela y Cuesta Hinestroza, 2025)..... 14

5.5 Evaluación de la tasa de corrosión de tuberías API 5L Grado 52 con protección catódica de corriente impresa. (García, 2024)..... 15

6. METODOLOGÍA 16

6.1 ELABORACION DE PROBETAS SOLDADAS 16

6.2 ELABORACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) 16

6.3 ENSAYOS DE CORROSIÓN EN AMBIENTE SALINO 17

6.4 PREPARACIÓN METALOGRÁFICA Y CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL..... 17

6.5 EVALUACIÓN MECÁNICA Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS 17

6.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS..... 18

7. MARCO TEÓRICO 19

7.1. SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO SMAW..... 19

7.2. TIPO DE UNIONES 23

7.3. ESPECIFICACIONES Y REGISTROS DE CALIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA, WPS (BADILLO PUCHA, 2024) 26
7.4 NORMA ASME B31.3 27
7.5. ZONA HAZ 27
7.6. DEFECTOS DE LA SOLDADURA 32
7.6.1 Defectos de la soldadura en tuberías soldadas **33**
7.7. MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES 36
7.8. DIAGRAMAS DE FASES HIERRO-CARBONO 37
7.9. TAMAÑO DE GRANO SEGÚN NORMA ASTM E112 38
7.10. ATAQUE METALOGRÁFICO 40
7.11. CONCENTRACIÓN DE CLORUROS 41
8. DESARROLLO 42
8.1. SELECCIÓN MATERIAL 42
8.2. MUESTREO 43
8.2.1. Preparación del cordón de soldadura 44
8.3. ENSAYO NO DESTRUCTIVO INSPECCIÓN VISUAL 49
8.3.1. Inspección de refuerzo excesivo 49
8.3.2. Inspección socavado 50
8.3.3. Inspección poros 51
8.3.4. Inspección desalineación material 52
8.4. ENSAYO NO DESTRUCTIVO TINTAS PENETRANTES 53
8.4.1. Aplicación de aerosoles 54
8.5. ENSAYO NO DESTRUCTIVO ULTRASONIDO 55
8.6. PREPARACIÓN DE MUESTRAS 56
8.6.1. Preparación de entorno salino 57
8.6.2. Preparación metalográfica de las probetas 58
8.6.3. Encapsulado de muestras 58
8.6.4. Lijado de muestras 59
8.6.5. Pulido metalográfico de muestras con paño 59
8.6.6. Ataque químico 61
8.7. MACROSCOPIA 64
8.7.1 Macrografía probeta sin cloruro 65
8.7.2 Macrografía probeta con cloruro 68

8.8. MICROSCOPÍA..... 70
8.8.1. Micrografía probeta sin cloruros..... 72
8.8.2. Micrografía probeta con cloruros..... 78
8.9. MICRODUREZA 84
8.9.1. Microdureza probeta sin cloruro 85
8.9.2. Microdureza probeta con cloruro 86
9. 1|RESULTADOS CORROSIÓN PROBETA CON CLORUROS 88
10. ANALISIS DE RESULTADOS 91
10.1. MICROESTRUCTUCTURA PROBETA SIN CLORUROS 91
10.2. MICROESTRUCTUCTURA PROBETA CON CLORUROS 94
10.3. MICRODUREZA 97
10.4. CORROSIÓN SUPERFICIAL..... 99
11. CONCLUSIONES..... 105
12. BIBLIOGRAFÍA..... 109
13. ANEXOS..... 111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Codificación del material de aporte para soldadura según la AWS..... 21
Figura 2. Clasificación del alambre según la AWS para procesos GMAW Y FCAW. 22
Figura 3. Diseño de uniones comunes en soldadura. 23
Figura 4. Soldadura a tope típicas: (a) soldadura a tope cuadrada, un lado: (b) soldadura de bisel único; (c) soldadura a tope en V único; (d) soldadura a tope en U único; (e) soldadura a tope único; (f) soldadura a tope en V doble para secciones más gruesas. 24
Figura 5. Junta a tope con chapa dorsal. 24
Figura 6. Junta en T. 25
Figura 7. Posicionamiento de las piezas a soldar según el tipo de junta. 25
Figura 8. Selección transversal de una pieza soldada. 28
Figura 9. Ejemplo del cambio de tamaño de grano en la sección transversal..... 29
Figura 10. Ejemplo de la variación del color de un metal soldado en la zona HAZ. 29
Figura 11. Zonas en la junta soldada. 30
Figura 12. Material endurecido por precipitación, el cordón de soldadura es más y menos dúctil. 31

Figura 13. Formación de martensita en un acero al bajo carbono en estado de recocido luego de ser sometido a un proceso de soldadura. 32
Figura 14. Soldadura por fusión con material de aporte y sus posibles diferentes resultados: (a) cordón bien formado, presentando buen perfil y una penetración de raíz; (b) falta de fusión, llenado incompleto, penetración incompleta; (c) fusión pasante-traslape..... 33
Figura 15. Defectos en la soldadura de tuberías soldadas. 36
Figura 16. Distribución molecular del hierro. 37
Figura 17. Diagrama de fases de hierro-carbono. 37
Figura 18. Microestructuras cristalinas del hierro. 38
Figura 19. Número de tamaño de grano según ASTM E112. 39
Figura 20. Reflejo de la luz en la superficie de una probeta después de un ataque químico. 41
Figura 21. Tubo de acero ASTM A106 Grado B. 44
Figura 22. Medición y seccionamiento en tramos del tubo de acero ASTM A106 Grado B. 44
Figura 23. Plano para corte del biselado en V de la junta soldada. 46
Figura 24. Corte del material y preparación de bisel. 47
Figura 25. Rectificación del ángulo del bisel a 35º. 47
Figura 26. Aplicación del cordón de soldadura. 48
Figura 27. Detalles del cordón de soldadura. 48
Figura 28. Refuerzo excesivo. 49
Figura 29. Socavado. 51
Figura 30. Poros. 52
Figura 31. Desalineación material. 53
Figura 32. Aerosol limpiador de impurezas, aerosol penetrante y aerosol revelador. 54
Figura 33. Aplicación de aerosoles. 55
Figura 34. Equipo de ensayo no destructivo por ultrasonido. 56
Figura 35. Corte de muestras del cordón de soldadura. 56
Figura 36. Preparación entorno salino según norma ASTM G31. 57
Figura 37. Corte de muestras del cordón de soldadura. 57
Figura 38. Encapsulado de muestras del cordón de soldadura. 58
Figura 39. Lijado y preparación de las probetas. 59
Figura 40. Pulidora Forcipol 2V Grinder – Polisher. 60
Figura 41. Alúmina para preparación. 60
Figura 42. Proceso de pulido metalográfico de las probetas. 61
Figura 43. Elementos para la preparación del reactivo nital al 5%. 63
Figura 44. Estereoscopio Discovery V8 de la Facultad Tecnológica, Universidad Distrital. 64
Figura 45. Análisis macroestructural de la junta soldada. 65
Figura 46. Macrografía probeta sin cloruros con 10 aumentos. 66
Figura 47. Macrografía probeta sin cloruros con 16 aumentos. 66

Figura 48. Macrografía probeta sin cloruros con 25 aumentos. 67
Figura 49. Macrografía probeta sin cloruros con 40 aumentos. 67
Figura 50. Macrografía probeta con cloruros con 10 aumentos. 68
Figura 51. Macrografía probeta con cloruros con 16 aumentos. 69
Figura 52. Macrografía probeta con cloruros con 25 aumentos. 69
Figura 53. Macrografía probeta con cloruros con 40 aumentos. 70
Figura 54. Microscopio metalográfico Axi Observer D1m, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital. 71
Figura 55. Micrografía probeta sin cloruros 50 aumentos de la zona material base. 72
Figura 56. Micrografía probeta sin cloruros 100 aumentos de la zona material base. 72
Figura 57. Micrografía probeta sin cloruros 200 aumentos de la zona material base. 73
Figura 58. Micrografía probeta sin cloruros 500 aumentos de la zona material base. 73
Figura 59. Micrografía probeta sin cloruros 50 aumentos de la zona afectada. 74
Figura 60. Micrografía probeta sin cloruros 100 aumentos de la zona afectada. .. 74
Figura 61. Micrografía probeta sin cloruros 200 aumentos de la zona afectada. .. 75
Figura 62. Micrografía probeta sin cloruros 500 aumentos de la zona afectada. .. 75
Figura 63. Micrografía probeta sin cloruros 50 aumentos zona del cordón. 76
Figura 64. Micrografía probeta sin cloruros 100 aumentos zona del cordón. 76
Figura 65. Micrografía probeta sin cloruros 200 aumentos zona del cordón. 77
Figura 66. Micrografía probeta sin cloruros 500 aumentos zona del cordón. 77
Figura 67. Micrografía probeta con cloruros 50 aumentos zona material base. 78
Figura 68. Micrografía probeta con cloruros 100 aumentos zona material base. .. 78
Figura 69. Micrografía probeta con cloruros 200 aumentos zona material base. .. 79
Figura 70. Micrografía probeta con cloruros 100 aumentos zona material base. .. 79
Figura 71. Micrografía probeta con cloruros 50 aumentos de la zona afectada. ... 80
Figura 72. Micrografía probeta con cloruros 100 aumentos de la zona afectada. . 80
Figura 73. Micrografía probeta con cloruros 200 aumentos de la zona afectada. . 81
Figura 74. Micrografía probeta con cloruros 500 aumentos de la zona afectada. . 81
Figura 75. Micrografía probeta con cloruros 50 aumentos de la zona del cordón. 82
Figura 76. Micrografía probeta con cloruros 100 aumentos de la zona del cordón. 82
Figura 77. Micrografía probeta con cloruros 200 aumentos de la zona del cordón. 83
Figura 78. Micrografía probeta con cloruros 500 aumentos de la zona del cordón. 83
Figura 79. Microdurómetro metalográfico SHIMADZU modelo HMV-2, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital. 84
Figura 80. Microdureza 1 probeta sin cloruro de la zona afectada. 85
Figura 81. Microdureza 1 probeta sin cloruro de la zona del cordón. 86

Figura 82. Microdureza 1 probeta con cloruro de la zona material base. 86
Figura 83. Microdureza 1 probeta con cloruro de la zona afectada. 87
Figura 84. Microdureza 1 probeta con cloruro de la zona del cordón. 87
Figura 85. Resultados afectación de la corrosión en probeta con cloruros. 88
Figura 86. Micrografía probeta sin cloruros a 200X muestra de la zona material base. 91
Figura 87. Micrografía probeta sin cloruros a 1000X muestra de la zona afectada. 92
Figura 88. Micrografía probeta sin cloruros a 200X muestra zona del cordón. 93
Figura 89. Micrografía probeta con cloruros a 200X muestra zona material base. 94
Figura 90. Micrografía probeta con cloruros a 200X muestra de la zona afectada. 95
Figura 91. Micrografía probeta con cloruros a 200X muestra de la zona del cordón. 96
Figura 92. Apreciación 1 de puntos corrosión con programa Imagej 100 aumentos. 99
Figura 93. Resultados 1 de puntos corrosión con programa Imagej 100 aumentos. 99
Figura 94. Apreciación 2 de puntos corrosión con programa Imagej 500 aumentos. 100
Figura 95. Resultados 2 de puntos corrosión con programa Imagej 500 aumentos. 100
Figura 96. Comparación muestra sin cloruros con programa Imagej 100 aumentos. 101
Figura 97. Resultados comparación muestra sin cloruros con programa Imagej 100 aumentos..... 101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia a la tensión, según designación. 20
Tabla 2. Posiciones de soldadura. 20
Tabla 3. Tipos de recubrimiento. 20
Tabla 4. Defectos comunes en la soldadura de tuberías soldadas. 34
Tabla 5. Propiedades mecánicas del acero ASTM A106 Grado B. 43
Tabla 6. Composición química del ASTM A106 Grado B. 43
Tabla 7. Formato WPS para especificación del procedimiento de soldadura. 45
Tabla 8. Medición del refuerzo del cordón de soldadura. 50
Tabla 9. Medición de la socavación del cordón de soldadura. 51
Tabla 10. Medición de la desalineación. 53
Tabla 11. Composición química del ASTM A106 Grado B. 62
Tabla 12. Reactivos para ensayo microscópico. 63
Tabla 13. Comparación de resultados de las dos probetas. 102

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Comparación de durezas muestras sin cloruro y con cloruro. 97

1. RESUMEN

El presente proyecto tiene como propósito evaluar el comportamiento de juntas soldadas a tope en tubería de acero ASTM A106 Grado B, ejecutadas mediante el proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW). El estudio se enmarca dentro de los lineamientos establecidos en el código ASME B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2023), para tuberías de proceso, con el fin de garantizar la validez técnica de los procedimientos aplicados.

La metodología contempló la elaboración del procedimiento de soldadura (WPS) y la fabricación de probetas representativas. Posteriormente, las muestras fueron expuestas en ambiente con presencia de cloruros mediante ensayos de corrosión en soluciones de salmuera, con el objetivo de simular condiciones marinas que suelen generar un alto grado de agresividad en materiales metálicos.

De manera complementaria, se realizó la caracterización microestructural de la zona soldada, la zona afectada térmicamente (HAZ) y el material base, antes y después de la exposición a los ambientes corrosivos y en la evaluación microestructural fueron analizados para establecer la relación entre las condiciones de exposición y el desempeño de las juntas soldadas. Este trabajo busca generar información técnica que contribuya a la compresión del efecto de los cloruros sobre uniones soldadas en tuberías de acero ASTM A106 Grado B, aportando elementos de análisis para la mejora en la selección de procedimientos de soldadura y en la confiabilidad de sistemas expuestos a ambientes agresivos o condiciones marinas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La corrosión de materiales metálicos es uno de los principales problemas que afectan la integridad, seguridad y vida útil de componentes utilizados en diversos sectores industriales, especialmente en aquellos expuestos a ambientes marinos. En dichos entornos, la elevada concentración de cloruros y la presencia constante de humedad ayudan a la generación de procesos electroquímicos que aceleran el deterioro de los aceros al carbono, materiales ampliamente empleados en sistemas de tuberías y estructuras soldadas.

Las juntas soldadas por lo general representan zonas vulnerables frente a los procesos corrosivos, debido a las variaciones en la parte microestructural generadas durante la soldadura. En el proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding), la formación de la zona afectada por el calor (ZAC) y la presencia de metal de aporte con composiciones y propiedades diferentes al metal base, pueden ocasionar defectos que influyen en el comportamiento frente a la corrosión. Estos problemas microestructurales, sumados también a posibles defectos superficiales propios del proceso de soldadura, incrementan el riesgo de desgaste localizado en ambientes agresivos.

El acero ASTM A106 Grado B es ampliamente utilizado en la fabricación de tuberías destinadas al transporte de fluidos; sin embargo, las investigaciones realizadas son un poco limitadas en la caracterización experimental que evalúe de manera comparativa el efecto de la exposición a cloruros sobre las juntas soldadas realizadas con este material. Por lo general, son escasos los estudios que integren ensayos no destructivos, análisis metalográfico y pruebas de dureza para establecer una relación clara entre las condiciones de exposición, los cambios microestructurales y el comportamiento mecánico de las juntas soldadas.

La ausencia de información experimental, dificulta un poco la comprensión del impacto real que tienen los ambientes salinos sobre la integridad de las soldaduras, y esto conlleva a que se puedan sufrir fallas prematuras, incrementos en costos de mantenimiento y riesgos operativos. Por lo tanto, se hace necesario desarrollar un estudio experimental que permita evaluar el comportamiento de una junta soldada a tope mediante el proceso SMAW en acero ASTM A106 Grado B, comparando una probeta expuesta a un ambiente salino con presencia de cloruros frente a una probeta no expuesta, mediante la aplicación de ensayos no destructivos, análisis macro y microestructural, y pruebas de dureza, con el fin de aportar conocimiento técnico que contribuya a una mejor comprensión del fenómeno de corrosión en soldaduras y al fortalecimiento de prácticas de inspección y control de calidad en los sectores industriales y sectores metalmecánicos.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar una junta soldada a tope, realizada mediante el proceso SMAW en tubería de proceso, de acuerdo con los lineamientos del estándar ASME B31.3, con el fin de evaluar su comportamiento en ambientes con presencia de cloruros.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar las muestras o probetas soldadas a tope utilizando el proceso SMAW.
- Documentar el procedimiento de soldadura mediante la elaboración de un WPS, conforme a los lineamientos del estándar ASME B31.3
- Realizar ensayos de corrosión en soluciones de salmuera, con el fin de simular condiciones marinas sobre las juntas soldadas.
- Caracterizar la microestructura de la zona soldada, la zona afectada térmicamente (HAZ) y el material base, antes y después de la exposición a cloruros, mediante técnicas de microscopía óptica.
- Analizar los resultados obtenidos de los ensayos de corrosión y de la evaluación microestructural, con el propósito de establecer la relación entre las condiciones de exposiciones y el comportamiento de las juntas soldadas.

4. JUSTIFICACIÓN

La corrosión en uniones soldadas constituye un problema crítico en ambientes marinos, debido a que acelera el deterioro de estructuras metálicas y compromete la seguridad de componentes empleados en sectores como el naval, energético y de transporte marítimo. El proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW) es ampliamente utilizados en estas industrias por su versatilidad y bajo costo, pero las zonas soldadas presentan heterogeneidad microestructural y tensiones residuales que las hacen más susceptibles a la corrosión localizada.

Este proyecto se justifica en la necesidad de evaluar experimentalmente el comportamiento frente a la corrosión de junta a tope realizadas con SMAW bajo condiciones marinas simuladas, aspecto poco estudiado en el contexto académico nacional. Su aporte radica en generar conocimiento aplicado que permita correlacionar parámetros de soldadura con la formulación de corrosión, ofreciendo insumos útiles para optimizar procedimientos, seleccionar consumibles adecuados y diseñar estrategias de mitigación.

El valor agregado del trabajo reside en la integración de ensayos metalográficos y electroquímicos para caracterizar de manera detallada las zonas críticas de la soldadura, lo que representa un avance frente a evaluaciones generales de corrosión en materiales. Además, sus resultados serán relevantes tanto para la institución educativa, fortaleciendo la formación investigativa de estudiantes, como para la industria, al aportar información técnica que puede traducirse en reducción de costos de mantenimiento y aumento de la confiabilidad de las estructuras.

5. ESTADO DEL ARTE

Con el propósito de fortalecer las partes metodológicas y conceptuales en el desarrollo de la presente investigación, se han seleccionado diversos trabajos de referencia similares. Estos estudios abordan de manera sistemática los mecanismos de degradación y corrosión en tuberías de acero expuestas a ambientes altamente corrosivos, tales como medios salinos y soluciones con presencia de cloruros. También se evidencian los procesos metalográficos que se llevan a cabo para el posterior análisis microestructural de las muestras. La integración de dichas investigaciones bibliográficas permite establecer un marco comparativo sólido para analizar el comportamiento metalúrgico de este documento.

5.1 Análisis metalográfico de microdureza en una unión soldada de acero inoxidable martensítico AISI 420 y acero AISI/SAE 4340 con diferentes postratamientos térmicos. (Lozano Marín y Pérez Bernal, 2024).

Este proyecto de investigación realiza un estudio analítico y experimental enfocado en caracterizar las variaciones metalúrgicas y de resistencia mecánica en la interfaz de una unión soldada disímil entre un acero inoxidable martensítico AISI 420 y un acero de baja aleación de alta resistencia AISI/SAE 4340. La metodología aborda de manera sistemática la influencia de diferentes postratamientos térmicos (PWHT) sobre la homogeneización microestructural, orientándose a evaluar mitigar las tensiones residuales y las fases frágiles segregadas en la Zona Afectada por el Calor (ZAC). A través de ensayos estandarizados de microdureza Vickers y análisis metalográficos cuantitativos, la investigación aporta datos críticos sobre los perfiles de dureza y las transformaciones de fase ocurridas durante los ciclos térmicos de enfriamiento, estableciendo criterios técnicos y correlaciones fundamentales para optimizar la durabilidad, tenacidad y el desempeño estructural de estas juntas disímiles en aplicaciones de alta exigencia mecánica.

5.2 Evaluación de la aptitud para el servicio de una tubería con corrosión por picadura mediante la aplicación de la norma API 579-1/ASME FFS-1 (Fitness For Service), Apartado 6. (Alfonso Ciendúa y Bernal Aponte, 2026).

La investigación desarrolla una metodología analítica y procedimental orientada a evaluar la integridad estructural y la aptitud para el servicio (*Fitness For Service*) de sistemas de tuberías industriales que presentan degradación geométrica debido a fenómenos de corrosión por picadura (*pitting*). Tomando como base los lineamientos normativos del estándar internacional API 579-1/ASME FFS-1, específicamente el Apartado 6, el estudio sistematiza los criterios de inspección visual y cuantificación de daños para determinar las presiones remanentes de falla y la vida útil segura de los componentes afectados. A través de la aplicación de modelos de cálculo y análisis de tolerancias dimensionales en aceros ferríticos, el

proyecto aporta una herramienta técnica de alto valor predictivo para la toma de decisiones en ingeniería de mantenimiento, permitiendo discernir con rigor científico si una tubería corroída es apta para continuar en operación bajo condiciones seguras o si requiere intervención inmediata.

5.3 Evaluación de la aptitud para el servicio de una tubería con defecto tipo abolladura mediante la aplicación de la norma API 579-1/ASME FFS-1, Apartado 12. (Báquero Hernández y Páez López, 2024).

Esta investigación expone un análisis metodológico y estructural enfocado en la evaluación de la aptitud para el servicio (*Fitness For Service*) de sistemas de conducción de hidrocarburos que han sufrido daños mecánicos por terceros, específicamente deformaciones geométricas del tipo abolladura (*dent*). Tomando como base los criterios normativos e ingenieriles establecidos en el Apartado 12 de la norma internacional API 579-1/ASME FFS-1, el estudio describe los procedimientos para clasificar y evaluar cuantitativamente estas discontinuidades mecánicas. A través de formulaciones analíticas y tolerancias admisibles, el proyecto determina de manera predictiva la pérdida de resistencia local, las concentraciones de esfuerzos resultantes y la presión de falla remanente en tuberías de acero ferrítico. El principal aporte de este trabajo radica en consolidar un marco técnico confiable para la gestión de integridad de activos, proporcionando criterios científicos esenciales para definir si un componente deformado puede continuar operando de forma segura bajo limitaciones específicas o si requiere una reparación inmediata.

5.4 Evaluación de la tasa de corrosión en tuberías de intercambiadores de calor ASTM A 106 Grado B con protección catódica operados con agua de mar. (Ochoa Varela y Cuesta Hinestroza, 2025).

El siguiente trabajo aborda de manera experimental y analítica la mitigación del deterioro corrosivo en aceros al carbono de uso industrial, específicamente en tuberías ASTM A 106 Grado B expuestas a un medio altamente agresivo como el agua de mar. El núcleo del estudio se centra en cuantificar y evaluar la tasa de corrosión bajo la influencia de sistemas de protección catódica, validando la estabilidad termodinámica del material mediante el uso de diagramas de Pourbaix (potencial vs. pH). Los resultados de este trabajo demuestran de forma cualitativa y cuantitativa cómo la correcta calibración del voltaje en la protección catódica desplaza al metal desde zonas de actividad corrosiva hacia rangos de inmunidad o estabilidad, reduciendo significativamente la pérdida de espesor. Esta investigación provee un antecedente de alto valor técnico respecto a la cinética de corrosión por cloruros en componentes de intercambio térmico y robustece los criterios de diseño para la conservación de activos sometidos a condiciones operacionales salinas.

5.5 Evaluación de la tasa de corrosión de tuberías API 5L Grado 52 con protección catódica de corriente impresa. (García, 2024).

Este proyecto de investigación evalúa de manera experimental la tasa de corrosión del acero API 5L Grado 52, material ampliamente utilizado en la industria petrolera para el transporte de hidrocarburos, bajo la implementación de un sistema de protección catódica por corriente impresa (ICCP). El estudio simula las condiciones operativas reales de un entorno costero altamente agresivo mediante la inmersión total de probetas soldadas (proceso SMAW) en un medio electrolítico con cloruros (salmuera). A través de un monitoreo periódico de variables fisicoquímicas, análisis electroquímicos validados con diagramas de Pourbaix, y la cuantificación del desgaste mediante técnicas de pérdida de masa y ultrasonido (según las normativas ASTM G31 e ISO 16809), la investigación busca mitigar la incertidumbre técnica en el cálculo del deterioro del material. Los resultados obtenidos consolidan un marco de referencia técnico esencial para optimizar el diseño de sistemas de protección y calibrar los planes de mantenimiento predictivo en redes de transporte de crudo.

6. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrollará bajo un enfoque experimental de tipo aplicado, orientado a evaluar la formación de corrosión en juntas soldadas a tope realizadas mediante el proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding) y expuestas a un ambiente con presencia de cloruros. El desarrollo metodológico comprende la fabricación de probetas soldadas, la exposición controlada a soluciones salinas y la caracterización metalográfica y mecánica de las zonas críticas de la unión soldada. La metodología se dividirá en cinco etapas principales:

6.1 ELABORACION DE PROBETAS SOLDADAS

Inicialmente se realizará la selección y adquisición de los materiales base y consumibles requeridos para la fabricación de las juntas soldadas. Se empleará tubería ASTM A106 Grado B de 2” Schedule 40 y electrodos E6010 y E7018, utilizados comúnmente en aplicaciones industriales de tubería de proceso.

Posteriormente, los tubos serán cortados y preparados mecánicamente mediante biselado a 37,5°, conforme a los lineamientos establecidos para juntas a tope en tubería. Luego se ejecutará el procedimiento de soldadura SMAW siguiendo parámetros previamente definidos en el WPS, incluyendo tipo de electrodo, corriente, polaridad, número de pases y posición de soldadura.

6.2 ELABORACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Se desarrollará un Welding Procedure Specification (WPS) conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASME B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2023) y ASME Sección IX (American Society of Mechanical Engineers, 2023). En este documento se registrarán las variables esenciales del procedimiento de soldadura, tales como:

- Material base.
- Tipo de junta.
- Electrodo utilizado.
- Rango de corriente y voltaje.
- Posición de soldadura.
- Número de pases.
- Temperatura de precalentamiento (si aplica).

Posteriormente, se verificará experimentalmente el cumplimiento de los parámetros definidos durante la ejecución de las juntas soldadas.

6.3 ENSAYOS DE CORROSIÓN EN AMBIENTE SALINO

Las juntas soldadas serán seccionadas para obtener muestras destinadas a los ensayos de corrosión. Posteriormente, las probetas serán sometidas a inmersión en una solución salina preparada con cloruro de sodio (NaCl) y agua destilada, con el propósito de simular condiciones marinas controladas.

La exposición se realizará durante un tiempo determinado de **30 días**, evaluando visualmente la formación de productos de corrosión, pérdida de material y posibles zonas de ataque localizado. La preparación y manipulación de las muestras seguirá lineamientos basados en normas ASTM aplicables a ensayos de corrosión.

6.4 PREPARACIÓN METALOGRÁFICA Y CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

Una vez finalizada la exposición a cloruros, las muestras serán sometidas a preparación metalográfica mediante procesos de desbaste, lijado progresivo y pulido mecánico hasta obtener acabado espejo. Posteriormente, se realizará ataque químico con reactivo Nital para revelar la microestructura.

La caracterización se efectuará mediante microscopía óptica, permitiendo identificar las diferentes zonas de la soldadura:

- Metal base (MB).
- Zona afectada térmicamente (ZAT).
- Cordón de soldadura (CS).

Además, se realizarán macrografías y micrografías para analizar posibles cambios microestructurales asociados al proceso de corrosión.

6.5 EVALUACIÓN MECÁNICA Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Con el fin de complementar la caracterización de las juntas soldadas, se realizarán ensayos de dureza tipo Vickers sobre las diferentes regiones de la unión, permitiendo establecer variaciones de dureza entre el metal base, la ZAT y el cordón de soldadura.

Adicionalmente, se aplicará ensayo no destructivo mediante tintas penetrantes para detectar discontinuidades superficiales tales como grietas, poros o falta de fusión que puedan influir en el comportamiento frente a la corrosión.

6.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Finalmente, los resultados obtenidos durante los ensayos de corrosión, análisis microestructural, mediciones de dureza y evaluación no destructiva serán organizados y procesados mediante herramientas computacionales.

A partir de esta información se establecerán correlaciones entre la microestructura generada por el proceso SMAW y la susceptibilidad a la corrosión en ambientes con presencia de cloruros. Asimismo, se identificarán los factores que influyen en el deterioro de la junta soldada y se formularán conclusiones técnicas orientadas a mejorar el comportamiento de este tipo de uniones en aplicaciones industriales.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO SMAW

La soldadura eléctrica comprende un conjunto de técnicas especializadas que han evolucionado con el paso del tiempo, en respuesta a la necesidad de unir materiales metálicos de forma eficiente y segura. Aunque la unión de metales se practica desde hace siglos, el desarrollo moderno de la soldadura por arco se consolidó a principios del siglo XX, cuando Oscar Kjellberg patentó en 1904 el primer electrodo recubierto, marcando un hito en la historia de esta tecnología (Flores, 2010).

El método de soldadura con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés) no solo transformó los procesos de fabricación y reparación industrial de su época, sino que también hizo de la soldadura un procedimiento más económico, eficiente y versátil. Este tipo de soldadura utiliza un electrodo metálico recubierto con un material específico que varía según el tipo de pieza a unir. La corriente eléctrica – ya sea alterna o directa, dependiendo del tipo de electrodo, el material base y la posición de soldadura – calienta el electrodo hasta fundirlo, permitiendo que el metal depositado se solidifique sobre la unión. El cordón de soldadura resultante queda cubierto por una capa de escoria, que protege el metal fundido de la contaminación atmosférica durante su solidificación.

El equipo requerido para el proceso SMAW es relativamente simple: consta de una fuente de poder, cables de fuerza y de conexión a tierra, y un porta electrodo. Uno de los aspectos más importantes del proceso es la correcta selección del electrodo, que depende del tipo de material base, del tipo de recubrimiento, del diámetro del electrodo y de la aplicación específica.

Dado que existen múltiples tipos de electrodos en el mercado, la American Welding Society (AWS) ha establecido un sistema de clasificación estandarizado que permite identificar las características de cada electrodo. Esta codificación incluye información sobre:

- La letra E, que indica que se trata de un electrodo.
- Un número de dos o tres cifras que representa la resistencia a la tracción en ksi.
- Un dígito que especifica las posiciones de soldadura en las que puede utilizarse.
- Un número que indica el tipo de recubrimiento y el tipo de corriente adecuada (CA, CD o ambas).
- La letra H, seguida de un número, que señala el contenido difusible de hidrógeno.
- Una letra adicional que indica si cumple con los requerimientos de ensayo de absorción de humedad.

La AWS establece estos estándares con el fin de garantizar la calidad, trazabilidad y seguridad del proceso de soldadura en diversas aplicaciones industriales (Flores, 2010).

La AWS normaliza los siguientes datos:

Tabla 1. Resistencia a la tensión, según designación.

Clasificación AWS	Valores Mínimos	
	Resistencia a la tensión ($lb/pulg^2$)	Límite de cedencia ($lb/pulg^2$)
E60XX	62,000	50,000
E70XX	70,000	57,000
E80XX	80,000	67,000
E90XX	90,000	77,000
E100XX	100,000	87,000
E100XX	100,000	87,000
E110XX[a]	110,000	95,000
E120XX[a]	120,000	107,000
a. En este tipo de electrodos se utiliza recubrimiento tipo bajo hidrógeno únicamente		

Fuente: "ITW WELDING PRODUCT GRUP. (Flores, 2010)".

Tabla 2. Posiciones de soldadura.

Clasificación	Posiciones
EXX1X	Plano, horizontal, vertical, sobrecabeza
EXX2X	Plano, horizontal (filete)
EXX4X	Plano, horizontal, vertical descendente, sobrecabeza

Fuente: "ITW WELDING PRODUCT GRUP. (Flores, 2010)".

Tabla 3. Tipos de recubrimiento.

	Recubrimiento	Tipo de Corriente	Penetración
EXXX0	Celulósico, sodio	DCEP	Profunda
EXX20	Oxido de hierro, sodio	DCEN, DCEP, AC	Media
EXXX1	Celulósico, potasio	AC, DCEP	Profunda
EXXX2	Rutílico, Sodio	AC, DCEN	Media
EXXX3	Rutílico, Potasio	AC, DCEP, DCEN	Ligera
EXXX4	Rutílico, Polvo de hierro	AC, DCEP, DCEN	Ligera
EXXX5	Bajo hidrógeno, Sodio	DCEP	Media
EXXX6	Bajo hidrógeno, Potasio	AC, DCEP	Media
EXXX7	Oxido de hierro, Polvo de hierro	AC, DCEP, DCEN	Media
EXXX8	Bajo hidrógeno, Polvo de hierro	AC, DCEP	Media
EXXX9	Oxido de hierro, Rutílico, Potasio	AC, DCEP, DCEN	Media

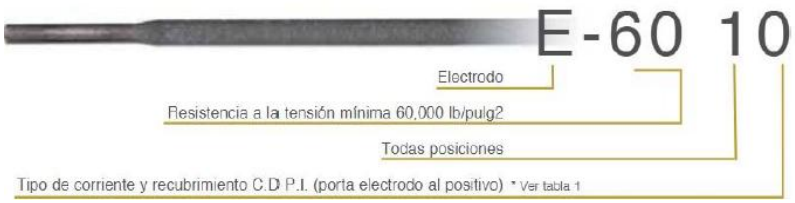
Fuente: "ITW WELDING PRODUCT GRUP. (Flores, 2010)".

El artículo también aborda el proceso de soldadura MIG (Metal Inert Gas), conocido internacionalmente como GMAW (Gas Metal Arc Welding). Este método utiliza un alambre continuo como electrodo y un gas de protección que impide la contaminación del arco eléctrico por la atmósfera circundante. A diferencia del proceso SMAW, en el cual se emplea un electrodo revestido que se consume y se reemplaza manualmente, el proceso MIG-GMAW se caracteriza por ser semiautomático o automático, gracias al uso de un alimentador de alambre continuo.

Aunque ambos procesos comparten principios similares como la generación de un arco eléctrico entre el electrodo y el material base el proceso MIG ofrece ventajas significativas en términos de velocidad, limpieza y continuidad, ya que no requieren la remoción de escoria. No obstante, la calidad del cordón y la eficiencia del proceso están directamente relacionadas con la destreza del operario, el ajuste preciso de parámetros y las condiciones del entorno. En aplicaciones donde el control de la atmósfera es deficiente (por ejemplo, en exteriores con corrientes de aire), la protección gaseosa puede volverse ineficaz y afectar la calidad de la soldadura.

El alambre sólido utilizado en este proceso está formulado según el tipo de material base a unir, y su composición química incide directamente en la resistencia mecánica, tenacidad y calidad metalúrgica del cordón de soldadura. Al igual que los electrodos revestidos, los alambres utilizados en soldadura MIG están estandarizados por la American Welding Society (AWS) mediante un sistema de codificación que permite identificar fácilmente sus propiedades de la siguiente manera:

Figura 1. Codificación del material de aporte para soldadura según la AWS.



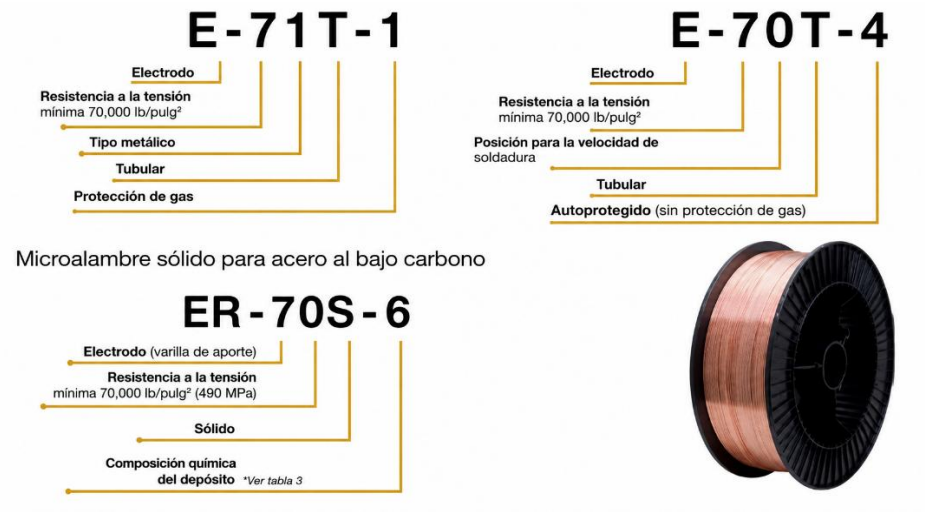
A. Para aceros al carbono.



B. Para aceros de baja aleación.

Fuente: "AWS (Flores, 2010)".

Figura 2. Clasificación del alambre según la AWS para procesos GMAW Y FCAW.



Fuente:" AWS (Flores, 2010)".

Para garantizar una protección eficaz durante el proceso de soldadura MIG, es fundamental que el gas de protección se suministre de forma constante y controlada. El gas más comúnmente utilizado es el argón, debido a sus propiedades inertes: no es corrosivo, no reacciona químicamente con los materiales base, y carece de color, olor o sabor. Estas características lo hacen ideal para proteger el baño de fusión frente a la contaminación atmosférica, evitando así defectos como la porosidad o la oxidación del cordón de soldadura.

Además de los aspectos técnicos del proceso, es esencial tener en cuenta las medidas de seguridad necesarias para proteger la salud del operario. La exposición a los rayos ultravioleta (UV) generados por el arco eléctrico puede provocar daños oculares graves, como la queratitis fotoeléctrica (conocida comúnmente como "flash ocular"), e incluso pérdida de visión. Asimismo, el calor intenso y las salpicaduras de metal fundido pueden causar quemaduras severas en la piel si no se cuenta con la protección adecuada.

Para mitigar estos riesgos, el personal que se realiza labores de soldadura debe emplear el siguiente equipo de protección personal (EPP):

- Careta de soldador con filtro para radiación UV e infrarroja.
- Lentes de seguridad o lentes de escoria.
- Ropa de protección elaborada en carnaza o materiales ignífugos, que cubra brazos, piernas y torso.
- Guantes resistentes al calor.
- Calzado de seguridad dieléctrico y con puntera metálica, preferiblemente de cuero grueso.

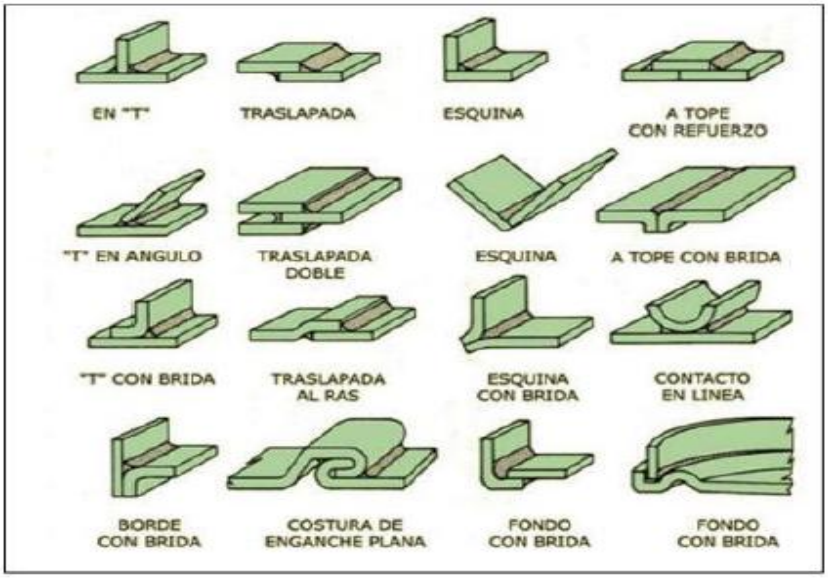
- Y realizar el trabajo en un área destinada exclusivamente para soldadura, bien ventilada y libre de materiales inflamables.

Estas medidas no solo son fundamentales para preservar la integridad física del soldador, sino también para garantizar un entorno de trabajo seguro y profesional (Flores, 2010).

7.2. TIPO DE UNIONES

Cuando se realiza un proceso de soldadura es importante conocer el tipo de unión o junta que se va a ejecutar, según la necesidad y la disposición de las piezas a unir, esto puede variar según el tipo de soldadura que se haga y las posiciones de la soldadura, el tipo de juntas soldadas más comunes se pueden observar en la figura:

Figura 3. Diseño de uniones comunes en soldadura.

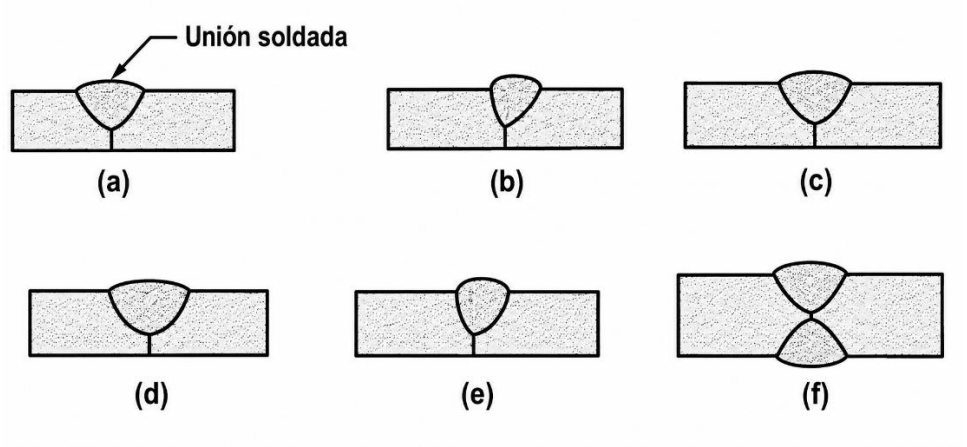


Fuente: "web tecnología-técnica (Muxi, 2020)".

Dentro de las uniones básicas que hay se agrupan en 5 tipos de juntas:

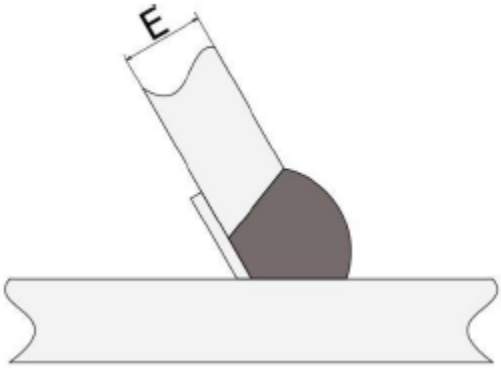
- Junta a tope: se denomina así a la unión que se realiza cuando las piezas se encuentran alineadas en un mismo plano (**ver figura 3**). En este tipo de junta, la soldadura debe ser continua a lo largo de toda la unión y presentar una penetración completa. Cuando se requiere una unión estructural o de alta resistencia, el cordón debe aplicarse por ambas caras de las piezas. Si no es posible soldar por ambas caras, se debe incorporar una chapa dorsal en la junta para garantizar la resistencia requerida (**ver figura 4**).

Figura 4. Soldadura a tope típicas: (a) soldadura a tope cuadrada, un lado: (b) soldadura de bisel único; (c) soldadura a tope en V único; (d) soldadura a tope en U único; (e) soldadura a tope único; (f) soldadura a tope en V doble para secciones más gruesas.



Fuente: "Temas para la educación" (Federación de enseñanza de CC. OO de Andalucía, 2010)".

Figura 5. Junta a tope con chapa dorsal.



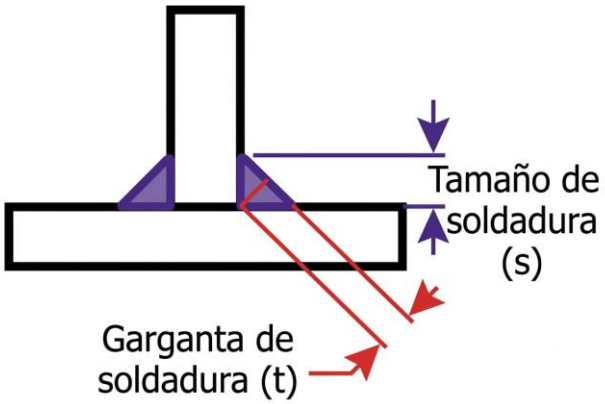
Fuente: "Propia".

El tipo de junta a tope puede ser de tipos:

- Junta a tope sin bisel posición plana horizontal: se aplica el cordón desde la parte superior, usada comúnmente en cubiertas de barcos, tanques metálicos y carrocerías.
- Junta a tope con chaflán o bisel simple: este tipo de unión requiere de un achaflanado o biselado previamente a unir las piezas, para buscar una mayor penetración de la soldadura logrando una resistencia mayor, es común en la fabricación de tanques, trenes, refinerías entre otros (Muxi, 2020).
- Junta de esquina: como su nombre lo indica se le denomina así a la soldadura aplicada en dos piezas que entre sí forman un ángulo de 90º.

- Junta en T: indica que los materiales a soldar están perpendicularmente posicionados y forman un tipo de T. En este tipo de unión se puede aplicar el cordón en un solo lado de la unión (**ver figura 6**).

Figura 6. Junta en T.

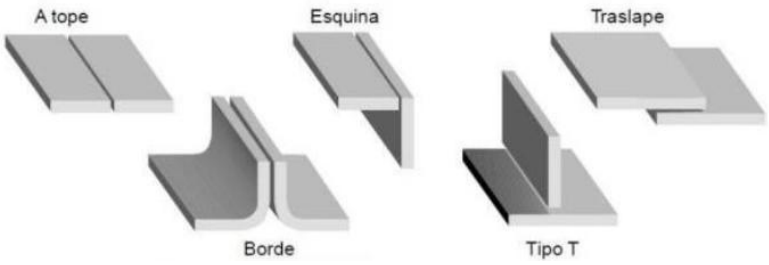


Fuentes: "Uniones soldadas y su simbología según AWS (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018)".

- Junta en traslape o solape: soldadura entre dos piezas que se encuentran una encima de otra o superpuestas, se suelen usar cuando se realiza una soldadura por resistencia eléctrica por puntos y una soldadura MIG/MAG.
- Junta de borde: es la unión de dos piezas cuyos bordes se encuentran paralelos, suelen ser láminas metálicas o placas de espesor fino (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018).

A continuación, se muestra la figura. Donde se puede observar el posicionamiento de las piezas a soldar mencionadas anteriormente:

Figura 7. Posicionamiento de las piezas a soldar según el tipo de junta.



Fuente: "Uniones soldadas y su simbología según AWS (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018)".

7.3. ESPECIFICACIONES Y REGISTROS DE CALIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA, WPS (BADILLO PUCHA, 2024).

Todo proceso de soldadura requiere cumplir con especificaciones técnicas de diseño, las cuales se establecen en el WPS (Especificación de procedimiento de soldadura). En este documento se consideran todas las variables que pueden influir en las propiedades mecánicas y físicas del material, incluyendo su microestructura y composición cristalina.

El registro de calificación de procedimiento (RCP), o Procedure Qualification Record (PQR) en inglés, es un documento que recoge los resultados de los ensayos realizados para verificar que un procedimiento de soldadura cumple con las especificaciones requeridas. El RCP se genera a partir del WPS y en él se registran los datos de los diferentes ensayos mecánicos. Con base en estos resultados, se ajustan y definen los parámetros finales de soldadura que se establecen en el WPS.

El registro de calificación del soldador (WPQR), o Welder Performance Qualification Record en inglés, certifica la habilidad de un soldador para aplicar cordones de soldadura de calidad, de acuerdo con un diseño específico. Este documento integra y verifica tres elementos clave: la competencia del soldador, la correcta aplicación de los parámetros estipulados en la WPS y los resultados satisfactorios de los ensayos registrados en el PQR. En conjunto, estos factores garantizan la calidad e integridad del cordón de soldadura.

Para un control de calidad bajo el código ASME, uno de los más aplicados a nivel industrial, se requieren diversos formatos y especificaciones. Entre ellos, destaca la especificación de procedimiento de soldadura (WPS), la cual se rige por normas como el código ASME sección IX (American Society of Mechanical Engineers, 2023) o el AWS D1.1 (American Welding Society, 2020), para estructuras de acero.

El WPS es un documento fundamental que establece todos los parámetros a controlar durante la soldadura para garantizar la consistencia del proceso y minimizar la variabilidad. Entre los requerimientos clave que debe especificar un WPS se incluyen:

- Materiales: material base y metal de aporte.
- Preparación: diseño de la junta limpieza superficial.
- Proceso y parámetros: proceso de soldadura (SMAW, GMAW, etc.), posición, tamaño del electrodo, tipo de caudal del gas de protección, amperaje, voltaje y polaridad.
- Tratamientos posteriores: la necesidad y detalles de cualquier tratamiento térmico.

Esta exhaustividad es crucial para asegurar que el proceso de soldadura sea repetible y de calidad (Badillo Pucha, 2014).

7.4 NORMA ASME B31.3

La norma ASME B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2023), es un código internacional desarrollado por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos que establece los requisitos técnicos para el diseño, fabricación, montaje, inspección y prueba de sistemas de tuberías utilizados en procesos industriales. Esta norma es ampliamente aplicada en industrias como la petroquímica, petrolera, alimentaria, farmacéutica y de generación de energía, donde las tuberías transportan fluidos sometidos a presión y temperatura

El objetivo principal de la ASME B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2023), es garantizar la seguridad, confiabilidad e integridad mecánica de los sistemas de tuberías durante su operación. Para ello, la norma define criterios relacionados con la selección de materiales, procedimientos de soldadura, calificación de soldadores, inspección visual, ensayos no destructivos y pruebas de presión, permitiendo verificar que las uniones soldadas cumplan con las condiciones de servicio requeridas.

En el área de soldadura e inspección, la ASME B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2023), establece lineamientos para evaluar discontinuidades tales como socavado, porosidad, grietas, falta de fusión y exceso de refuerzo en juntas soldadas. Asimismo, la norma se complementa con otros códigos como ASME Sección IX (American Society of Mechanical Engineers, 2023), el cual regula la calificación de procedimientos de soldadura (WPS/PQR) y la certificación de soldadores.

Dentro del contexto industrial, la aplicación de la ASME B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2023), permite asegurar que las tuberías de proceso operen bajo condiciones seguras, minimizando riesgos de fuga, falla estructural o accidentes asociados al transporte de fluidos presurizados. Por esta razón, constituye una referencia fundamental en proyectos relacionados con fabricación, montaje e inspección de sistemas de tuberías industriales.

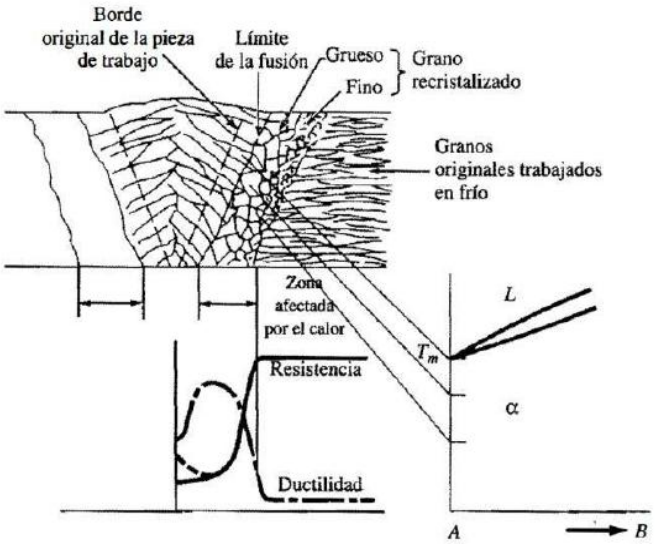
7.5. ZONA HAZ

El término HAZ proviene de la expresión en inglés *Heat Affected Zone,* y se refiere a la zona afectada térmicamente del material durante un proceso de soldadura o corte, debido a la exposición a temperaturas elevadas cercanas al punto de fusión. Esta zona corresponde a la región del material base cuya microestructura ha sido modificada por el calor, sin llegar a fundirse.

El HAZ se encuentra entre el metal base y el metal fundido del cordón de soldadura. El material de aporte utilizado debe presentar una composición química y una estructura similares a las del material base, de manera que ambos puedan fusionarse adecuadamente y formar una unión soldada continua y de calidad.

La zona afectada por el calor (ZAC) se localiza adyacente al cordón de soldadura y se caracteriza por presentar alteraciones microestructurales, como cambios en el tamaño de grano del material. En la figura. Se observa la sección transversal de una pieza soldada. Dado que el material base fue originalmente trabajado en frío, su estructura presenta granos alargados, una característica típica de este tipo de procesos (Schey,2002).

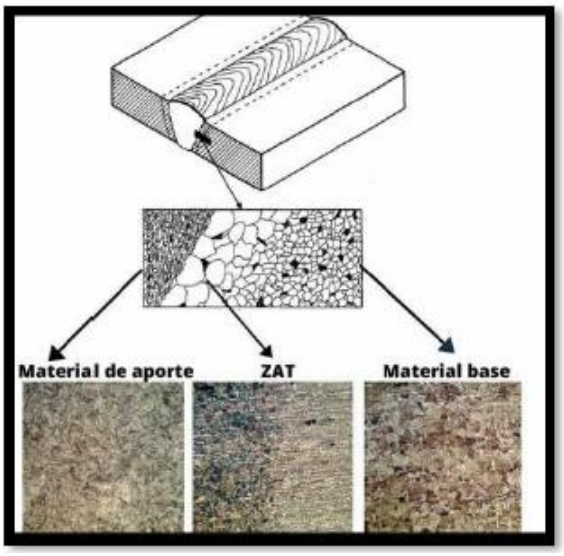
Figura 8. Selección transversal de una pieza soldada.



Fuente: Schey, John A. Procesos de manufactura. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2002. p.84.

A medida que se va acercando la zona afectada por el calor, el grano del material reduce su tamaño debido a las altas temperaturas presentes en la fusión, sufriendo un proceso de recristalización que reduce la resistencia del material en este zona, una vez se va solidificando la unión, el tamaño del grano vuelve a aumentar teniendo un grosor mayor que el del metal base (**ver figura 9**), teniendo unas propiedades mecánicas diferentes correspondiente a la aleación entre el metal base y el material de aporte.

Figura 9. Ejemplo del cambio de tamaño de grano en la sección transversal.

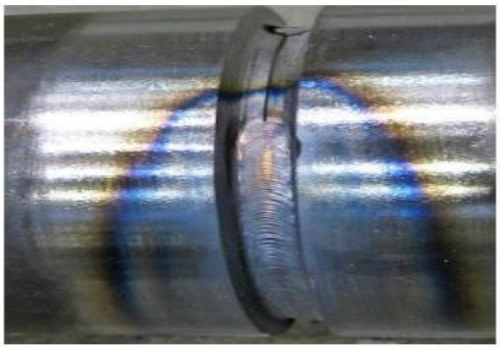


Fuente: "https://www.agofer.com.co/que-es-zat-haz-que-debemos-saber-al-respecto (Agofer Dith Group, 2021)".

La zona afectada por el calor (ZAC o HAZ) es considerada crítica, ya que el ciclo térmico de la soldadura altera su microestructura, lo que deriva en un cambio de las propiedades mecánicas originales del material. Adicionalmente, presentan modificaciones visuales, como la aparición de colores de temple que varían desde tonalidades claras hasta azules brillantes.

Este fenómeno cromático se debe a la oxidación superficial inducida por el calor y es una herramienta valiosa para la identificación. No solo delimita el área influenciada térmicamente, sino que, al conocerse las tonalidades características (**ver figura 10**), también permite inferir la temperatura máxima alcanzada y los posibles cambios microestructurales asociados.

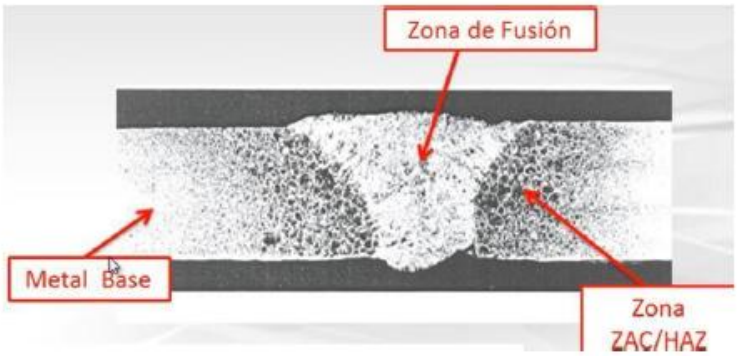
Figura 10. Ejemplo de la variación del color de un metal soldado en la zona HAZ.



Fuente: "https://www.agofer.com.co/que-es-zat-haz-que-debemos-saber-al-respecto (Agofer Dith Group, 2021).

La tonalidad de la zona HAZ puede variar según el metal sometido a una temperatura elevada común en los procesos de soldadura y corte, se puede dar el caso de que no se presente gran variación de color en el material, pero siempre van a haber modificaciones en las propiedades mecánicas. La variación de propiedades mecánicas en la zona HAZ esta llegada a la cantidad de calor transmitida en el proceso, el tiempo de exposición del material y las propiedades del material. Para el caso del acero inoxidable la zona HAZ puede tener aparición de corrosión por la sensibilización del material (Agofer Dith Group, 2021).

Figura 11. Zonas en la junta soldada.



Fuente: "http://soldaduraytecnologias.blogspot.com (SoldadurayTecnologia, 2015).

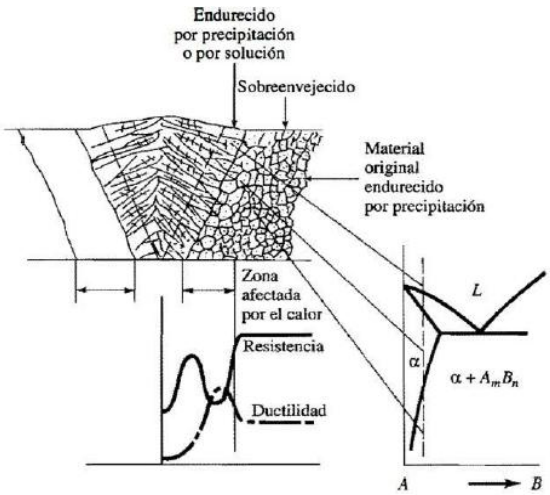
En la figura anterior se identifican las tres zonas que se generan en una junta soldada por fusión, en los extremos se tiene el metal base o la zona B, donde se encuentra la microestructura y las propiedades físicas netas del metal base (sin ninguna alteración), en cuanto a la zona de fusión en donde el material de aporte se funde junto con el material base, se tiene un cambio completamente tanto químico como microestructural en el material, finalmente se cuenta con la zona HAZ o zona ZAC (zona afectada por el calor) dicha zona es considerada la zona crítica del material debido a que limita con la zona de fusión llegando a alcanzar altas temperaturas y alterando su microestructura, esta zona generalmente acumula esfuerzos residuales que fragilizan el material y generan microgrietas en las fronteras de los granos que se ven afectados por el calor.

La microestructura que se forma en la zona HAZ después de ser expuesta a las altas temperaturas del proceso de soldadura varía según la composición del material base, dependiendo de si se trata de un metal puro o de una aleación. En el caso de los materiales aleados, pueden presentarse distintas situaciones según su composición química, pudiendo formarse dos o múltiples fases que definirían la microestructura final.

Los materiales con composiciones eutécticas suelen presentar una solidificación adecuada, por lo que no tienden a desarrollar problemas significativos en sus propiedades mecánicas, estructurales tras la soldadura. Por su parte, las aleaciones

que endurecen mediante tratamientos de precipitación suelen mostrar una respuesta más favorable al proceso cuando se encuentran en estado recocido, dado que este estado reduce tensiones internas y facilita la transformación microestructural (**ver figura 12**).

Figura 12. Material endurecido por precipitación, el cordón de soldadura es más y menos dúctil.



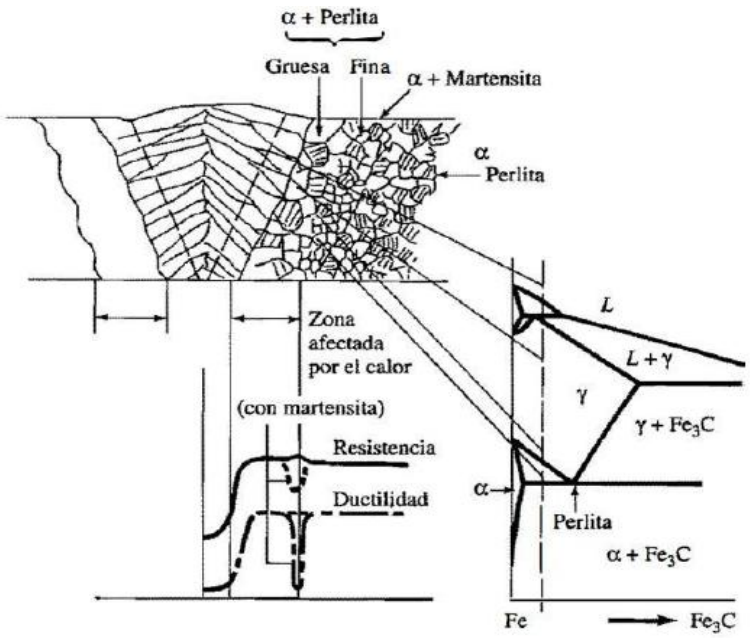
Fuente: Schey, John A. Procesos de manufactura. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2002. p.787.

La zona HAZ cuando se calienta y enfría a gran velocidad puede llegar a generar un sobre envejecimiento o disminución de resistencia y ductilidad en la zona tratada, y un ablandamiento en las zonas que no tuvieron sobre exposición al calor, presentando problemas de corrosión, por lo que se ve la necesidad de aplicar tratamientos térmicos que mejoran las propiedades de las zonas que tuvieron contacto con la soldadura.

La figura 12 muestra un acero de medio carbono en estado de recocido, cuya microestructura inicial consiste en granos de ferrita y perlita (Schey, 2002). Tras la soldadura, se observa en la zona afectada por el calor (ZAC) un crecimiento de grano significativo adyacente al cordón, el cual disminuye progresivamente con la distancia al mismo.

En este tipo de aceros, un enfriamiento acelerado posterior a la soldadura puede favorecer la formación de fases como bainita y martensita. La aparición de martensita, en particular, conlleva una drástica reducción de la ductilidad del material. Cabe destacar que, a mayor contenido de carbono en el acero, la formación de martensita se vuelve prácticamente inevitable, independientemente de la velocidad de enfriamiento del proceso de unión.

Figura 13. Formación de martensita en un acero al bajo carbono en estado de recocido luego de ser sometido a un proceso de soldadura.



Fuente: Schey, Jhon A. Procesos de manufactura. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2002 p.787.

7.6. DEFECTOS DE LA SOLDADURA

Una soldadura mal aplicada o una mala definición de parámetros de soldadura genera defectos de diferente gravedad dañando el material. La figura. muestra la gráfica de diferentes resultados de una soldadura por fusión. Para la definición de los parámetros de soldadura se debe tener en cuenta que la rapidez de entrada de calor por longitud unitaria debe ser proporcional al espesor de las piezas a soldar, la rapidez de deposición del metal soldado y la velocidad del movimiento a lo largo del cordón de soldadura (Schey,2002).

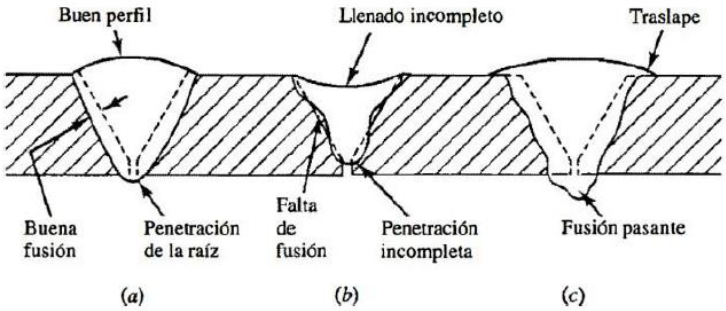
La figura 14 en la sección (a) muestra el resultado correcto después de realizar una soldadura. En ella se evidencia que el cordón generado por el charco de soldadura cubre adecuadamente ambas piezas, sin producir traslapes, zonas huecas ni áreas sin contacto con el material fundido, y sin llegar a derretir en exceso el material base.

La figura 14 en la sección (b) se presenta un ejemplo de falta de fusión. Se observa que existen zonas donde la soldadura no penetra correctamente y la raíz no recibe una cobertura adecuada, lo que ocasionará una unión débil, propensa a agrietarse y, finalmente, a separarse bajo de la acción de cargas.

Por último, la figura 14 en la sección (c) muestra un caso de sobreexposición térmica y exceso de material de aporte. Esto puede provocar perforaciones en el material

base, así como una disminución de la resistencia a la fatiga debido a la elevada entrada de calor durante el proceso.

Figura 14. Soldadura por fusión con material de aporte y sus posibles diferentes resultados: (a) cordón bien formado, presentando buen perfil y una penetración de raíz; (b) falta de fusión, llenado incompleto, penetración incompleta; (c) fusión pasante-traslape.



Fuente: Schey, John A. Procesos de manufactura. 3 ed. México: Mc Graw Hill, 2002. P.788.

7.6.1 Defectos de la soldadura en tuberías soldadas

En la manufactura e instalación de tuberías industriales, la integridad estructural de las juntas soldadas es un factor importante para poder garantizar la seguridad operativa y prevenir las fallas catastróficas bajo presión. El control de calidad en cuestiones metalúrgicas exige la identificación e inspección de las discontinuidades geométricas e internas que se puedan ocasionar durante la etapa de producción. Defectos como la penetración incompleta, la falta de fusión, los poros y las inclusiones de escoria no solo disminuyen el área transversal efectiva de la junta (reduciendo su resistencia mecánica), sino que actúan como concentradores de esfuerzos locales. La presencia de dichos defectos facilita la propagación rápida de microgrietas ante cargas mecánicas o fatiga, haciendo vulnerable la tubería a sufrir fallas prematuras o fugas en entornos operativos exigentes (como los medios marinos o corrosivos). En la tabla 4 se evidencian los defectos más comunes en tuberías soldadas.

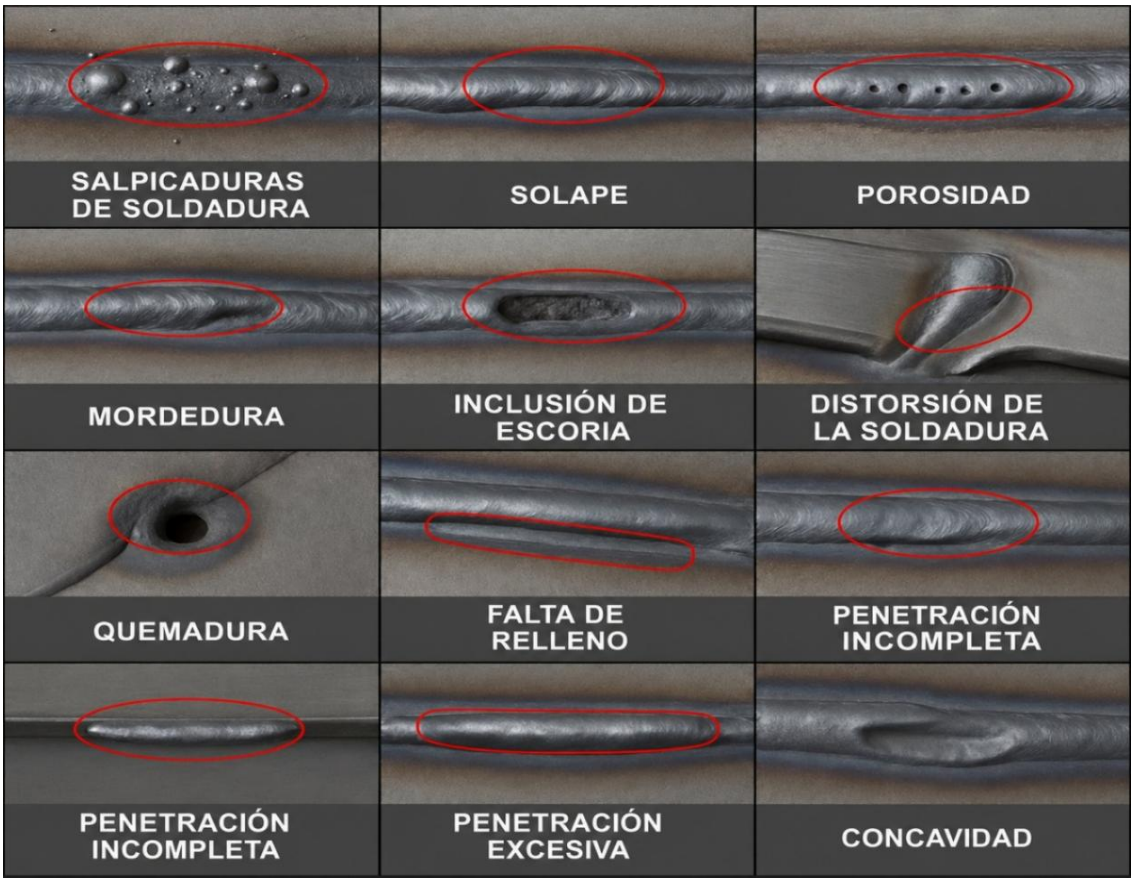
Tabla 4. Defectos comunes en la soldadura de tuberías soldadas.

Defecto de soldadura	Descripción	Posibles causas
Salpicaduras de soldadura	Pequeñas gotas de metal fundido que se adhieren alrededor del cordón sin formar parte de la unión.	Corriente de soldadura elevada, arco demasiado largo, voltaje excesivo, parámetros inadecuados o protección gaseosa deficiente.
Solape	El metal de aporte fluye sobre el material base sin fusionarse adecuadamente con él.	Baja velocidad de avance, exceso de metal de aporte, corriente insuficiente o ángulo incorrecto de la antorcha/electrodo.
Porosidad	Presencia de cavidades o poros generados por gases atrapados durante la solidificación del metal.	Contaminación por humedad, aceite, óxido o grasa; caudal insuficiente de gas protector; corrientes de aire; material de aporte contaminado.
Mordedura (Socavado)	Ranura formada en el borde del cordón debido a la fusión excesiva del material base sin relleno suficiente.	Corriente excesiva, velocidad de avance muy alta, arco largo o técnica de soldadura inadecuada.
Inclusión de escoria	Material no metálico atrapado dentro del cordón de soldadura entre los pases o en la raíz.	Limpieza deficiente entre pasadas, baja corriente, mala técnica de soldadura o ángulo incorrecto del electrodo.
Distorsión de la soldadura	Deformación de la pieza causada por la expansión y contracción térmica durante la soldadura.	Aporte excesivo de calor, secuencia de soldadura incorrecta, ausencia de sujeción o diseño inadecuado de la junta.

Quemadura (Burn-through)	Perforación del material base debido al exceso de calor durante la soldadura.	Corriente muy alta, velocidad de avance baja, material de poco espesor o separación excesiva entre las piezas.
Falta de relleno	El cordón presenta una depresión o volumen insuficiente de metal de aporte respecto al perfil requerido.	Cantidad insuficiente de material de aporte, velocidad elevada, baja corriente o mala manipulación de la antorcha.
Penetración incompleta (raíz)	El metal fundido no alcanza completamente la raíz de la junta, dejando una zona sin fusionar.	Corriente insuficiente, preparación deficiente del bisel, separación de raíz inadecuada o velocidad de avance elevada.
Penetración incompleta (lateral)	La fusión no alcanza completamente uno o ambos flancos de la junta, reduciendo la resistencia mecánica.	Parámetros de soldadura incorrectos, mala orientación del electrodo, velocidad elevada o diseño inadecuado de la junta.
Penetración excesiva	El metal fundido atraviesa en exceso la raíz formando un refuerzo interno excesivo.	Corriente demasiado alta, separación de raíz excesiva, velocidad de avance baja o aporte térmico elevado.
Concavidad	El cordón presenta una superficie hundida por falta de material de aporte o mala distribución del metal fundido.	Baja tasa de deposición, velocidad excesiva, corriente insuficiente o técnica incorrecta de soldadura.

Fuente: Propia.

Figura 15. Defectos en la soldadura de tuberías soldadas.



Fuente: Propia.

7.7. MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES

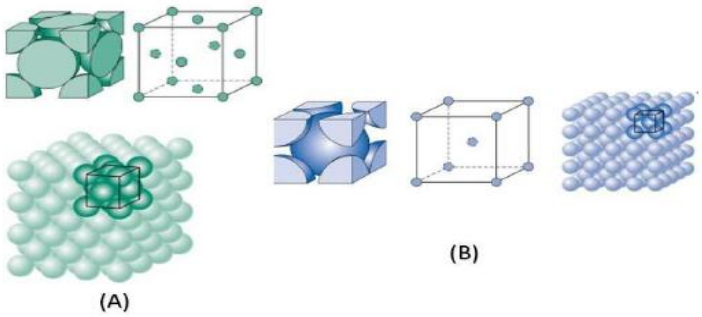
Para comprender las microestructuras, propiedades y características del acero, es indispensable considerar que se trata de una aleación hierro-carbono con porcentajes relativamente bajos de este último elemento. Esto implica que las distintas microestructuras surgen principalmente de la distribución de estos dos componentes. Además, el hierro es un metal alotrópico, lo que significa que puede existir en más de una estructura cristalina, siendo la forma específica que adopta dependiendo de la temperatura.

El hierro comienza a solidificarse aproximadamente a los 1538 ºC, formando una micro estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC, ver figura.), a la cual se le denomina hierro delta (δ). Al descender la temperatura por debajo de 1401 ºC, la estructura cristalina cambia de BCC a cúbica centrada en las caras (FCC, ver figura.), adquiriendo propiedades no magnéticas; en esta fase el hierro se conoce como hierro gamma (γ).

Posteriormente, al llegar a los 908 ºC, la microestructura retorna nuevamente a una estructura BCC sin propiedades magnéticas, denominada hierro alfa (α). Si el enfriamiento continúa de manera lenta por debajo de 786 ºC, el hierro desarrolla

propiedades magnéticas, aunque su estructura permanece BCC. Es decir, se mantiene como hierro alfa, pero en fase magnética (Smith & Hashemi, 2006).

Figura 16. Distribución molecular del hierro.

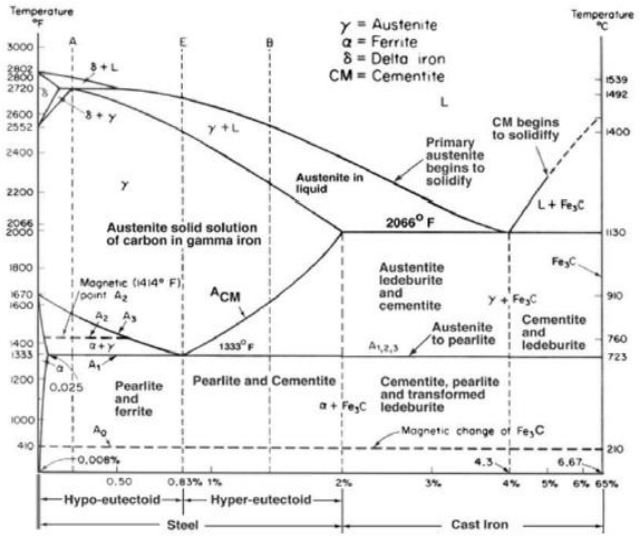


Fuente: "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales (Smith & Hashemi, 2006)".

7.8. DIAGRAMAS DE FASES HIERRO-CARBONO

El diagrama de fases hierro-carbono es una representación gráfica que permite identificar las diferentes microestructuras presentes en los aceros en función del porcentaje de carbono (**ver figura 17**), de acuerdo de la cantidad de porcentaje en carbono se obtendrán ya sea aceros de bajo carbono (todos los aceros por debajo del 2% de carbono) o fundiciones de hierro (hierro fundido, todos los aceros por encima del 2% de carbono).

Figura 17. Diagrama de fases de hierro-carbono.



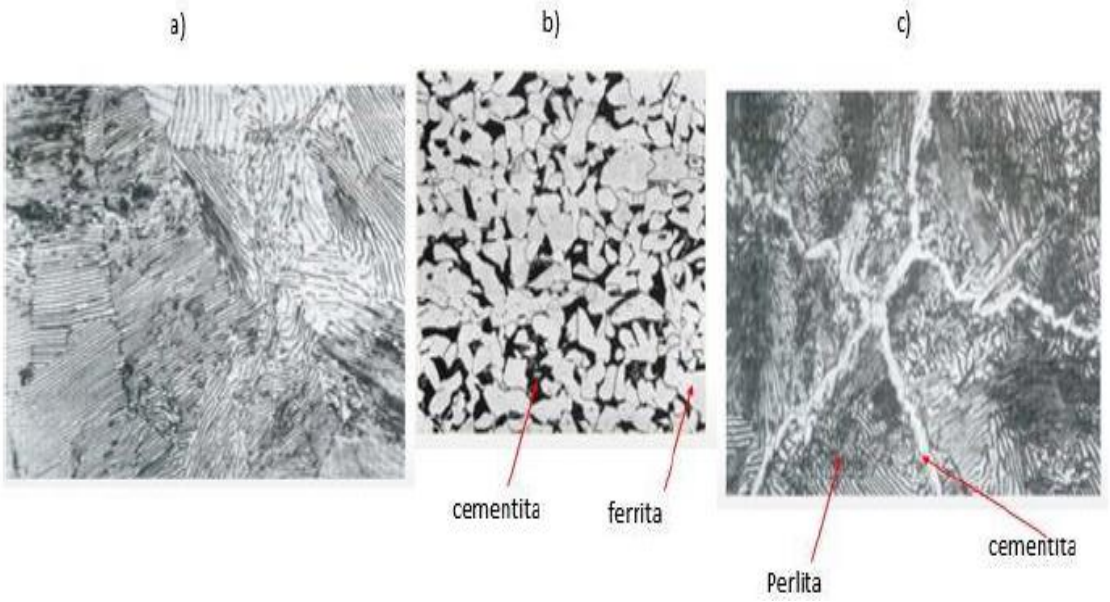
Fuente: "Perez Antonio. Tratamientos térmicos. 1996 (Perez Patiño, 29 de marzo de 1996)".

Un acero se clasifica como eutectoide cuando su composición de carbono es del 0.8%. Este acero posee una microestructura 100% perlítica (ver figura.), resultado de la transformación isotérmica de la austenita en una estructura laminar alterada de ferrita y cementita (Fe_3C), formando lo que se conoce como grano perlítico.

Pero, por el contrario, en los aceros con un porcentaje de carbono superior al 0.8%, conocidos como hipereutectoides, el equilibrio se altera. Durante el enfriamiento, la cementita primaria (o proeutectoide) precipita primero en los límites de grano de la austenita. La microestructura final resultante consiste en granos perlíticos rodeados por una red de esta cementita (**ver figura 18**).

Por otro lado, si se aumenta el porcentaje de carbono por encima del 0.8% se tiene un acero hipoeutectoide donde su microestructura ya no será 100% perlítica por la ausencia de carbono, en otras palabras, se obtendrán granos perlíticos dentro de una matriz ferrítica (**ver figura 16**) (Smith & Hashemi, 2006).

Figura 18. Microestructuras cristalinas del hierro.



Fuente: "Perez Antonio, Tratamientos térmicos. 1996 (Perez Patiño, 29 de marzo de 1996)".

7.9. TAMAÑO DE GRANO SEGÚN NORMA ASTM E112

La norma ASTM E112 (ASTM International, 2025), es un estándar utilizado para la caracterización del tamaño de grano en las microestructuras de los aceros. En la figura se muestran los distintos números de tamaño de grano establecidos por esta norma, donde un valor de 1 corresponde a granos muy grandes y un valor de 8 indica granos muchos más pequeños.

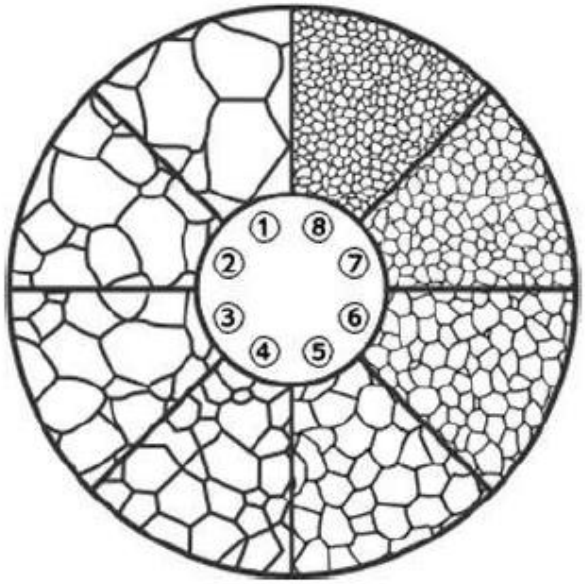
La ecuación 2, definida por la ASTM E112 (ASTM International, 2025), permite calcular el número de tamaño de grano en función del número de grano por pulgada cuadrada observados a un aumento de 100X, donde:

Ecuación 2. Número de tamaño de grano (ASTM E112)

$$N = 2^{G-1}$$

- *N = número de granos por pulgada cuadrada a 100X.*
- *G = número de tamaño de grano ASTM E112.*

Figura 19. Número de tamaño de grano según ASTM E112.



Fuente: "American Society for Testing & Materials. ASTM E112-96 (2004)".

Además, la norma ASTM E112 (ASTM International, 2025), plantea tres métodos para la determinación del tamaño de grano que se describirán a continuación:

- Método de comparación: se basa en la inspección visual donde se debe contar con micrografía a 100X la cual se compara con la figura determinando qué número de tamaño de grano se asemeja al de la micrografía a analizar.
- Método planimétrico: este método puede llegar a ser el más tedioso, debido, a que consiste en el conteo de granos de una área determinada, dicha área puede ser circunferencial o rectangular donde los granos que intersecan con el límite de la región contarán como medio grano y los que se encuentren dentro de las región contaran como la unidad, la precisión de este método va en función de la calidad del conteo de granos y del tipo de morfología que

tengan los granos, ya que si se cuenta con una morfología equiaxial la precisión de este método no se verá muy afectada.

- Método de intersección lineal: este método conocido también como método lineal de Heyn, consiste en trazar una serie de líneas de igual longitud donde se realiza un conteo de los granos que se intersecan con dichas líneas, para el cálculo del número de tamaño de grano bajo este método se tienen las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3. Número de intersecciones por unidad de longitud (ASTM E112)

$$\underline{N_L} = \frac{N_i}{L_T/M}$$

Ecuación 4. Número de tamaño de grano lineal de Heyn (ASTM E112)

$$G = \left(6.643856 \times Log\left(\underline{N_L}\right)\right) - 3.288$$

Donde:

- $\underline{N_L}$ *= número de intersecciones por unidad de longitud*
- N_i *= número de intersecciones*
- L_T *= longitud de las líneas*
- G *= número de tamaño de grano ASTM*

7.10. ATAQUE METALOGRÁFICO

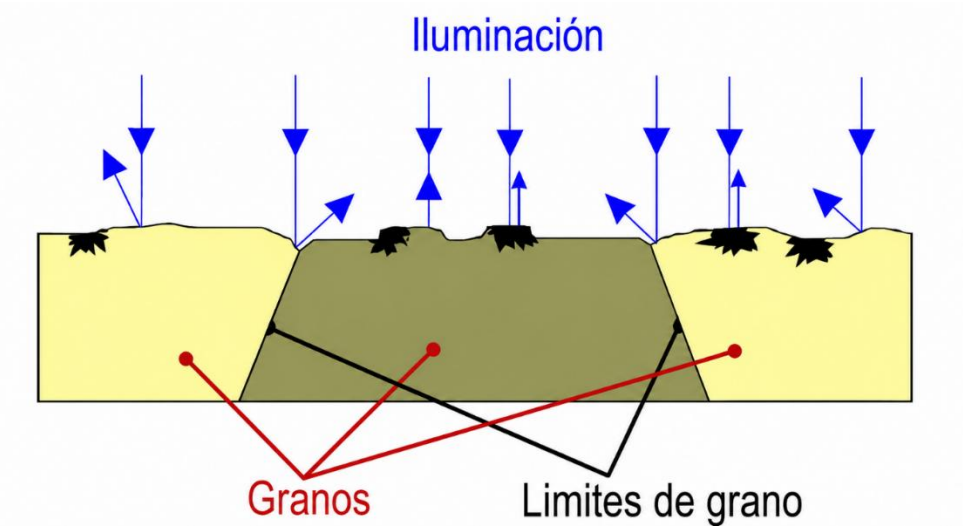
El ataque químico es un procedimiento que se aplica a un material después de una preparación metalográfica (que incluye desbaste, lijado y pulido), una vez obtenido un acabado superficial de brillo espejo. Su importancia radica en que, al contrastar selectivamente la superficie, permite revelar y visualizar con claridad bajo el microscopio óptico características microestructurales críticas, como los límites de grano, las distintas fases presentes y otras particularidades del material, tanto a nivel microscópico como macroscópico.

La calidad del ataque químico depende críticamente de la preparación superficial previa. El lijado debe ser progresivo, utilizando lijas de grano cada vez más fino. En cada etapa, los movimientos deben realizarse en una sola dirección, rotando la probeta 90º entre un grano y el siguiente. Este procedimiento tiene como objetivo eliminar los rayones de las fases anteriores, hasta que la superficie muestra un patrón de rayado uniforme en una única dirección. Es fundamental realizar una limpieza minuciosa de la probeta tras cada cambio de lija para evitar arrastrar partículas abrasivas gruesas a la siguiente etapa.

La fase de pulido debe producir una superficie perfectamente lisa, libre de cualquier rugosidad, marca o rayón. Una vez obtenido este acabado de brillo espejo, se procede a seleccionar el reactivo de ataque. Para ello, la norma ISO/TR 16060:2003 “Destructive test son welds in metallic materials – etchants for macroscopic and microscopic examination” proporciona una guía exhaustiva; especificando el tipo y la concentración del reactivo adecuado para cada material y objetivo de estudio.

Una vez seleccionando el reactivo de acuerdo con lo especificado en la norma, se procede a someter la probeta a su acción. Tras unos segundos de exposición, el ataque químico habrá actuado sobre la superficie, lo que se manifiesta con la aparición de una tonalidad oscura y un claro contraste en los límites de grano (**ver figura 20**).

Figura 20. Reflejo de la luz en la superficie de una probeta después de un ataque químico.



Fuente: http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/ataque/ (Derematerialia, s.f.).

7.11. CONCENTRACIÓN DE CLORUROS

La concentración de cloruros se refiere a la cantidad de iones cloruro (Cl^-) disueltos en un medio líquido. En los ensayos de corrosión, este parámetro determina la agresividad del ambiente sobre los materiales metálicos, ya que los iones cloruro favorecen la ruptura de la película pasiva del acero, acelerando los procesos de corrosión y la formación de productos de oxidación.

8. DESARROLLO

Para garantizar el adecuado cumplimiento de los objetivos planteados, se estableció una secuencia de pasos que debe ejecutarse de manera rigurosa con el fin de evitar alteraciones o daños en los resultados obtenidos durante el análisis de las muestras. En este proceso es necesario definir aspectos fundamentales tales como: el método de muestreo y el tamaño de las muestras a evaluar; el diseño de los parámetros de la junta soldada conforme a la norma AWS D1.1/D.1.1M (American Welding Society, 2020), así como los requisitos dimensionales y de preparación de bordes establecidos en ASME B16.25, y los criterios de integridad y requisitos de fabricación aplicables según B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2023), para tubería de procesos; las especificaciones del proceso de soldadura siguiendo los lineamientos de la AWS; la preparación metalográfica de las probetas conforme a la norma ASTM 3 – Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens; y la selección del reactivo adecuado para el ataque químico, de acuerdo con ISO/TR 16060 – Destructive test son welds in metallic materials: Etchants for macroscopic and microscopic examination.

Posteriormente, las muestras son analizadas mediante óptica y, finalmente, se realizan los ensayos de dureza correspondientes.

8.1. SELECCIÓN MATERIAL

El acero ASTM A106 Grado B es un material ampliamente empleado en la fabricación de tuberías destinadas a servicios de alta temperatura y presión, especialmente en sistemas de vapor, refinerías, plantas petroquímicas y centrales térmicas. Este acero al carbono se caracteriza por su elevada resistencia mecánica, buena ductilidad, tenacidad adecuada para condiciones exigentes y una excelente soldabilidad, lo que permite su integración en sistemas industriales sometidos a esfuerzos térmicos y mecánicos continuos.

Entre sus propiedades más relevantes se destacan su resistencia al esfuerzo de tracción, su estabilidad estructural a altas temperaturas y su comportamiento homogéneo durante los procesos de conformado y soldadura. No obstante, debido a la naturaleza de sus aplicaciones, las tuberías fabricadas con ASTM A106 Grado B suelen estar expuestas a gradientes térmicos severos, ciclos de carga repetitivos y posibles concentraciones de esfuerzo en las uniones soldadas.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del acero ASTM A106 Grado B.

Propiedades mecánicas				
Calificación	Grado A		Grado B	Grado C
Resistencia a la tracción, mín., psi	48000 [330]		60000 [415]	70000 [485]
Límite elástico, mín., psi [MPa]	30000 [205]		35000 [240]	40000 [275]
Dirección	Longitudinal	Transverso	Transversal longitudinal	Transversal longitudinal
Alargamiento en 2 pulg. [50 mm], mín., %				

Fuente: "https://www.zzsteels.com (2024)".

Tabla 6. Composición química del ASTM A106 Grado B.

	Grado A	Grado B	Grado C
Máximo % de carbono	0.25	0.30*	0,35*
*Manganeso %	0,27 a 0,93	*0,29 a 1,06	*0,29 a 1,06
Fósforo, máx. %	0.035	0.035	0.035
Azufre, máx. %	0.035	0.035	0.035
Silicio, mín.%	0.1	0.1	0.1
Cromo, máx. %	0.4	0.4	0.4
Cobre, máx. %	0.4	0.4	0.4
Molibdeno, máx. %	0,15	0,15	0,15
Níquel, máx. %	0.4	0.4	0.4
Vanadio, máx.%	0.08	0.08	0.08
*A menos que el comprador especifique lo contrario, por cada reducción de 0,01 % por debajo del máximo de carbono especificado, se permitirá un aumento de 0,06 % de manganeso por encima del máximo especificado hasta un máximo de 1,65 % (1,35 % para ASME SA106).			

Fuente: "https://www.zzsteels.com (2024)".

8.2. MUESTREO

Se tiene un tubo de acero ASTM A106 Grado B de 25 cm de largo con un espesor de 2" (**ver figura 21**), material comúnmente usado para servicios de alta temperatura y presión, de la cual se seccionan (**ver figura 22**) y cortan con un disco abrasivo cuatro muestras de una medida de 33 mm c/u, para ser utilizados como objeto de estudio en el presente proyecto.

Figura 21. Tubo de acero ASTM A106 Grado B.



Fuente: Propia.

Figura 22. Medición y seccionamiento en tramos del tubo de acero ASTM A106 Grado B.



Fuente: Propia.

8.2.1. Preparación del cordón de soldadura

Para la realización del cordón de soldadura se realiza el formato WPS para el procedimiento de soldadura y se plantea el diseño de la junta soldada según la norma AWS D1.1/D1.1M (American Welding Society, 2020), un bisel a tope en V, se trabaja con un electrodo E-6010 para penetración y E-7018 para presentación con un diámetro de 3mm, una corriente de 120 amperios y un voltaje de 220V, se diseña con un ángulo de ranura de 70º y se trabaja con una apertura de raíz de 1/16”, en la tabla 7 se identifican todos los parámetros que se seleccionaron para el procedimiento del cordón de soldadura.

Tabla 7. Formato WPS para especificación del procedimiento de soldadura.

	ESPECIFICACIONES DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA WPS No.	**Código:** F-GT-79-07 **Versión:** 0 **Fecha:** 26/06/2026

Proceso: **SMAW**

Aplicación: MANUAL

Calificaciones aplicaables
PQR: Ninguno

JUNTAS (QW-402)
Diseño de la junta: Bisel en "V"
Material de respaldo: SI ____ NO X TIPO: ____

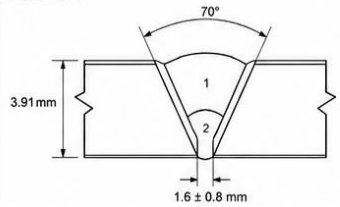
TIPO DE ALINEAMIENTO: Puntos de soldadura, platinas

REMOCION DE LA GRAPA: N/A

APROBADO PARA
Información ☐
Calificación ☐
Fabricación ☒
Utilizar solamente en Soldadura de tubería ASTM A106 grado B, mediante proceso SMAW
Por: Luis Ernesto Sanchez
Fecha:

MATERIALES BASE (QW - 403)
S - N°. 1 Grupo N°. 1 a S. -N°. 1 Grupo N°. 1
Especificacion del material y grado. ASTM A106 GR B
Rango de espesores material base: espesor de pared 0.154"
A tope: 0.154" Filete: TODAS
Diametro del tubo (2"): A tope: 2"
A Filete: N/A
Otro : N/A

DETALLE



MATERIAL DE APORTE (QW - 404)	SMAW	SMAW	
Especificaciones N°. (SFA)	5.5	5.5	
AWS N°. (Clase)	E6010	E7018	
F - N°.	2	2	
A - N°.	1	1	
Tamaño (diámetro)	3/32"	3/32"	
Metal depositado	F3 0.25"	F3 0.25"	
Rango de Espesor A Tope	-	-	
Filete	-	-	
Marca de Electrodo	west arco	west arco	
Fundente	NA	NA	
Inserto Consumible	NA	NA	
Otro	NA	NA	

Rev.: N/A
Codigo Aplicable: AWS D1,1
Fecha.: 26 de junio de 2026
Especificacion Aplicable:

LIMPIEZA INICIAL Y ENTRE PASES: La requerida para obtener el bisel y la superficie adyacente libre de mugre, grasa u otro contaminante y/o remover escoria antes de depositar los pases sucesivos.

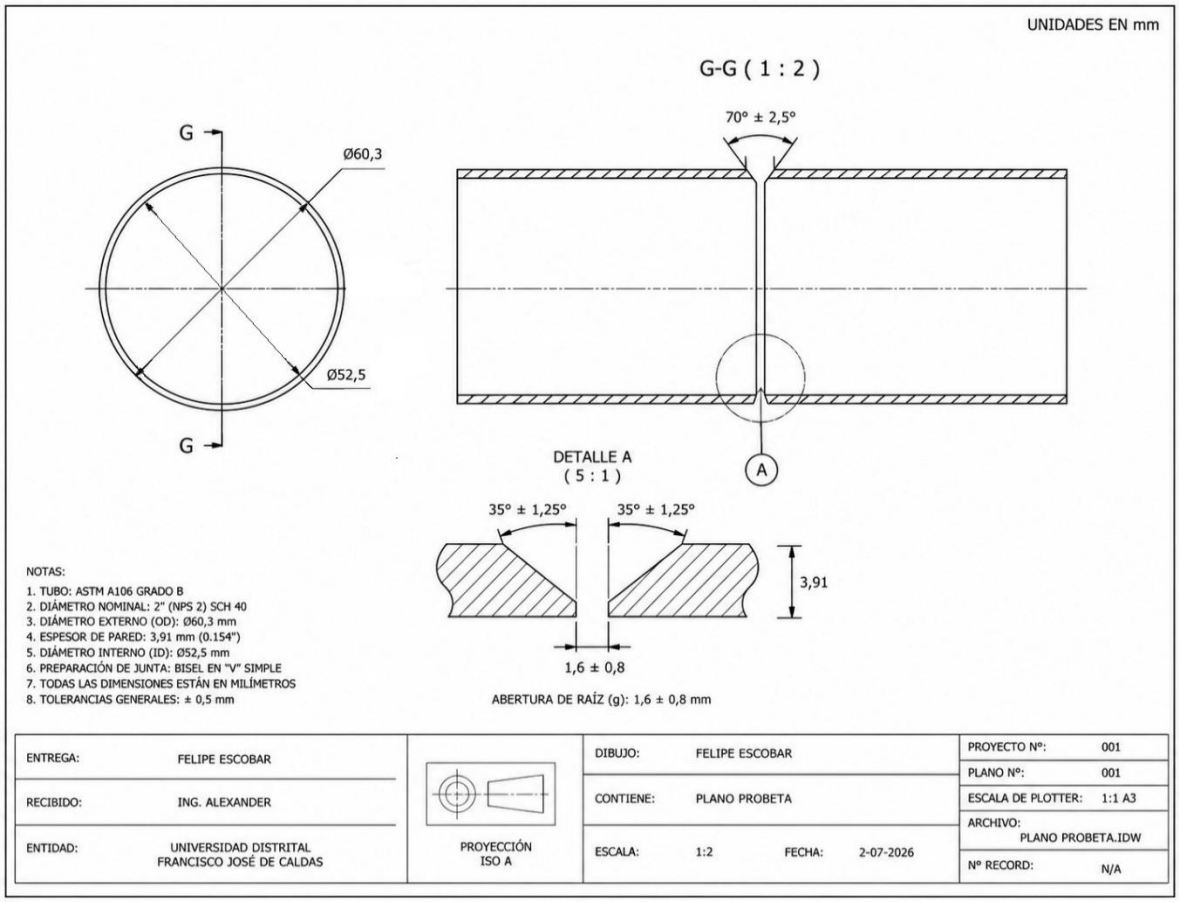
ELABORADO POR: Luis Ernesto Sanchez

APROBADO POR:

Fuente: Propia.

Para la definición de los cortes y el tipo de bisel que especifica la norma ASME B31.3 (American Society of Mechanical Engineers, 2023), para una buena aplicación de soldadura, se desarrolla un plano con las dimensiones establecidas (**ver figura 23**), estas medidas se obtuvieron en la pieza mediante el proceso de corte del material, con una segueta logrando dejar las piezas con las dimensiones establecidas, además de una superficie transversal continua y sin irregularidades, posteriormente se utilizó un torno paralelo para la realización del bisel según las especificaciones de la tabla.

Figura 23. Plano para corte del biselado en V de la junta soldada.



Fuente: Propia.

Figura 24. Corte del material y preparación de bisel.



Fuente: Propia.

La figura 24 muestra como quedan las muestras una vez finaliza el proceso de corte para realizar el bisel a tope en V con las dimensiones antes seleccionadas. Posteriormente se utilizó un goniómetro para validar el ángulo de la raíz y que estuviera acorde al plano presentado en la figura 24. también se rectificó que la apertura y la cara de la raíz fuera de 1/16” (**ver figura 25**).

Figura 25. Rectificación del ángulo del bisel a 35º.



Fuente: Propia.

Posteriormente se desarrolló la fase de especificación del proceso de soldadura a aplicar, para lo cual se utilizó el formato establecido por la norma AWS D1.1 (American Welding Society, 2020). En la tabla 1 se presentan todas las especificaciones requeridas para la ejecución del cordón de soldadura. Inicialmente, se emplearon electrodos marca LINCOLN GRICON.

Figura 26. Aplicación del cordón de soldadura.



Fuente: Propia.

Una vez definidas las especificaciones del proceso de soldadura se procede a realizar el cordón de soldadura (**ver figura 27**) obteniendo dos muestras de 66 mm soldadas, se seleccionó el cordón que bajo la inspección visual quedó en mejores condiciones.

Figura 27. Detalles del cordón de soldadura.



Fuente: Propia.

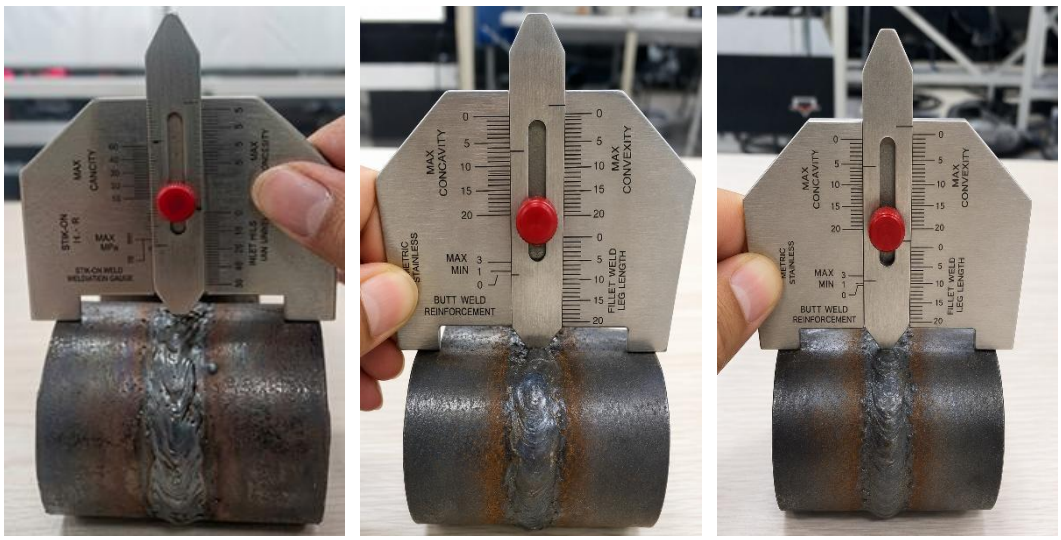
8.3. ENSAYO NO DESTRUCTIVO INSPECCIÓN VISUAL

El ensayo por inspección visual es un método de ensayo que facilita identificar la detección de posibles discontinuidades superficiales en el material, ya sea por su fabricación o después de realizar cualquier proceso asociado a componentes metálicos, ensambles o juntas soldadas. Por lo general, es uno de los primeros a desarrollarse, ya que permite detectar defectos de forma oportuna, reducir los costos derivados a reprocesos y servir como una pauta inicial para la aplicación de otros ensayos no destructivos más avanzados. Dicho ensayo se realizó de acuerdo a los lineamientos establecidos en la norma *ASME Section V*, *Article 9.*

8.3.1. Inspección de refuerzo excesivo

La inspección de sobre cordón en soldadura consiste en la verificación visual y dimensional del cordón, con el fin de asegurar que su altura, perfil y uniformidad cumplan con los criterios de aceptación establecidos por la normativa aplicable, garantizando la integridad estructural y el correcto desempeño del componente soldado. Se realizaron 8 mediciones distribuidas, con una separación de aproximadamente 1 in a lo largo de la junta, obteniendo valores que oscilaban entre 1 y 2 mm (**ver tabla 8**). De acuerdo con los criterios de aceptación establecidos en la AWS D1.1 (American Welding Society, 2020), para inspección visual, el refuerzo del cordón de soldadura no debe exceder los 3 mm (1/8 in) cuando el espesor del material es menor o igual a 6 mm**.**

Figura 28. Refuerzo excesivo.



Fuente: Propia.

Tabla 8. Medición del refuerzo del cordón de soldadura.

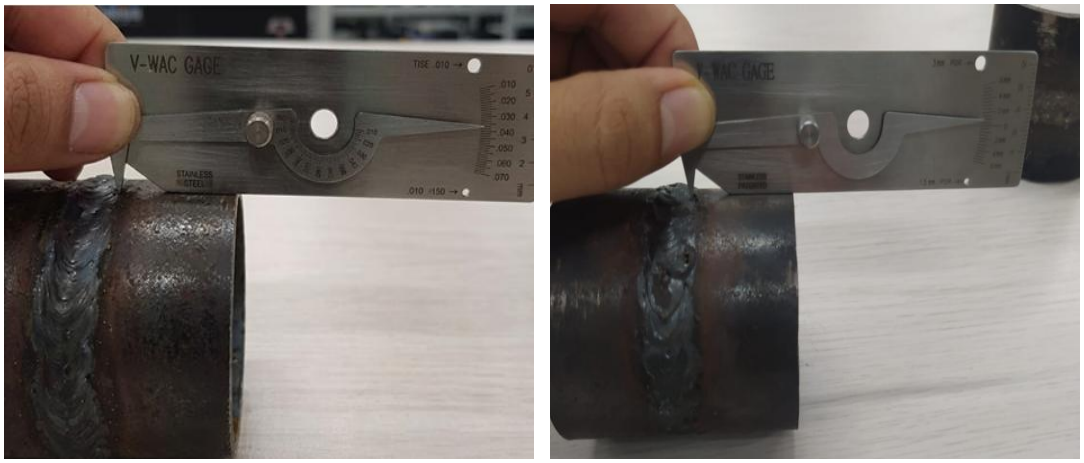
Medición	Ubicación de la medición (in)	Refuerzo medido (mm)
1	Inicio del cordón	1.3
2	1/8 de la longitud	1.5
3	2/8 de la longitud	1.7
4	3/8 de la longitud	1.8
5	4/8 de la longitud	1.5
6	5/8 de la longitud	1.4
7	6/8 de la longitud	1.7
8	Final del cordón	1.5

Fuente: Propia.

8.3.2. Inspección socavado

La inspección de socavado en soldadura consiste en la evaluación visual y dimensional de las ranuras formadas en el metal base adyacente al cordón de soldadura. Se realizaron 6 mediciones en puntos seleccionados aleatoriamente a lo largo del cordón, priorizando aquellas zonas donde, durante la inspección visual, se evidenciaba una posible presencia de socavación. Los valores registrados oscilaron entre 0,5 y 0,9 mm (**ver tabla 9**). El límite de socavado según la norma AWS D1.1 (American Welding Society, 2020), en acero estructural en materiales estáticos (carga estática) no debe exceder 1 mm (1/32 in) de profundidad general, se permite hasta 2 mm (1/16 in) en ciertos casos siempre que: no afecte elementos sometidos a fatiga y que la longitud acumulada está limitada. Para materiales sometidos a fatiga o carga cíclica el socavado generalmente no debe exceder 0.25 mm (0.01 in).

Figura 29. Socavado.



Fuente: Propia.

Tabla 9. Medición de la socavación del cordón de soldadura.

Medición	Socavación medida (mm)
1	0.5
2	0.7
3	0.9
4	0.6
5	0.8
6	0.5

Fuente: Propia.

8.3.3. Inspección poros

La inspección de porosidad en soldadura consiste en la evaluación visual y/o mediante ensayos no destructivos de cavidades producidas por gases atrapados durante la solidificación del cordón. Se empleó una galga de inspección, la cual incorpora una referencia de 1,5 mm para la verificación rápida del diámetro de poros superficiales. Posteriormente, la aceptación del defecto se evaluó conforme a los criterios establecidos por AWS D1.1. (American Welding Society, 2020), donde no

se encontraron poros con medidas mayores a las permitidas. La norma establece que la suma de los diámetros de los poros superficiales visibles no debe exceder 10 mm (3/8 in) en cualquier longitud de 25 mm (1 in) de soldadura**,** y que no deben presentarse agrupaciones o alineaciones de poros que comprometan la integridad de la unión.

Figura 30. Poros.



Fuente: Propia.

8.3.4. Inspección desalineación material

La inspección de desalineación del material consiste en la verificación dimensional de las deformaciones producidas por el proceso de soldadura, evaluando la rectitud, planicidad y alineación del componente respecto a las tolerancias establecidas en planos y códigos aplicables. Es considerada inaceptable cuando genera esfuerzos adicionales, dificulta el montaje o compromete la integridad estructural del equipo. La desalineación entre los extremos de la tubería se verificó mediante una galga con el propósito de comprobar el correcto alineamiento de la junta soldada. Las medidas que se realizaron fueron 6, en diferentes puntos de la junta soldada. Los valores obtenidos oscilaron entre 0.1 y 0.4 mm (**ver tabla 10**). De acuerdo con la norma API 1104 (American Petroleum Institute, 2021), la desalineación interna (Hi-Lo) no debe exceder el 12,5 % del espesor nominal de la pared de la tubería (1/8 del espesor)**.** Para la tubería ASTM A106 grado B de 2" schedule 40, cuyo espesor nominal es de 3,91 mm, el límite máximo permisible de desalineación corresponde a 0,49 mm.

Figura 31. Desalineación material.



Fuente: Propia.

Tabla 10. Medición de la desalineación.

Medición	Desalineación (mm)
1	0.1
2	0.2
3	0.1
4	0.3
5	0.4
6	0.2

Fuente: Propia.

8.4. ENSAYO NO DESTRUCTIVO TINTAS PENETRANTES

El ensayo de tintas penetrantes (PT) tiene como finalidad detectar discontinuidades superficiales abiertas a la superficie en materiales sólidos sin afectar su integridad ni propiedades mecánicas. Este método es especialmente eficaz para identificar defectos como grietas, fisuras, poros abiertos, pliegues, solapes y discontinuidades originadas durante los procesos de fabricación, soldadura o servicio.

8.4.1. Aplicación de aerosoles

Para la realización del ensayo (PT) se empleó un sistema convencional de contraste de color, compuesto por tres productos en aerosol: limpiador, penetrante y revelador. El **Met-L-Chek E-59A** corresponde al limpiador, es el primero en aplicarse ya que se encarga de eliminar la grasa, polvo, mugre y cualquier otro contaminante que impida la correcta aplicación del líquido revelador.

El **Link Check P-S** es el penetrante, su función es introducirse en poros, grietas o discontinuidades superficiales abiertas en el material. Este producto tiene buena capacidad de humectación, es de color rojo y se debe dejar actuar un tiempo prudente para hacer visibles dichas discontinuidades que puedan aparecer.

Por último, se encuentra el revelador **Met-L-Chek D-70**. Este líquido genera un fondo blanco y se encarga de absorber el penetrante retenido. Exhibe las posibles grietas en el material, evaluando las condiciones de la soldadura y tener certeza de las posibles decisiones que se deban tomar.

Figura 32. Aerosol limpiador de impurezas, aerosol penetrante y aerosol revelador.



Fuente: Propia.

Figura 33. Aplicación de aerosoles.



Fuente: Propia.

Una vez aplicado el sistema de inspección (limpieza, penetrante, remoción del exceso, revelador e inspección visual), no se evidenciaron indicaciones lineales ni redondeadas relevantes sobre el cordón de soldadura ni en la zona afectada por el calor. De acuerdo con los criterios de aceptación establecidos en la API 1104 (American Petroleum Institute, 2021), la ausencia de grietas e indicaciones superficiales relevantes permite concluir que la unión soldada cumple satisfactoriamente con los requisitos de aceptación, evidenciando una adecuada integridad superficial y descartando la presencia de discontinuidades detectables mediante este método de ensayo no destructivo.

8.5. ENSAYO NO DESTRUCTIVO ULTRASONIDO

El ensayo no destructivo por ultrasonido (UT) tiene como finalidad principal evaluar la integridad de materiales y componentes sin alterar sus propiedades mecánicas ni afectar su funcionalidad. Este método permite detectar, localizar y dimensionar discontinuidades internas que no son visibles a simple vista tales como grietas, porosidades, inclusiones, falta de fusión en soldaduras o pérdidas de espesor por corrosión.

En este ensayo se tomaron mediciones de las muestras antes y después del proceso de inmersión en la salmuera. Como resultado inicial, correspondiente a la condición previa a la inmersión. Se obtuvo un espesor de 0.151 µm.

Figura 34. Equipo de ensayo no destructivo por ultrasonido.

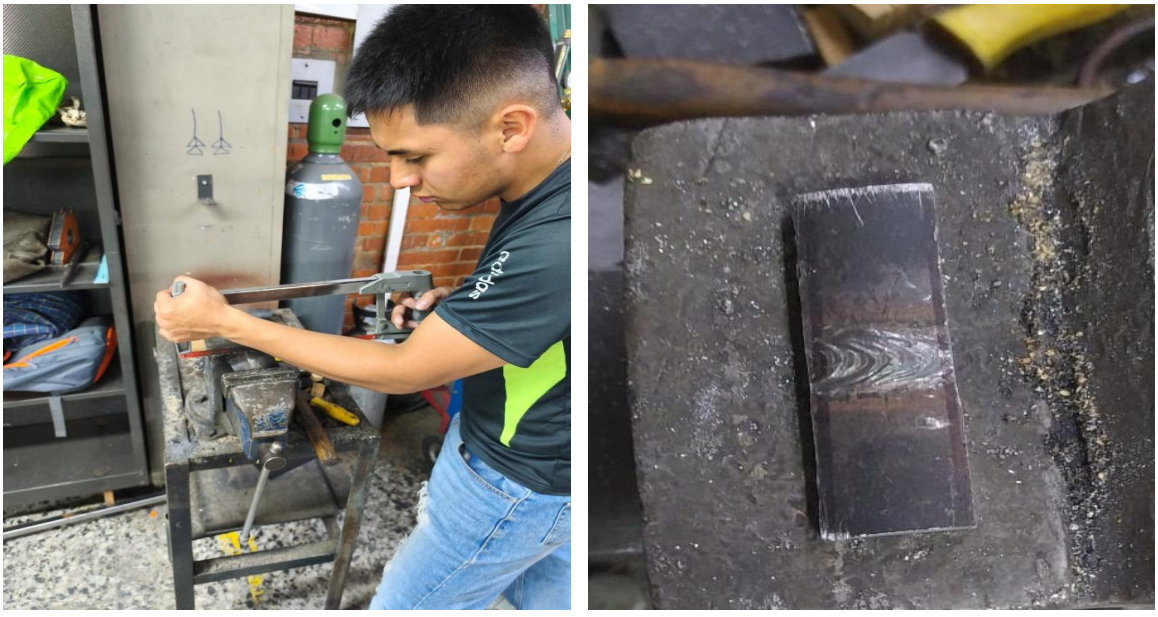


Fuente: Propia.

8.6. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para el corte de las muestras se utilizó una segueta para evitar afectaciones en la zona del cordón o el material base por las altas temperaturas generadas por la pulidora o cualquier otra máquina de corte.

Figura 35. Corte de muestras del cordón de soldadura.



Fuente: Propia.

8.6.1. Preparación de entorno salino

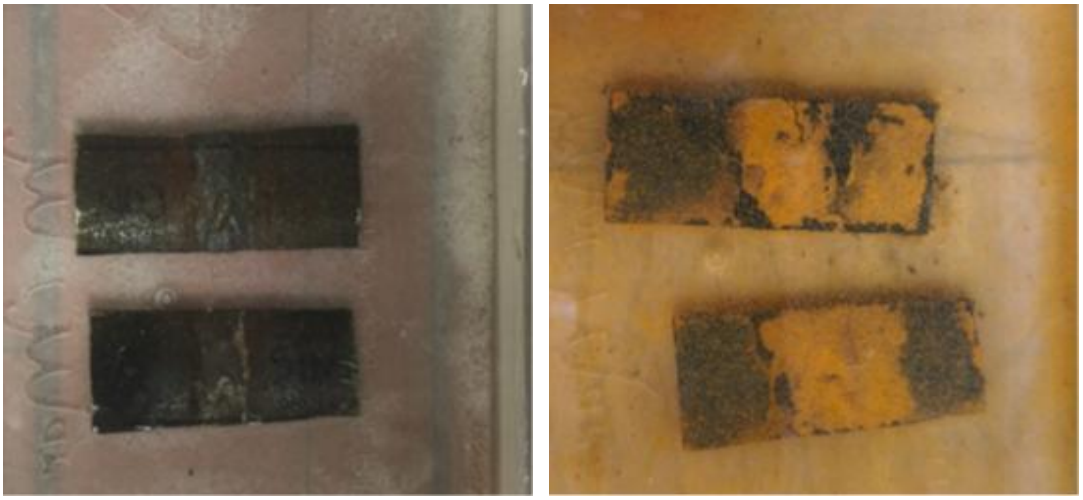
Para este procedimiento se utilizaron 50 gr de sal, los cuales fueron disueltos en 1000 ml de agua destilada, agitando inicialmente hasta lograr una disolución. Posteriormente, la solución se dejó en reposo y, a continuación, se agregaron las probetas, las cuales permanecieron sumergidas durante un periodo de un mes dentro de dicha mezcla. El procedimiento se desarrolló conforme a la norma ASTM G31(ASTM International, 2021), la cual establece que, para realizar un proceso de corrosión ligeramente acelerado, puede emplearse una solución al 5% de concentración, permitiendo simular de manera controlada las condiciones marinas.

Figura 36. Preparación entorno salino según norma ASTM G31.



Fuente: Propia.

Figura 37. Corte de muestras del cordón de soldadura.



Fuente: Propia.

Las probetas soldadas fueron completamente sumergidas en el medio de ensayo durante un período continuo de **30 días** (**13 noviembre de 2025 hasta el 12 de diciembre de 2025**), manteniendo condiciones constantes de exposición. Finalizado el tiempo de inmersión, las muestras fueron retiradas de la solución, sometidas a un proceso de limpieza y preparadas para su posterior evaluación de ensayos y análisis metalográfico.

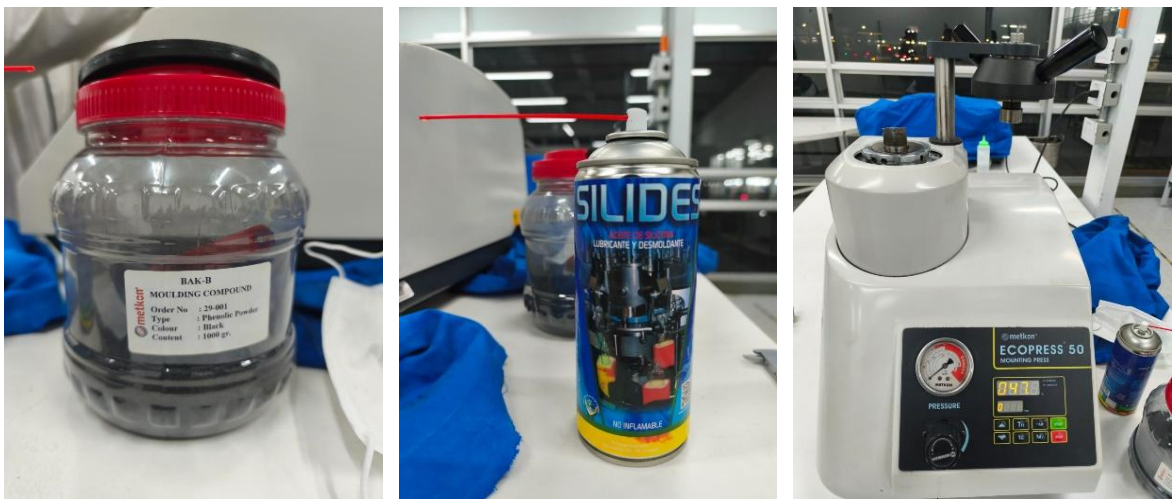
8.6.2. Preparación metalográfica de las probetas

La preparación metalográfica de las probetas para el análisis microestructural consta de una serie de pasos rigurosamente encadenados para poder obtener resultados precisos y confiables, debido a que una mala preparación puede acarrear desenfoque del microscopio por falla en la planitud de la muestra, o mala interpretación de resultados por rayaduras y mal lijado de la muestra.

8.6.3. Encapsulado de muestras

En esta fase se llevó a cabo el encapsulado de la muestra mediante la encapsuladora metalográfica **ECOPRESS 50**. Para este proceso se utilizó baquelita negra, una resina termo endurecible, junto con un lubricante, con el fin de evitar que la cápsula quede adherida al equipo durante el procedimiento. En la figura 38 Se muestran los elementos empleados para el proceso de encapsulado.

Figura 38. Encapsulado de muestras del cordón de soldadura.

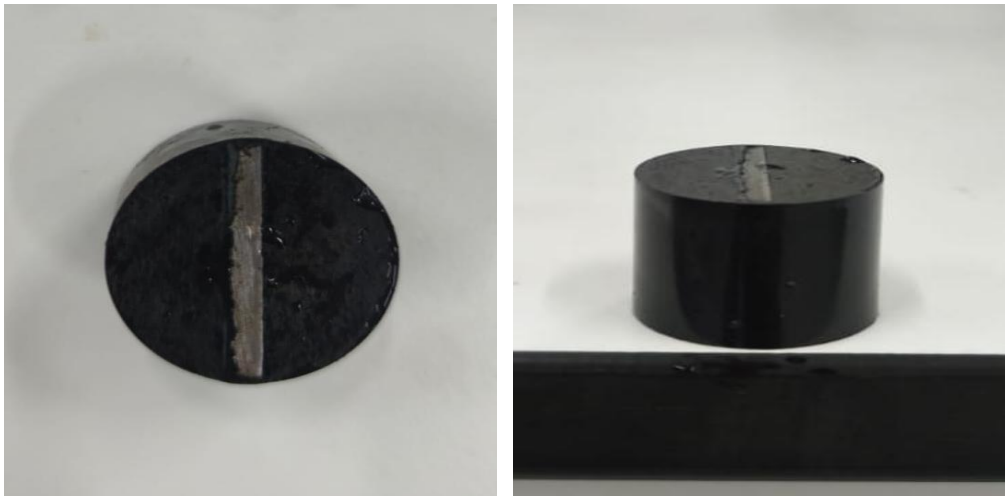


Fuente: Propia.

8.6.4. Lijado de muestras

Para el lijado de las probetas se utilizó el banco de lijado, utilizando lijas de 80, 120, 220, 350, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 y 2500. En cada lija la probeta se giraba a 90 grados (2 veces por cara), a medida que en la superficie se lograra observar líneas completamente homogéneas (**ver figura 39**). Las cápsulas se marcaron de tal forma que se lograra identificar.

Figura 39. Lijado y preparación de las probetas.



Fuente: Propia.

8.6.5. Pulido metalográfico de muestras con paño

Se procedió al pulido de las muestras utilizando el equipo Forcipol 2V Grinder Polisher (**ver figura 40**), adicionando constantemente una pequeña cantidad de alúmina de 0.05μm (**ver figura 41**), hasta obtener un acabado tipo espejo en cada probeta. Para lograr este resultado, las probetas se pasaron en repetidas ocasiones por la pulidora metalográfica, verificando visualmente la uniformidad del acabado (**ver figura 42**). Durante el proceso de pulido, cada probeta fue limpiada periódicamente con paño suave, lo que permitió inspeccionar el avance del procedimiento y asegurar la calidad del acabado superficial. Para finalizar el proceso y lograr un acabado de brillo espejo completo, se utilizó brilla metal, el cual fue aplicado directamente sobre la superficie de la probeta. Posteriormente, se frotó suavemente con un paño limpio y suave hasta obtener el acabado superficial deseado.

Figura 40. Pulidora Forcipol 2V Grinder – Polisher.



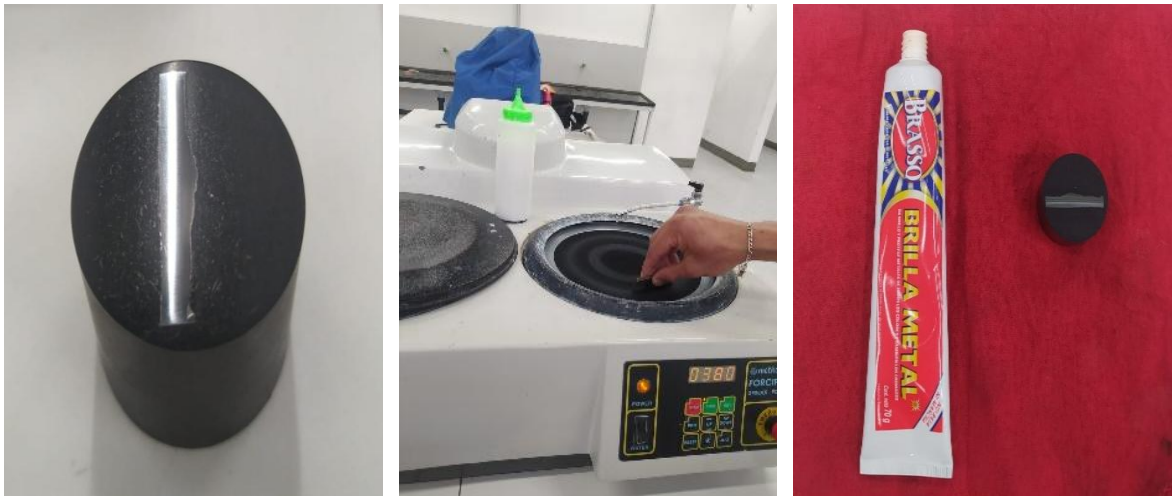
Fuente: Propia.

Figura 41. Alúmina para preparación.



Fuente: Propia.

Figura 42. Proceso de pulido metalográfico de las probetas.



Fuente: Propia.

8.6.6. Ataque químico

Antes de la exposición de las probetas en el microscopio óptico es necesario una vez finalizada la preparación metalográfica, realizar un ataque químico utilizando un reactivo que permita una mejor visibilidad de la microestructura del material en el microscopio. La selección del reactivo adecuado según el tipo de material en el microscopio.

La selección del reactivo adecuado según el tipo de material que se tiene se determinó mediante el reporte técnico de la ISO/TR 16060, “Ensayos destructivos de soldaduras de materiales metálicos. Reactivos para el examen macroscópico y microscópico”, el cual da una guía de los reactivos que se pueden aplicar teniendo en cuenta la norma ISO 17639 (International Organization for Standardization, 2022); ya que estos varían dependiendo el tipo de examen a realizar a la soldadura, esta norma aplica para diferentes composiciones de materiales metálicos como aceros al carbono y aceros de baja aleación, aceros inoxidables, níquel y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, aluminio y sus aleaciones.

Para cada uno de esos grupos metálicos, el documento muestra el tipo de porcentaje de las sustancias a mezclar según sea el caso. El metal de estudio en este documento es un acero ASTM A106 Grado B, siendo un acero al carbono, y con la composición química que se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Composición química del ASTM A106 Grado B.

Chemical Composition			
Grade	Grade A	Grade B	Grade C
	%		
Carbon (C) Mx.	0.25	0.30	0.35
Manganese (Mn)	0.27-0.93	0.29-1.06	0.29-1.06
Phosphorus (P) Mx.	0.035	0.035	0.035
Sulfur (S) Mx.	0.035	0.035	0.035
Silicon (Si) Mx.	0.10	0.10	0.10
Chromium (Cr) Mx.	0.40	0.40	0.40
Copper (Cu) Mx.	0.40	0.40	0.40
Molybdenum (Mo) Mx.	0.15	0.15	0.15
Nickel (Ni) Mx.	0.40	0.40	0.40
Vandadium (V) Mx.	0.08	0.08	0.08

Fuente: https://www.united-steel.com/es/newsshow/Especificaci%C3%B3n-de-los-tubos-ASTM-A106-Grado-B.

Teniendo en cuenta la información anterior se procede a seleccionar el reactivo a preparar para el ataque químico de las probetas, por lo que se selecciona el anexo A que corresponde a ataques para aceros al carbón y aceros de baja aleación, este anexo muestra la concentración de la mezcla para la preparación del nital según el tipo de acabado superficial obtenido en la probeta, para una superficie fina o con un tamaño de grano de 600, la ISO/TR 16060 sugiere una concentración de nital al 5% para observación de la macroestructura del material. Por otro lado, cuando la superficie de la probeta tiene un acabado tipo diamante o fino la norma técnica sugiere una concentración de nital al 2% para lograr una visualización de la microestructura del material.

Tabla 12. Reactivos para ensayo microscópico.

Type of etchant: Macroscopic and microscopic etchant
Composition in volume and in order of mixing: 99 ml to 95 ml industrial methylated spirits* 1 ml to 5 ml nitric acid (HNO_3) *Ethyl alcohol (C_2H_5OH), denatured with methyl alcohol (CH_3OH) Also methyl alcohol or isoamyl alcohol [$(CH_3)_2CH(CH_2)_2OH$]
Safe shelf life: Indefinite
Surface preparation: 600 grit or finer (macroetching ≈ 5 % of nitric acid) 3 µm diamond or finer (microetching ≈ 2 % of nitric acid)
Etching temperature: Ambient
Etching time: A few seconds — check by eye
Additional precautions/requirements: Usual precautions for handling and disposal of acids.
Comments: Can increase strength to 15 % for macroetching on ground surface — reveals ferrite boundaries — differentiates ferrite from martensite. Good general purpose etchant. Amyl alcohol is preferable for galvanized steel.

Fuente: ISO/TR 16060 "Ensayos destructivos de soldaduras de materiales metálicos. Reactivos para el examen macroscópico y microscópico".

Las probetas para analizar se prepararon metalográficamente con un acabado superficial brillo espejo por lo que se selecciona la opción de nital al 5%, se procede a preparar el reactivo en el laboratorio de química de la Universidad Distrital. En la figura 43 se observan los elementos que se utilizaron en la preparación del reactivo.

Figura 43. Elementos para la preparación del reactivo nital al 5%.



Fuente: Propia.

8.7. MACROSCOPIA

Se realiza una inspección a nivel macroestructural de las muestras para poder identificar las diferentes zonas que se generan al aplicar el cordón de soldadura, se utiliza el estereoscopio Discovery V8 de la Universidad Distrital (**ver figura 44**).

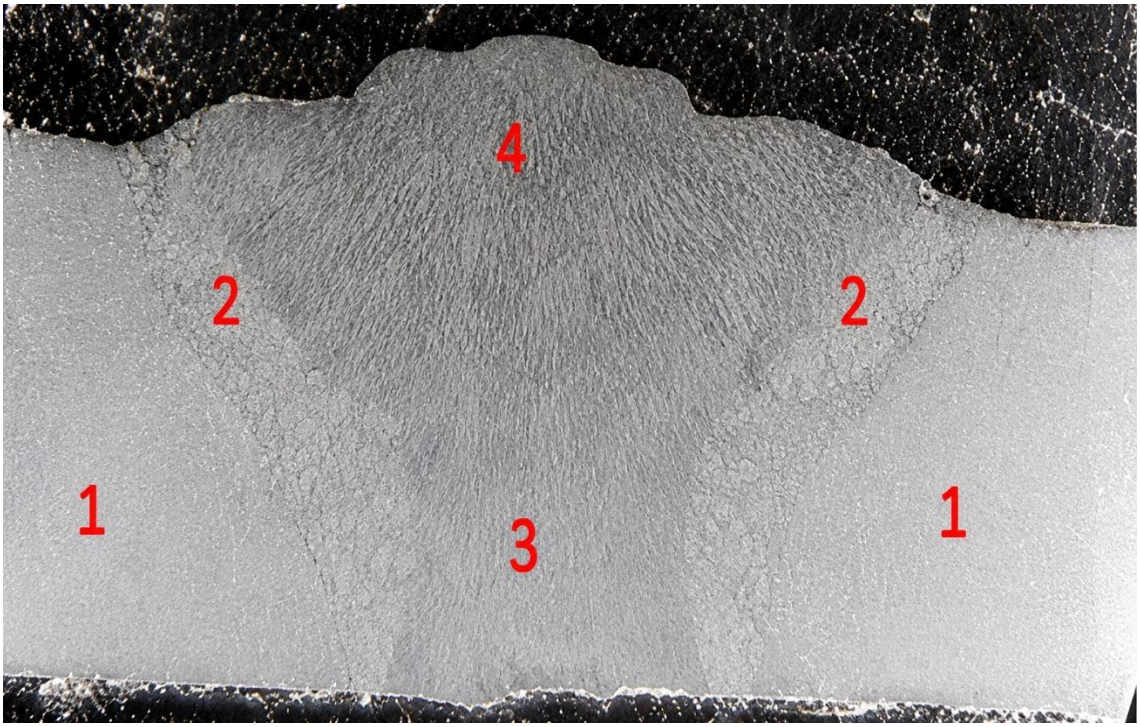
Figura 44. Estereoscopio Discovery V8 de la Facultad Tecnológica, Universidad Distrital.



Fuente: Propia.

La figura 45 se obtuvo mediante el estereoscopio en el cual se logra definir cuatro zonas: la zona inferior denominada 3 que corresponde a la soldadura de penetración con el electrodo E-6010; la zona denominada 4 que corresponde a la soldadura de presentación con el electrodo E-7018; la zona que fue afectada por el calor (HAZ, zona 2) y a los extremos de la probeta se tiene el material base sin ninguna alteración en su microestructura la cual mantiene las propiedades base del material (zona 1). Cabe resaltar que el WPS define los dos materiales de aporte para la realización del cordón de soldadura.

Figura 45. Análisis macroestructural de la junta soldada.



Fuente: Propia.

8.7.1 Macrografía probeta sin cloruro

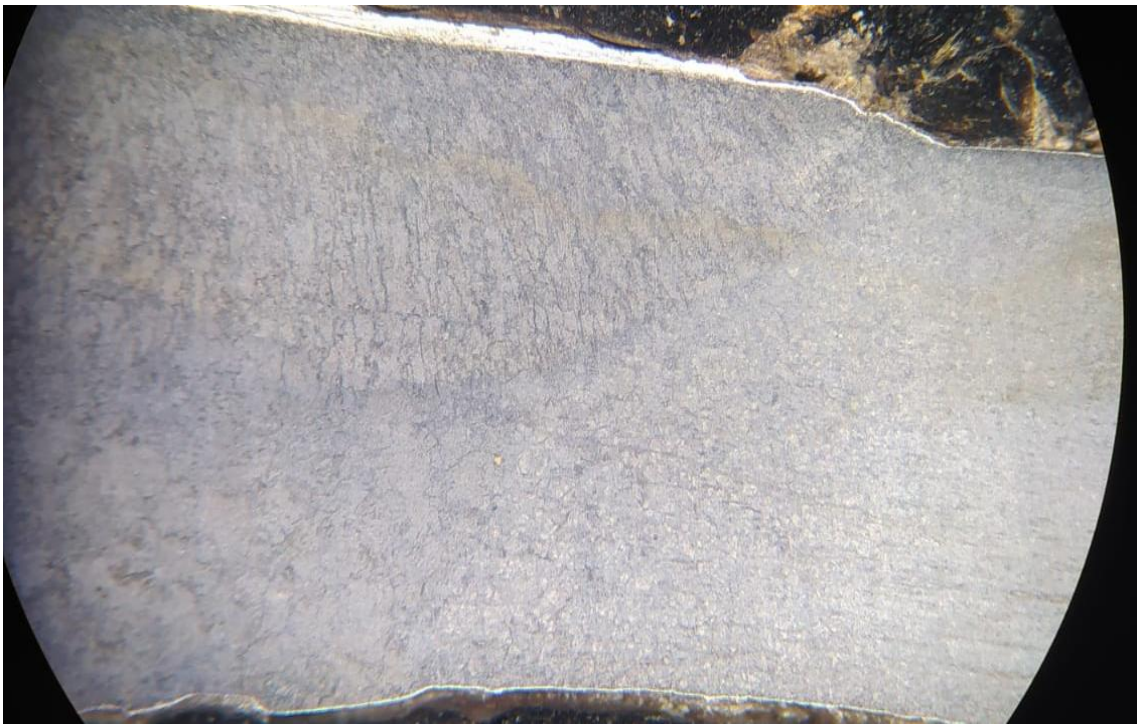
Se evalúa la parte morfológica y la geometría de la junta soldada en estado sano, con la caracterización secuencial sobre la sección transversal de la probeta sin exposición a cloruros. El análisis se realizó de forma sistemática bajo el estereoscopio óptico acoplado a sistema de captura digital, realizando barridos progresivos de los aumentos 10, 16, 25 y 40. Las escalas menores de 10 y 16 se establecieron para lograr una vista general de la junta, facilitando así la inspección del perfil de los pases de soldadura, la simetría del cordón y la geometría de la zona afectada por el calor (ZAT). Por otra parte, los aumentos de 25 y 40 ayudaron a examinar la interfaz de la línea de fusión y la raíz del cordón, descartando discontinuidades macroscópicas perjudiciales, como lo son la falta de penetración, algunas porosidades atrapadas y grietas. Con lo anterior se puede realizar una inspección visual frente a la estructura del material, previniendo cualquier fenómeno de deterioro que pudiese aparecer.

Figura 46. Macrografía probeta sin cloruros con 10 aumentos.



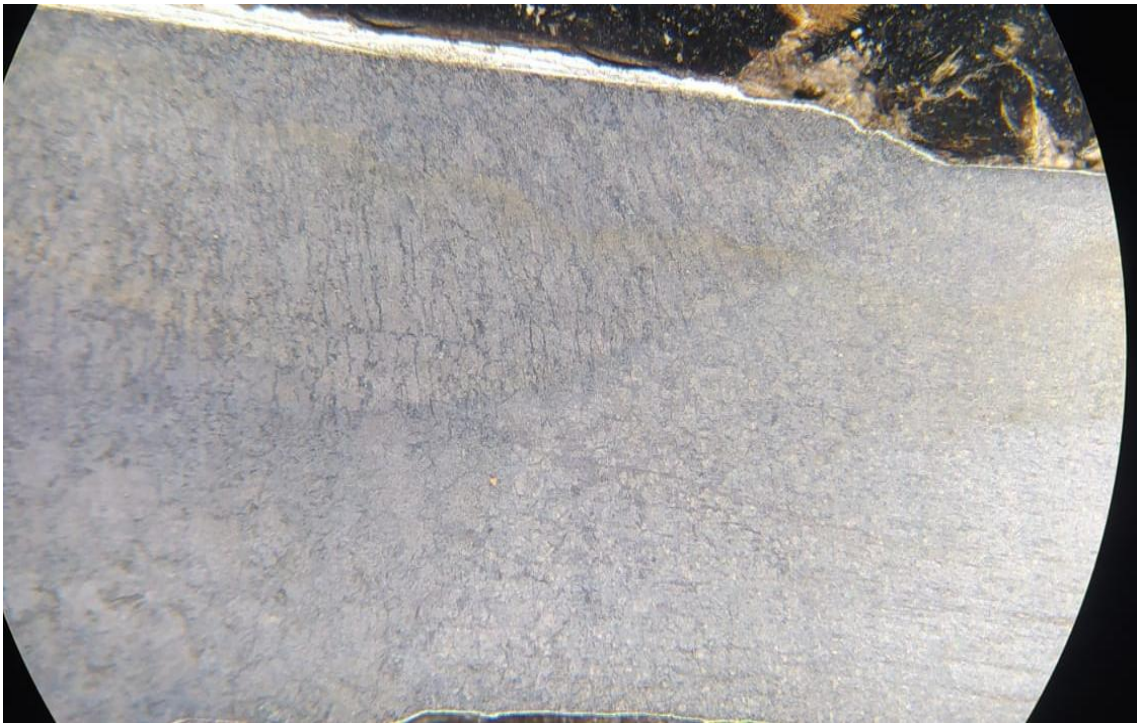
Fuente: Propia.

Figura 47. Macrografía probeta sin cloruros con 16 aumentos.



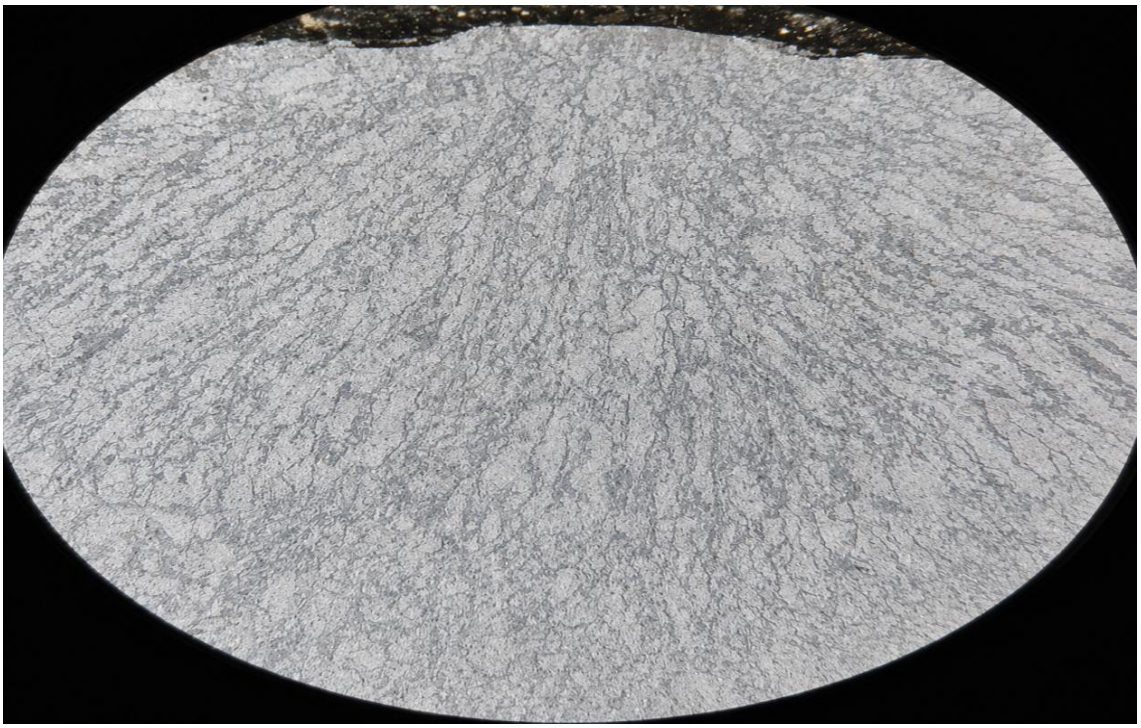
Fuente: Propia.

Figura 48. Macrografía probeta sin cloruros con 25 aumentos.



Fuente: Propia.

Figura 49. Macrografía probeta sin cloruros con 40 aumentos.

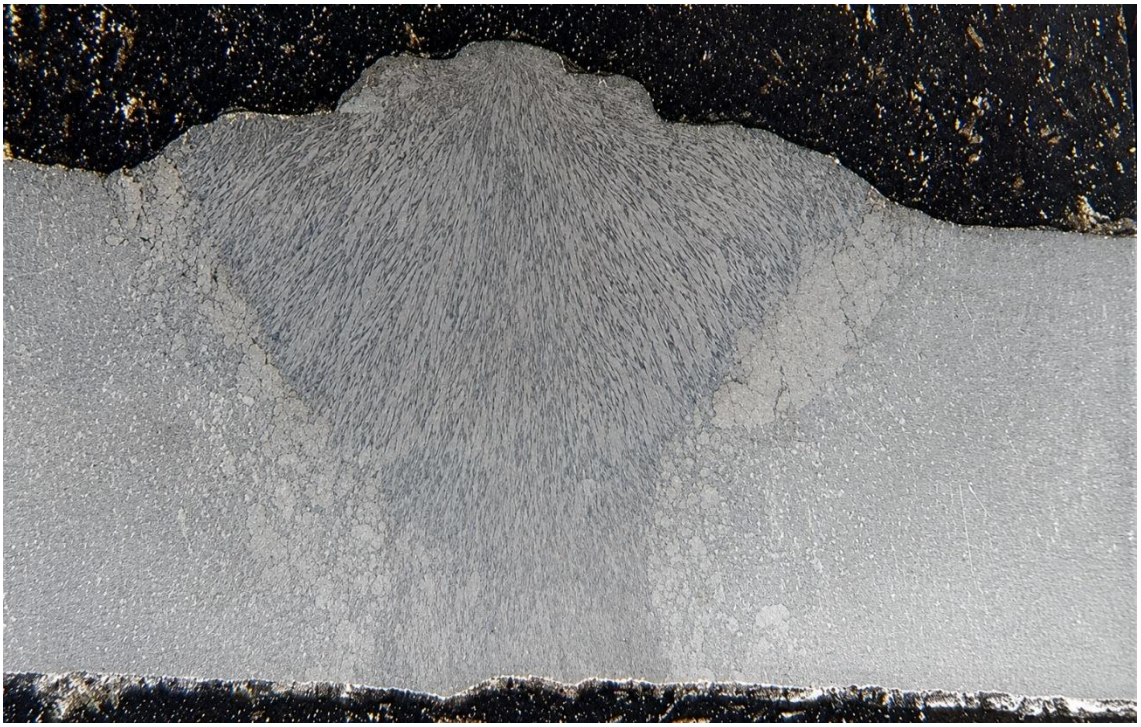


Fuente: Propia.

8.7.2 Macrografía probeta con cloruro

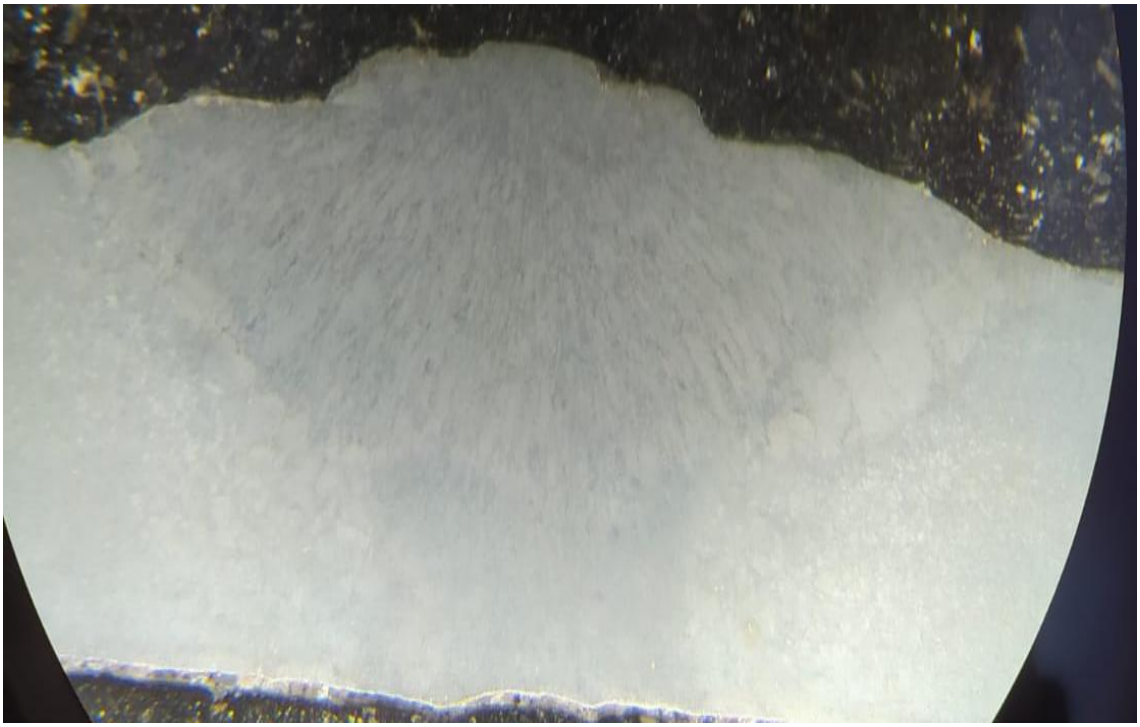
De igual forma, se realizó el mismo procedimiento de caracterización macrográfica secuencial sobre la sección transversal de la probeta expuesta a cloruros, con el objetivo de poder evaluar las alteraciones morfológicas superficiales e internas provocadas por la degradación química en el medio salino. El análisis se realizó con los mismos barridos progresivos de los aumentos 10, 16, 25 y 40. Todo lo anterior con el fin de examinar la severidad del avance de la corrosión, la presencia de picaduras y posibles micro agrietamientos localizados, permitiendo una comparación geométrica directa respecto a la muestra que no fue sometida a los cloruros.

Figura 50. Macrografía probeta con cloruros con 10 aumentos.



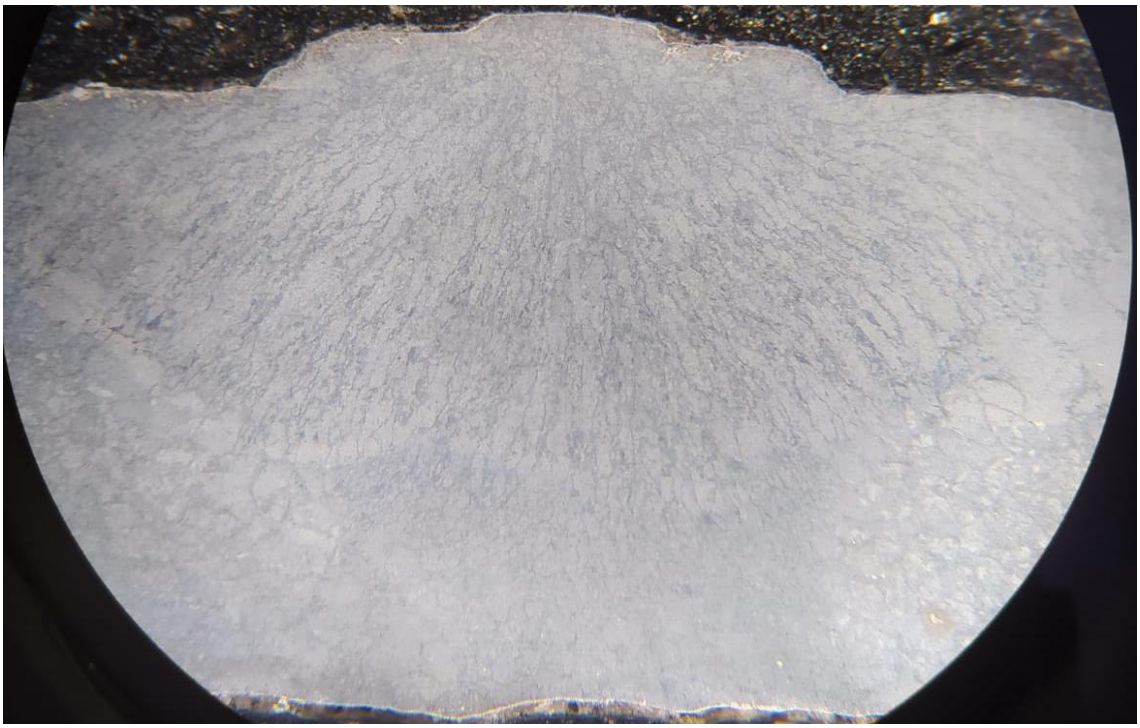
Fuente: Propia.

Figura 51. Macrografía probeta con cloruros con 16 aumentos.



Fuente: Propia.

Figura 52. Macrografía probeta con cloruros con 25 aumentos.



Fuente: Propia.

Figura 53. Macrografía probeta con cloruros con 40 aumentos.

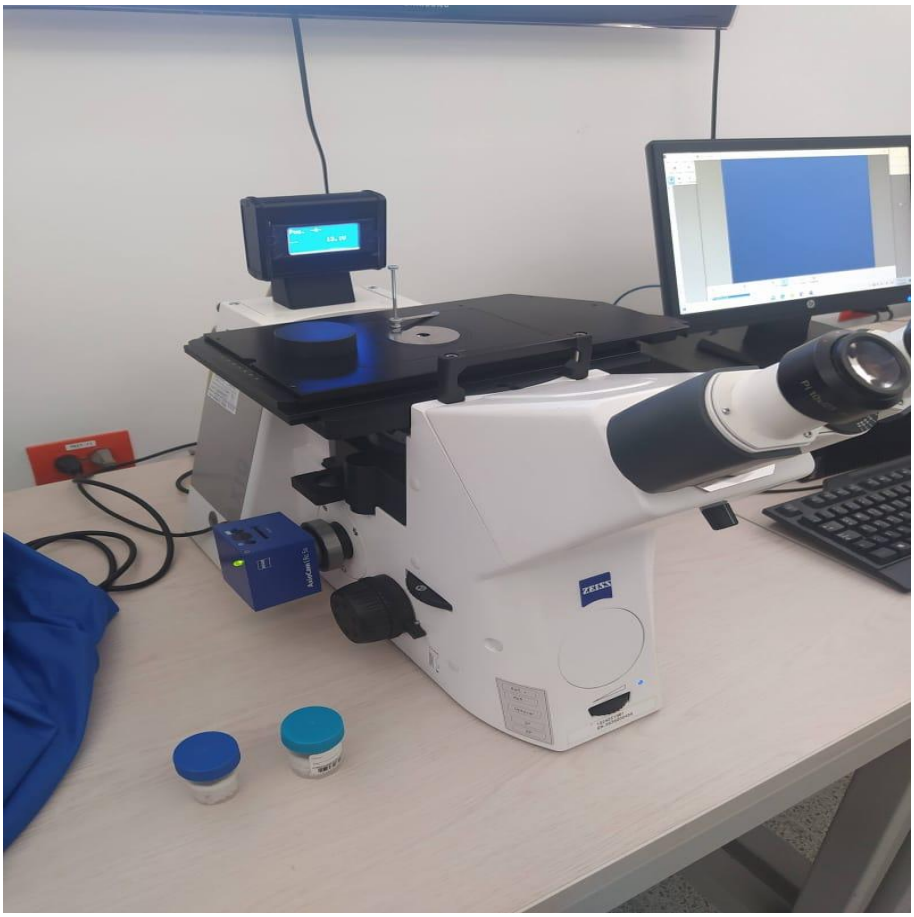


Fuente: Propia.

8.8. MICROSCOPÍA

Se procedió a pasar las muestras en el microscopio metalográfico Axi Observer D1m (**ver figura 54**) de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital, para poder obtener un análisis óptico superficial de las probetas de acero A106 Grado B y así visualizar los cambios microestructurales que tiene antes y después de la inmersión en la mezcla de cloruros el cual fue objeto de estudio en este documento. Este microscopio permite tener aumentos de 50 hasta 1000 y procesar las imágenes obtenidas mediante el software Axiovision, el cual es perfecto para el objeto de estudio. Para la toma de las fotos de la estructura de las probetas se usaron aumentos de 50, 100, 200, 500 y 1000 en las diferentes zonas que se definieron en la figura 45.

Figura 54. Microscopio metalográfico Axi Observer D1m, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital.



Fuente: Propia.

8.8.1. Micrografía probeta sin cloruros

Figura 55. Micrografía probeta sin cloruros 50 aumentos de la zona material base.



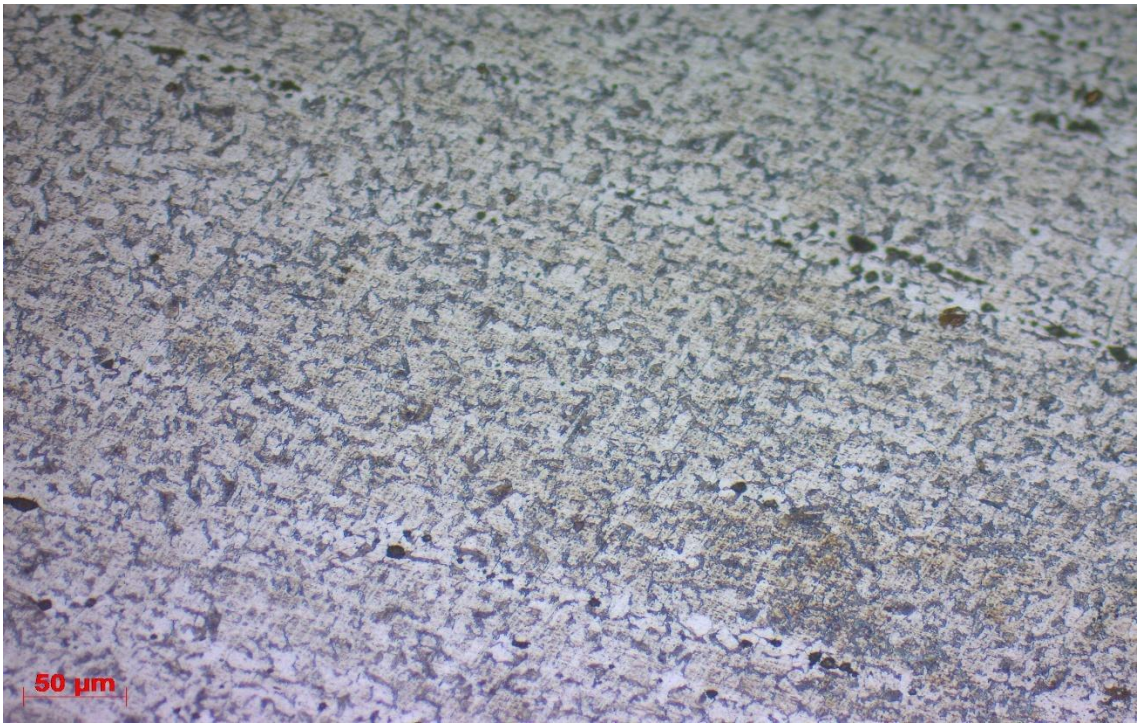
Fuente: Propia.

Figura 56. Micrografía probeta sin cloruros 100 aumentos de la zona material base.



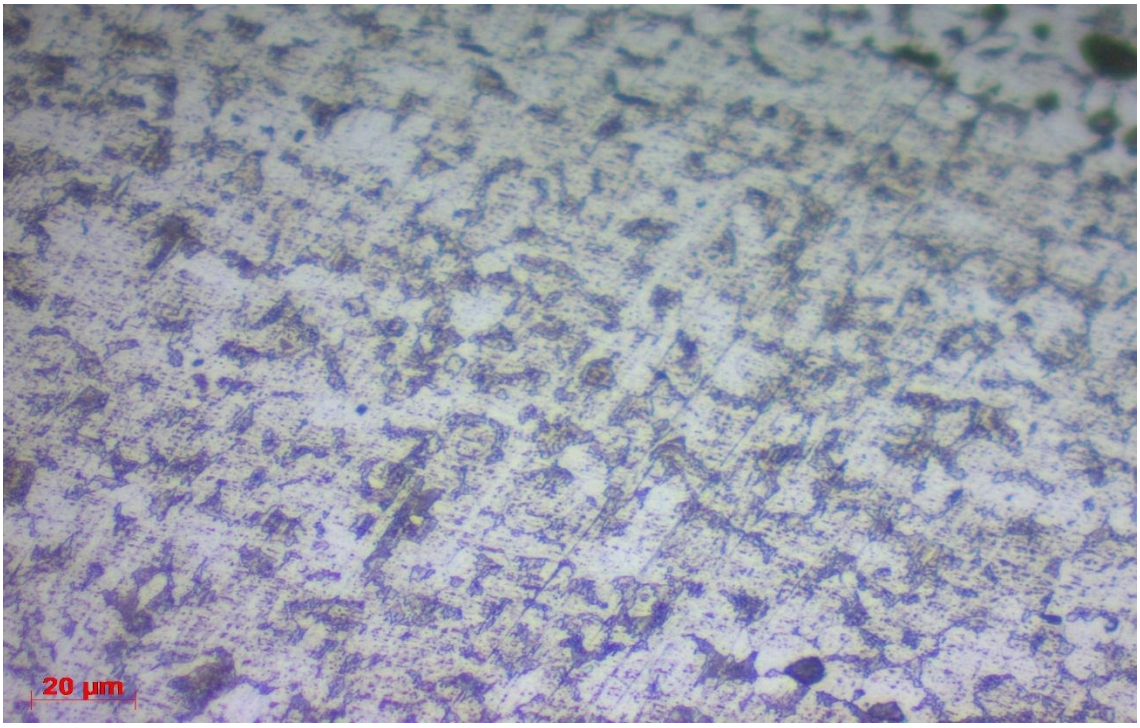
Fuente: Propia.

Figura 57. Micrografía probeta sin cloruros 200 aumentos de la zona material base.



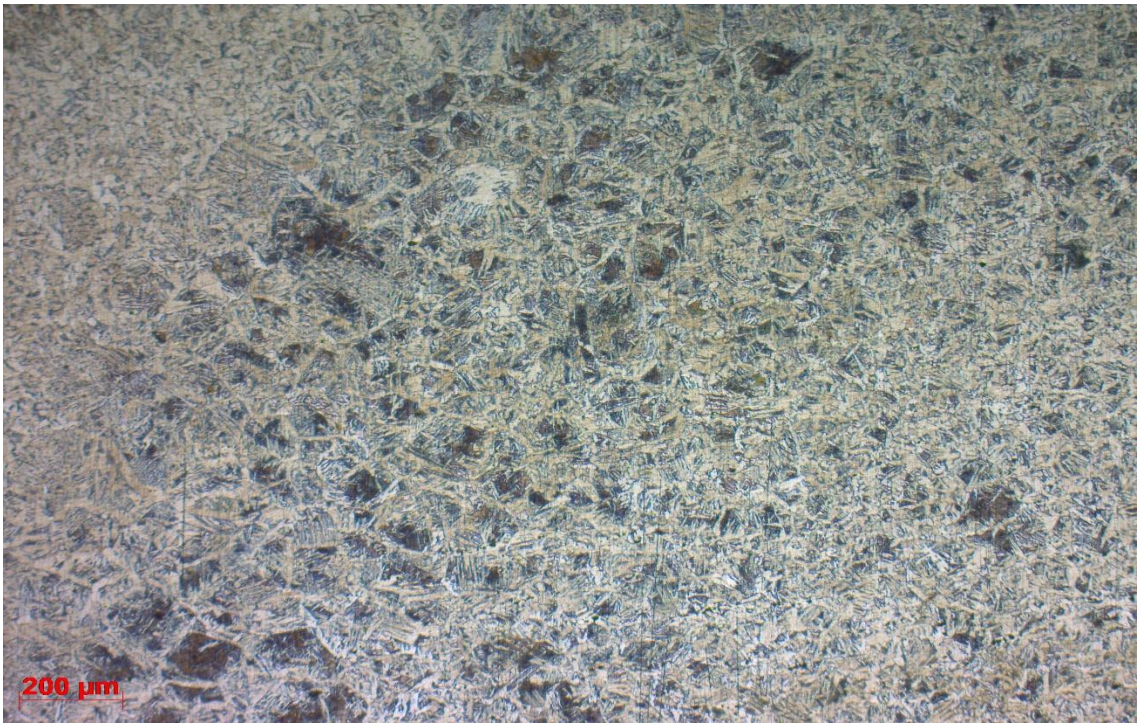
Fuente: Propia.

Figura 58. Micrografía probeta sin cloruros 500 aumentos de la zona material base.



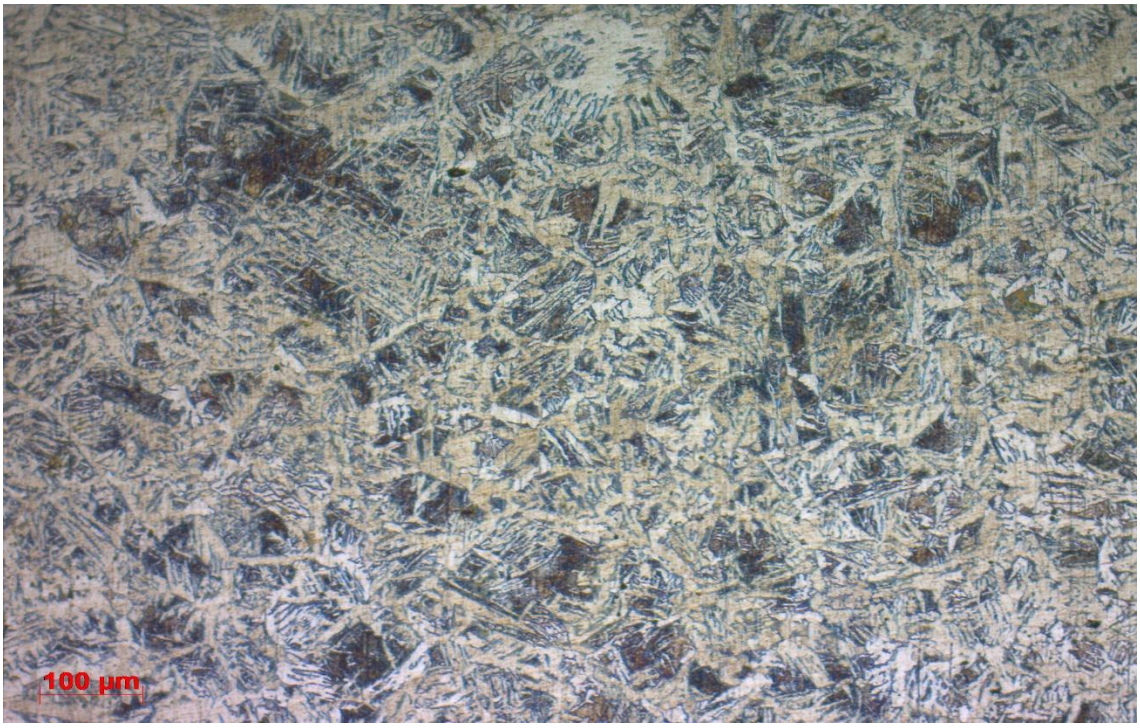
Fuente: Propia.

Figura 59. Micrografía probeta sin cloruros 50 aumentos de la zona afectada.



Fuente: Propia.

Figura 60. Micrografía probeta sin cloruros 100 aumentos de la zona afectada.



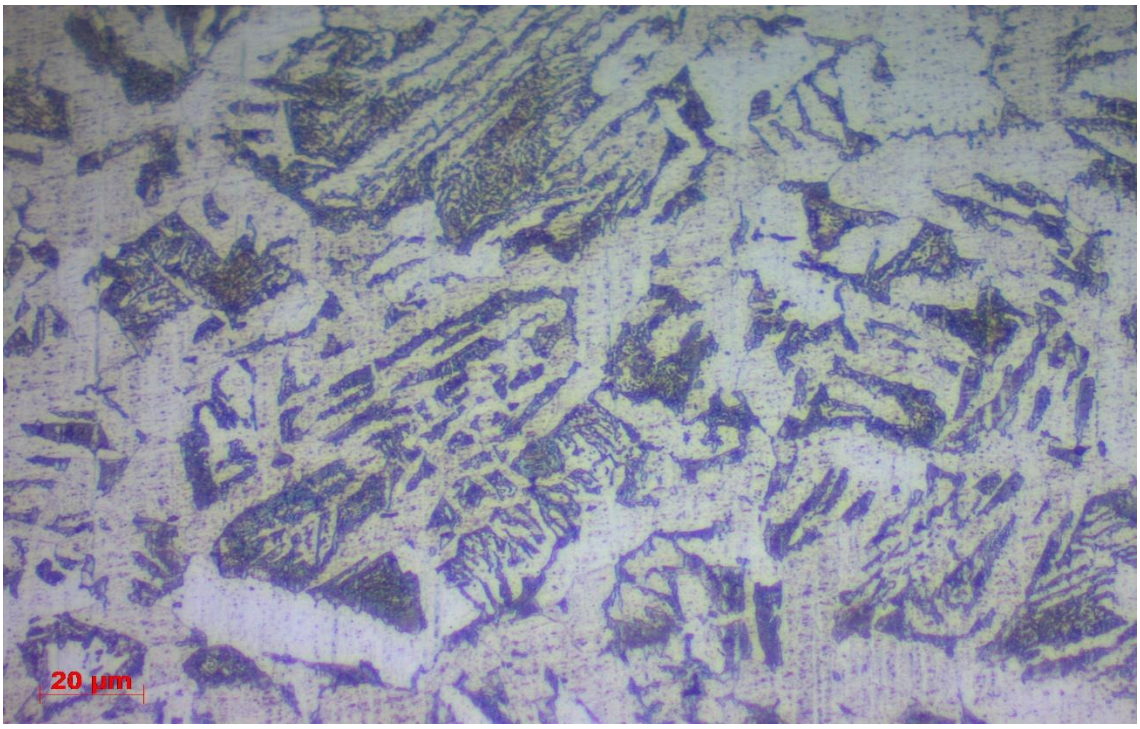
Fuente: Propia.

Figura 61. Micrografía probeta sin cloruros 200 aumentos de la zona afectada.



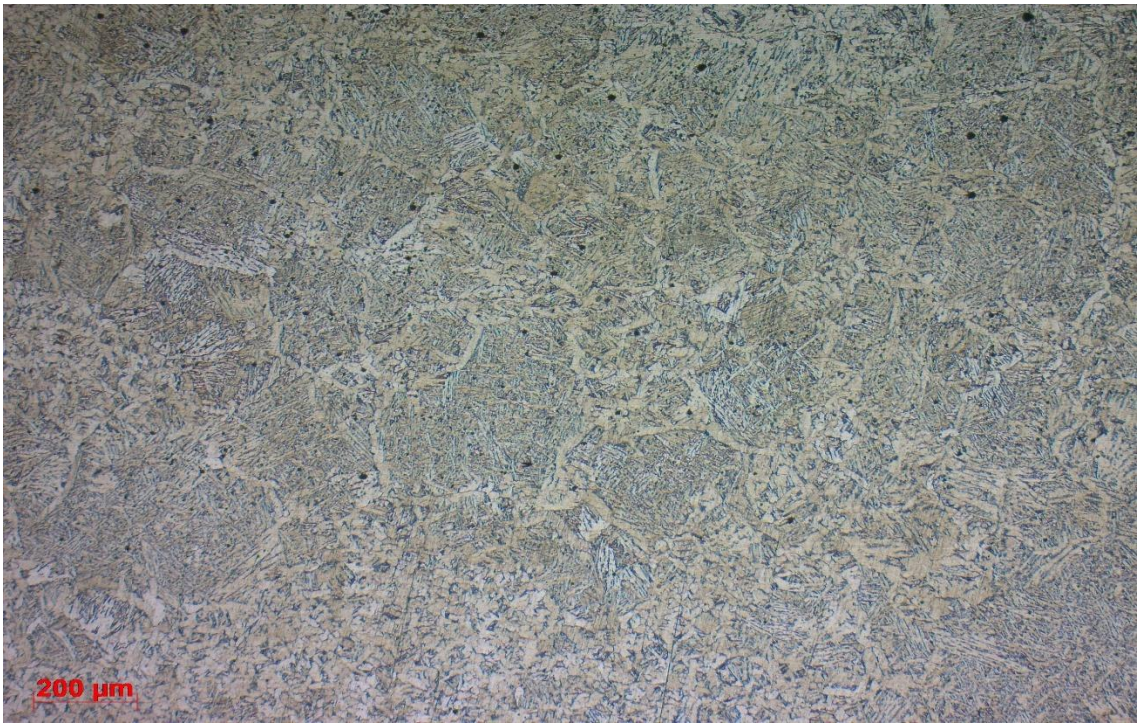
Fuente: Propia.

Figura 62. Micrografía probeta sin cloruros 500 aumentos de la zona afectada.



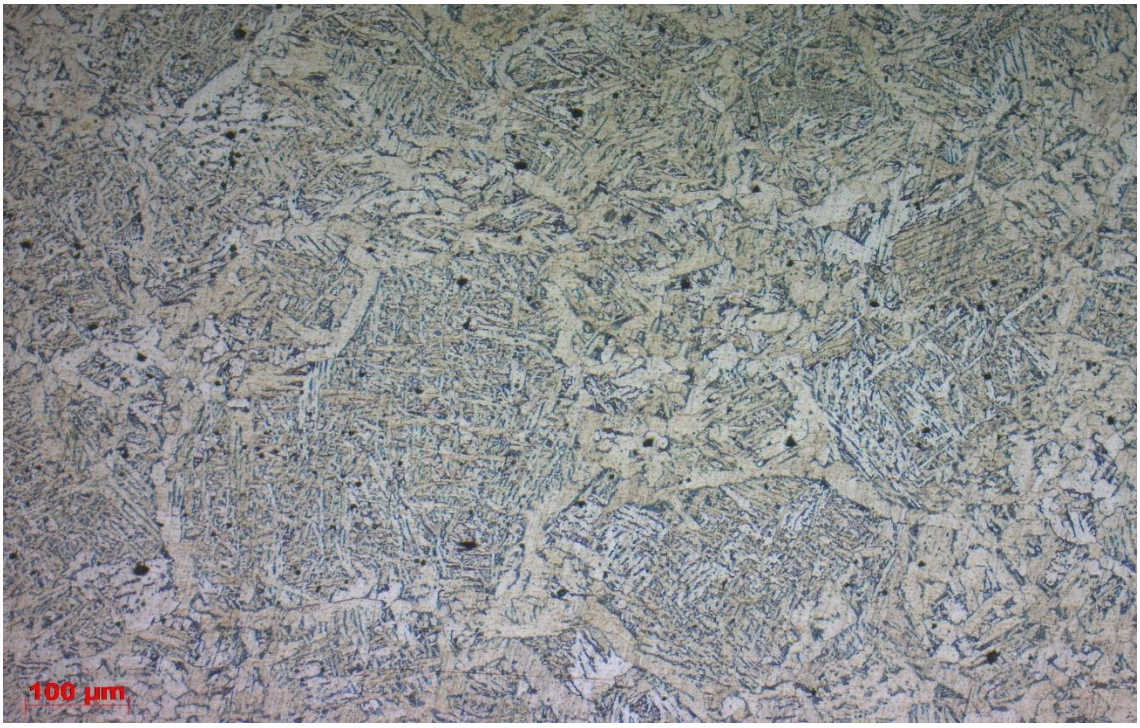
Fuente: Propia.

Figura 63. Micrografía probeta sin cloruros 50 aumentos zona del cordón.



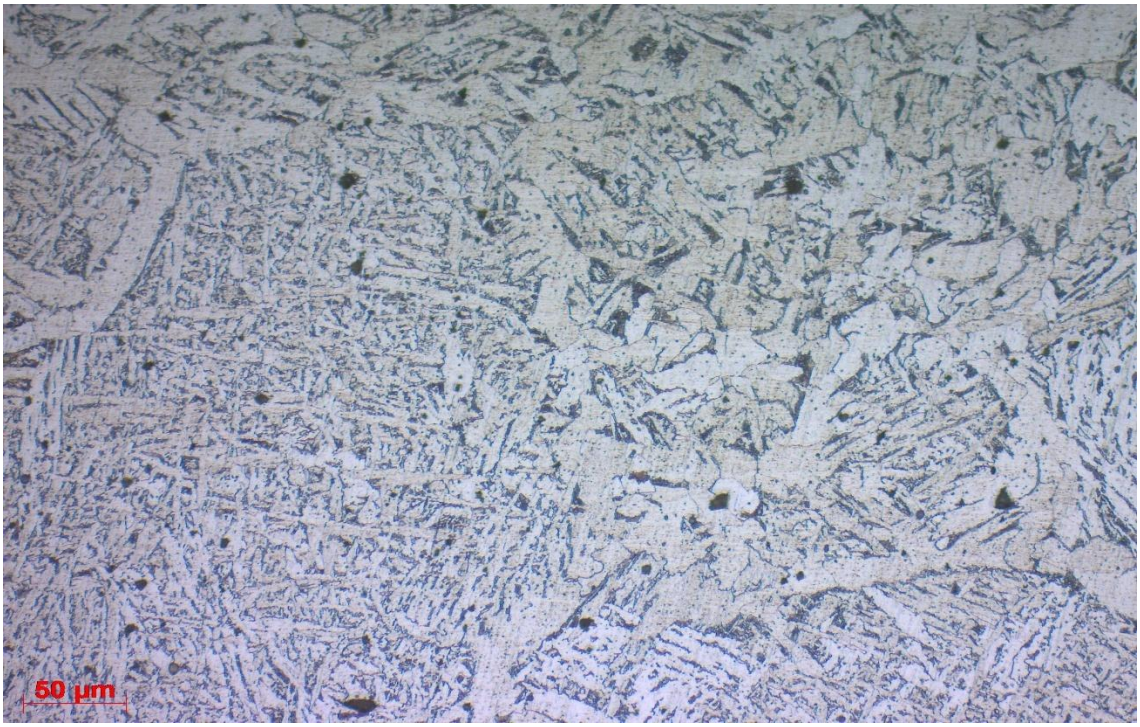
Fuente: Propia.

Figura 64. Micrografía probeta sin cloruros 100 aumentos zona del cordón.



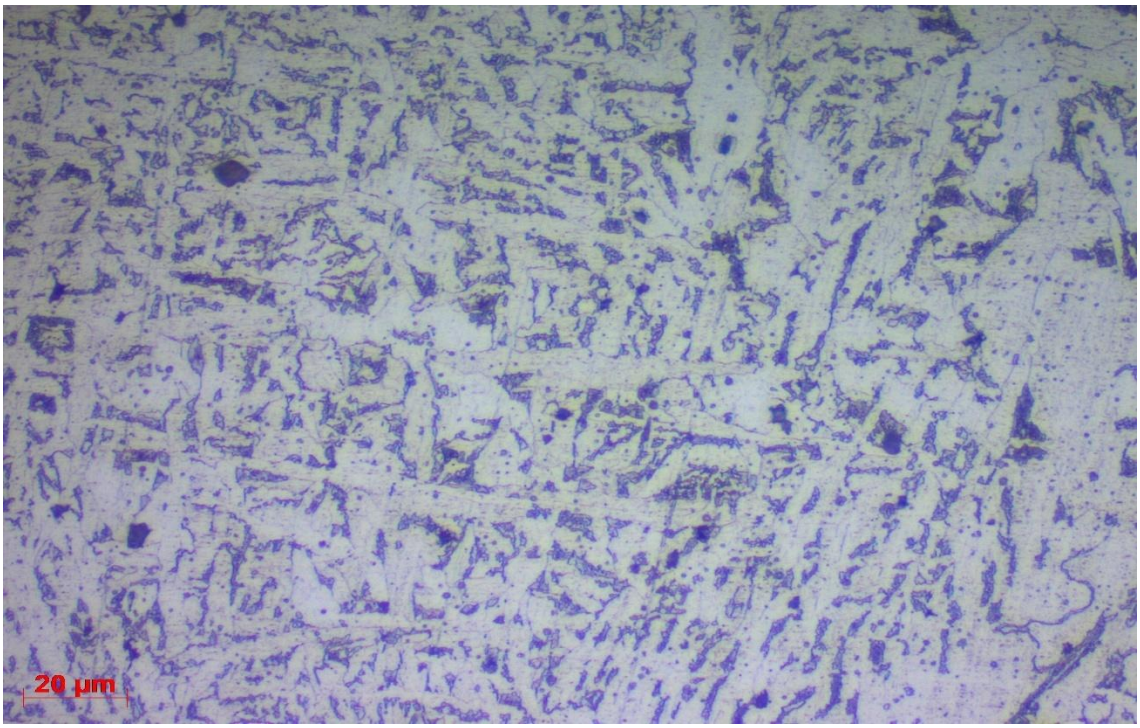
Fuente: Propia.

Figura 65. Micrografía probeta sin cloruros 200 aumentos zona del cordón.



Fuente: Propia.

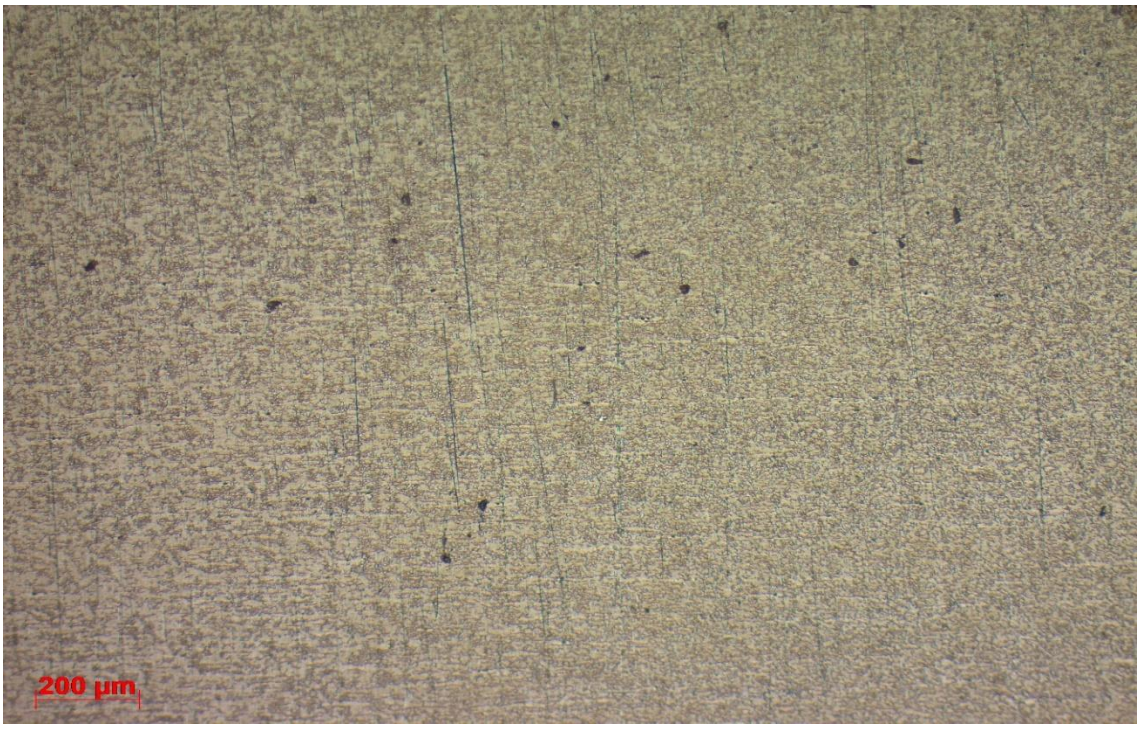
Figura 66. Micrografía probeta sin cloruros 500 aumentos zona del cordón.



Fuente: Propia.

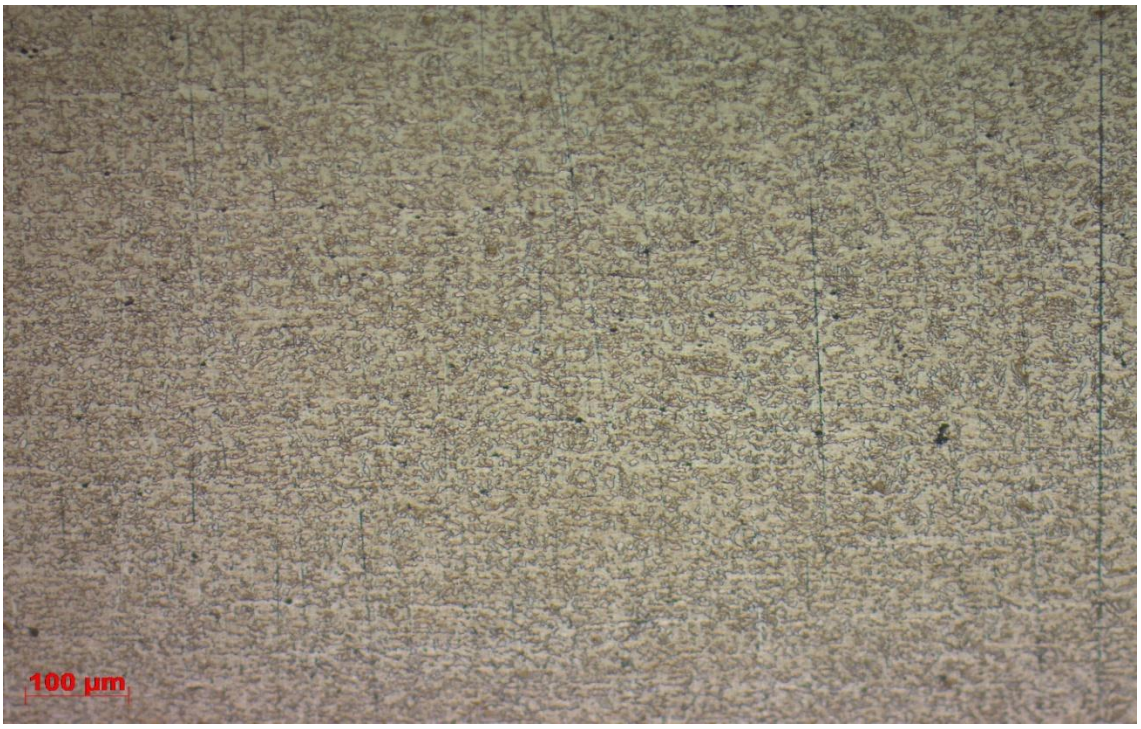
8.8.2. Micrografía probeta con cloruros

Figura 67. Micrografía probeta con cloruros 50 aumentos zona material base.



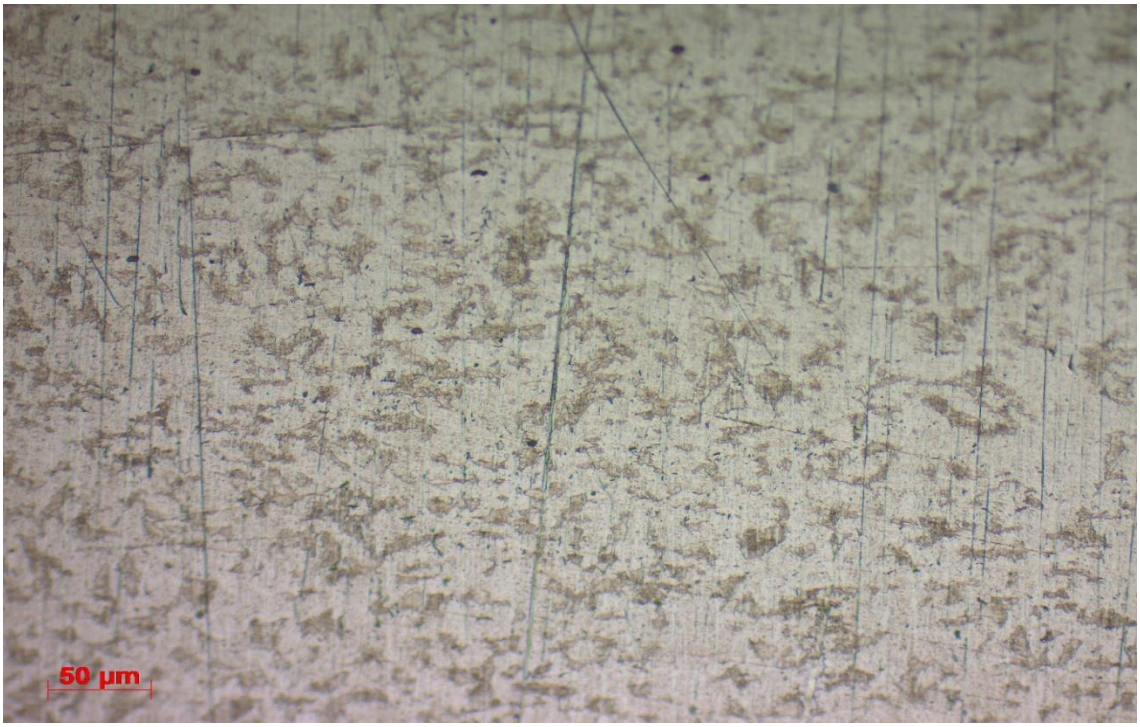
Fuente: Propia.

Figura 68. Micrografía probeta con cloruros 100 aumentos zona material base.



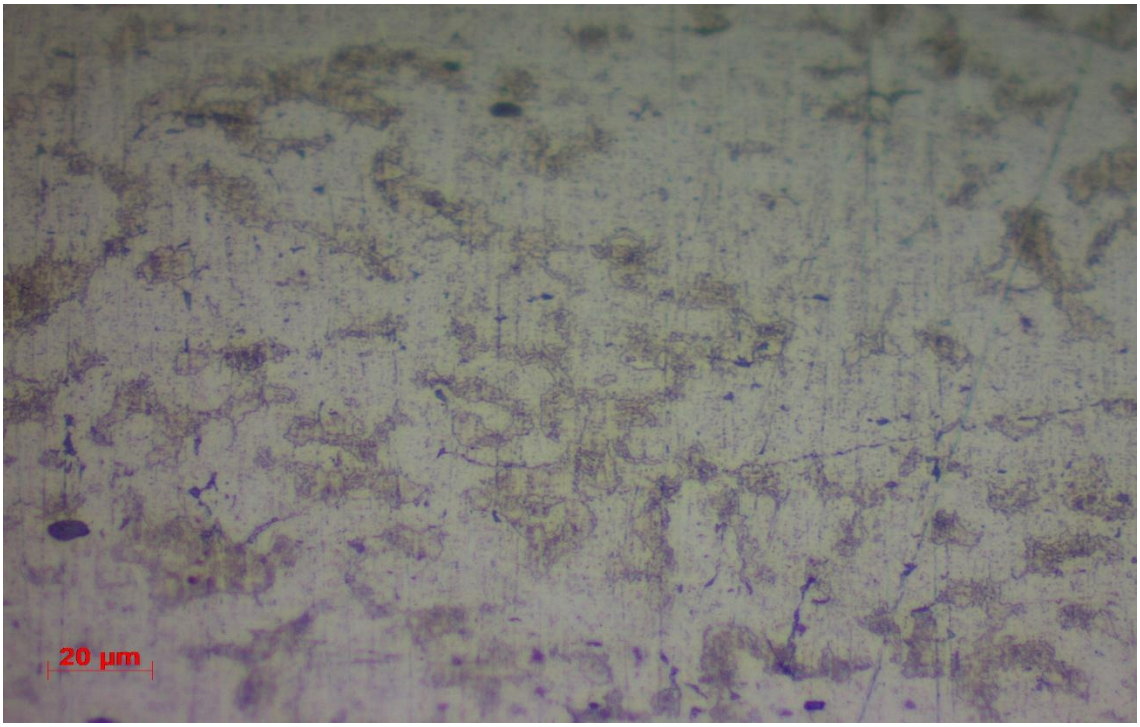
Fuente: Propia.

Figura 69. Micrografía probeta con cloruros 200 aumentos zona material base.



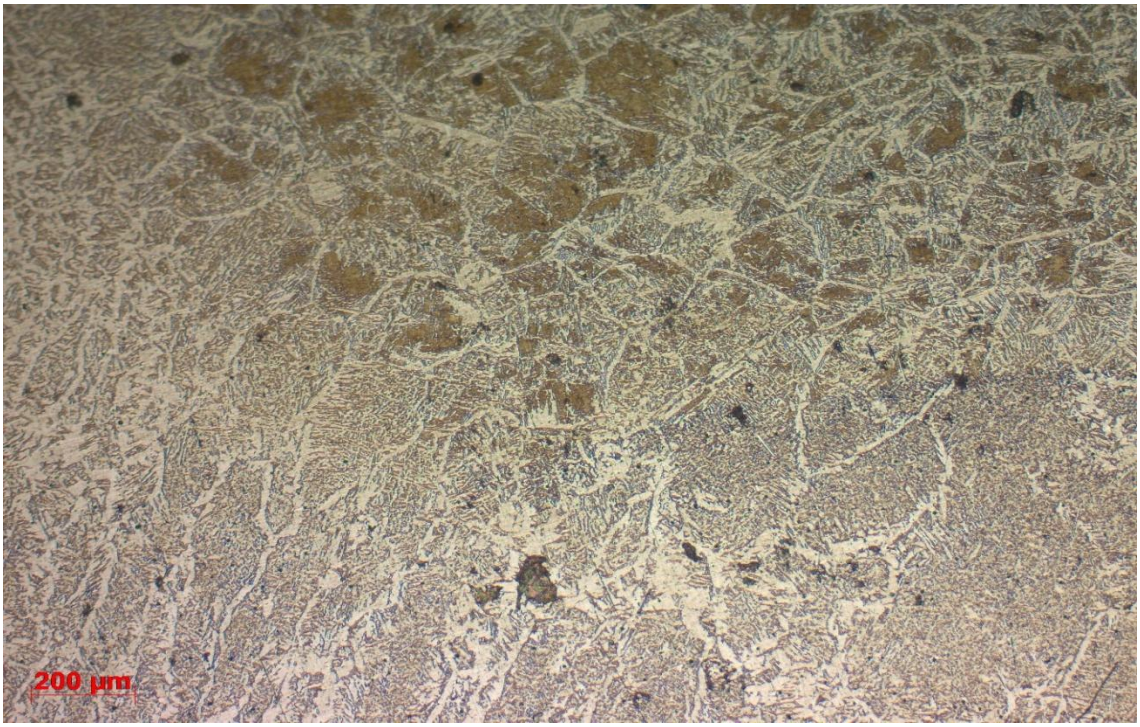
Fuente: Propia.

Figura 70. Micrografía probeta con cloruros 100 aumentos zona material base.



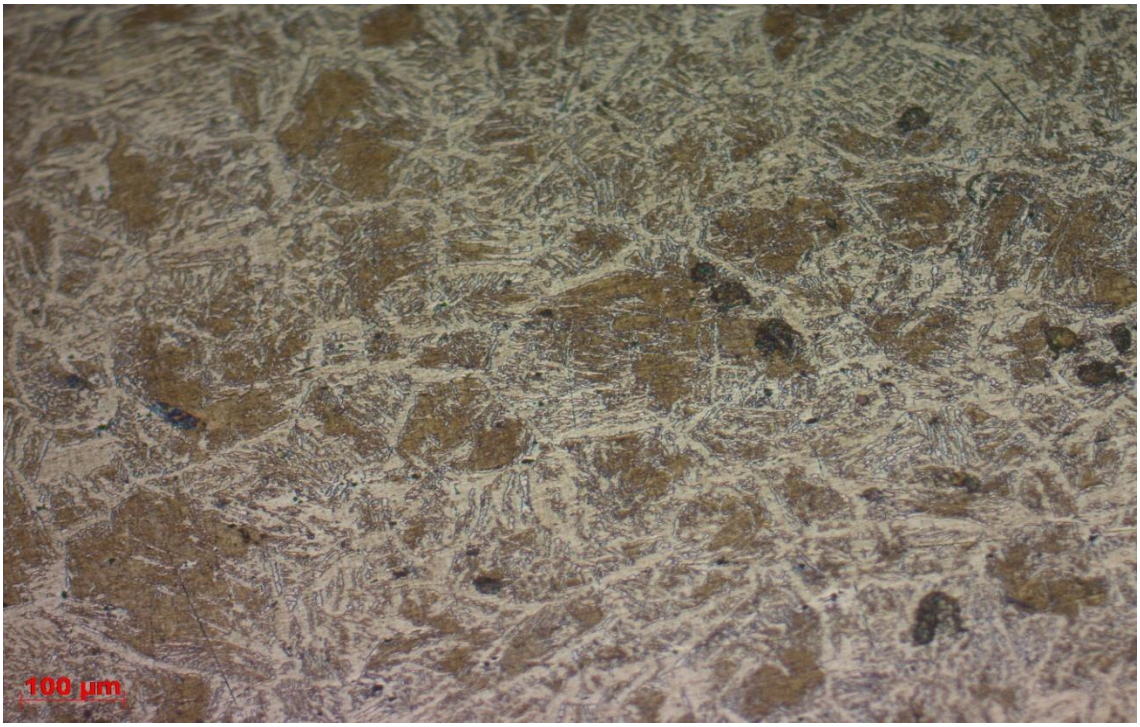
Fuente: Propia.

Figura 71. Micrografía probeta con cloruros 50 aumentos de la zona afectada.



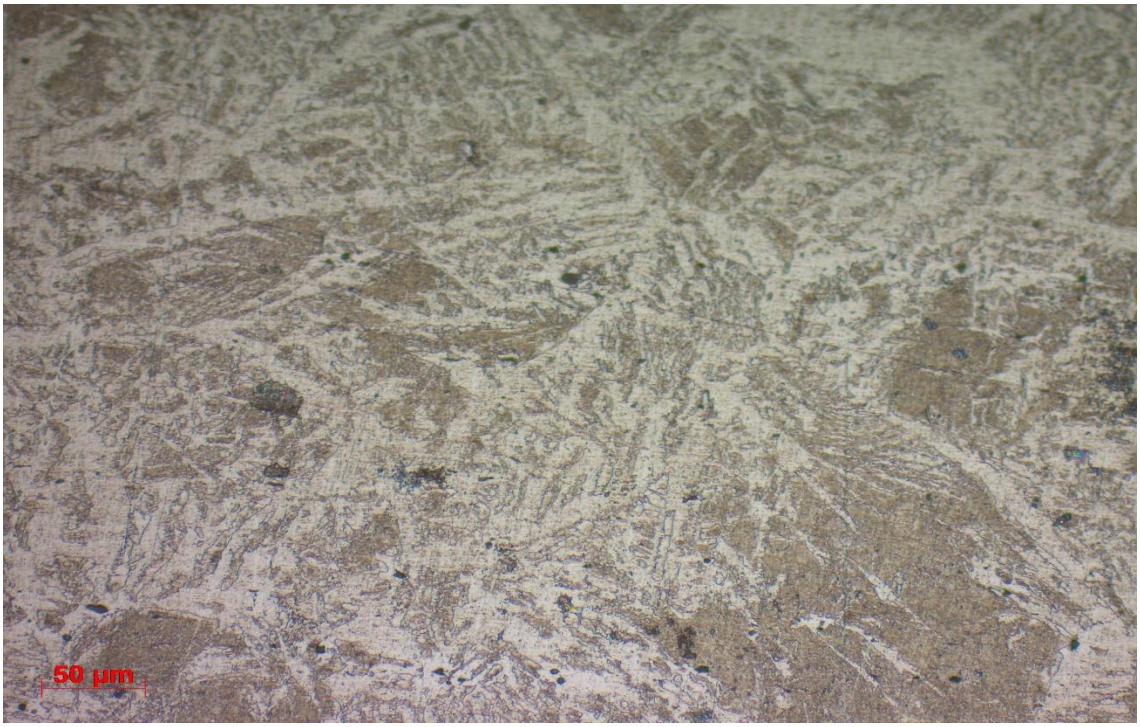
Fuente: Propia.

Figura 72. Micrografía probeta con cloruros 100 aumentos de la zona afectada.



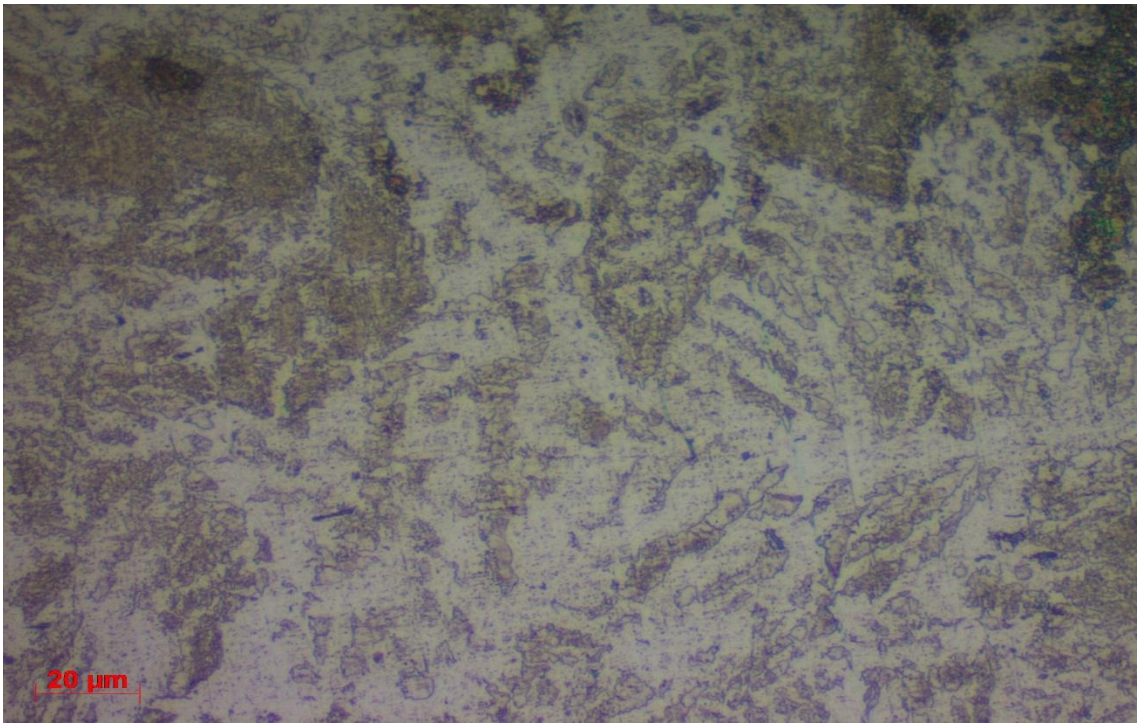
Fuente: Propia.

Figura 73. Micrografía probeta con cloruros 200 aumentos de la zona afectada.



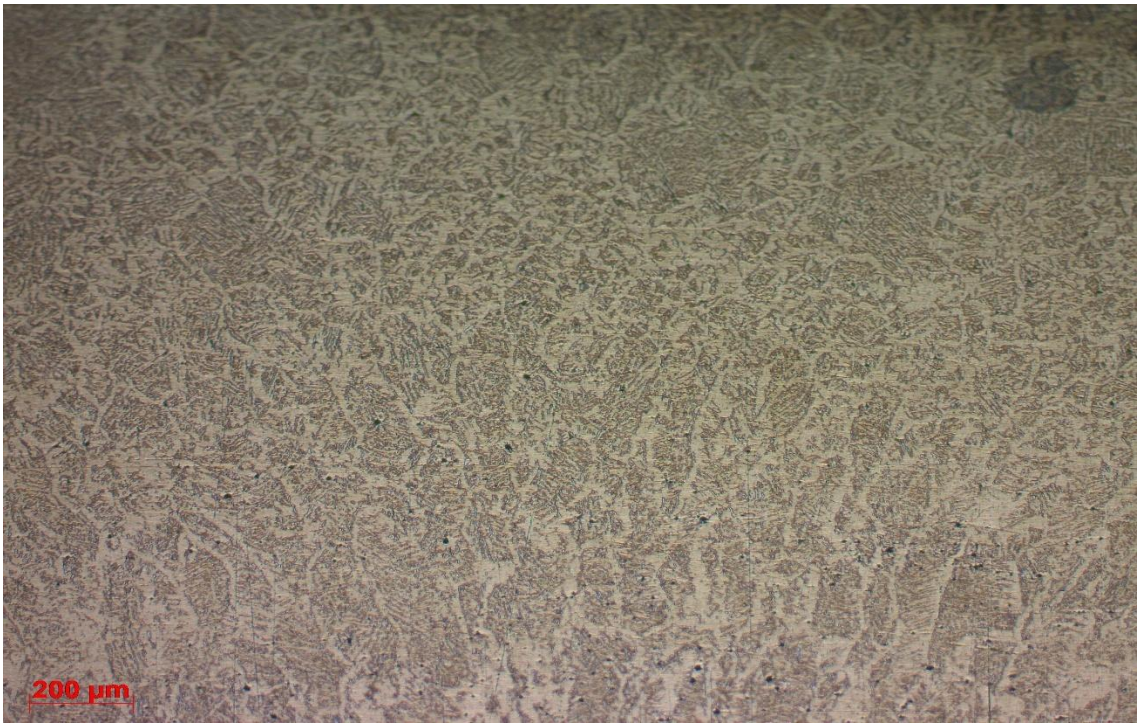
Fuente: Propia.

Figura 74. Micrografía probeta con cloruros 500 aumentos de la zona afectada.



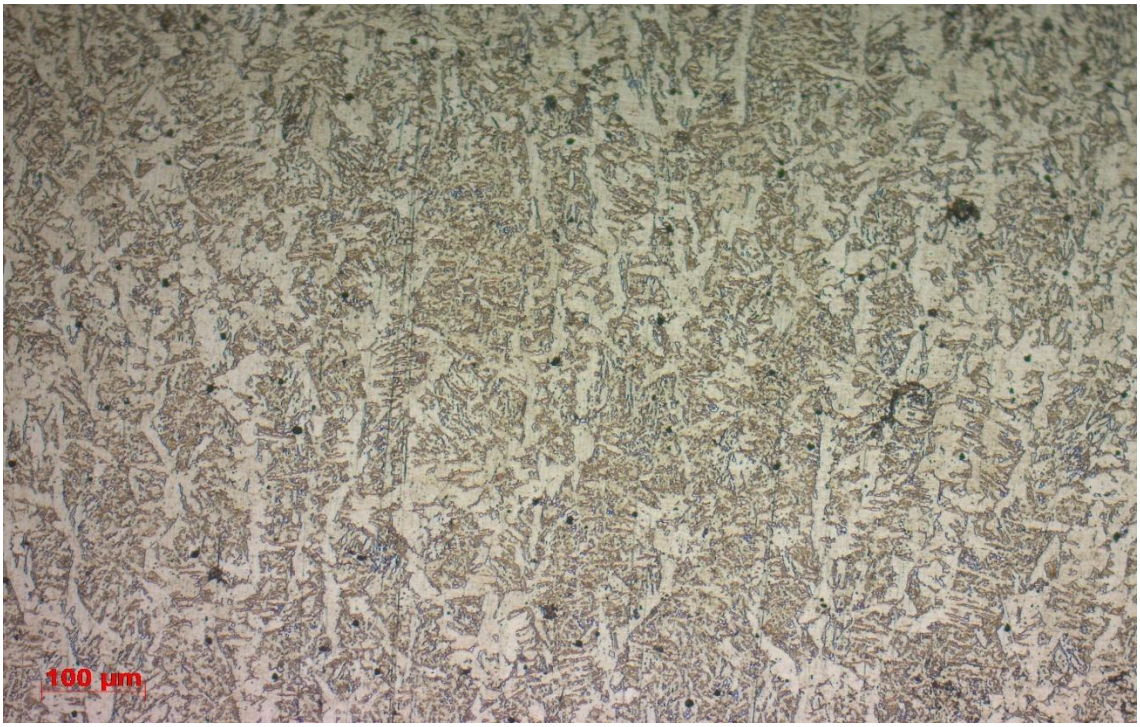
Fuente: Propia.

Figura 75. Micrografía probeta con cloruros 50 aumentos de la zona del cordón.



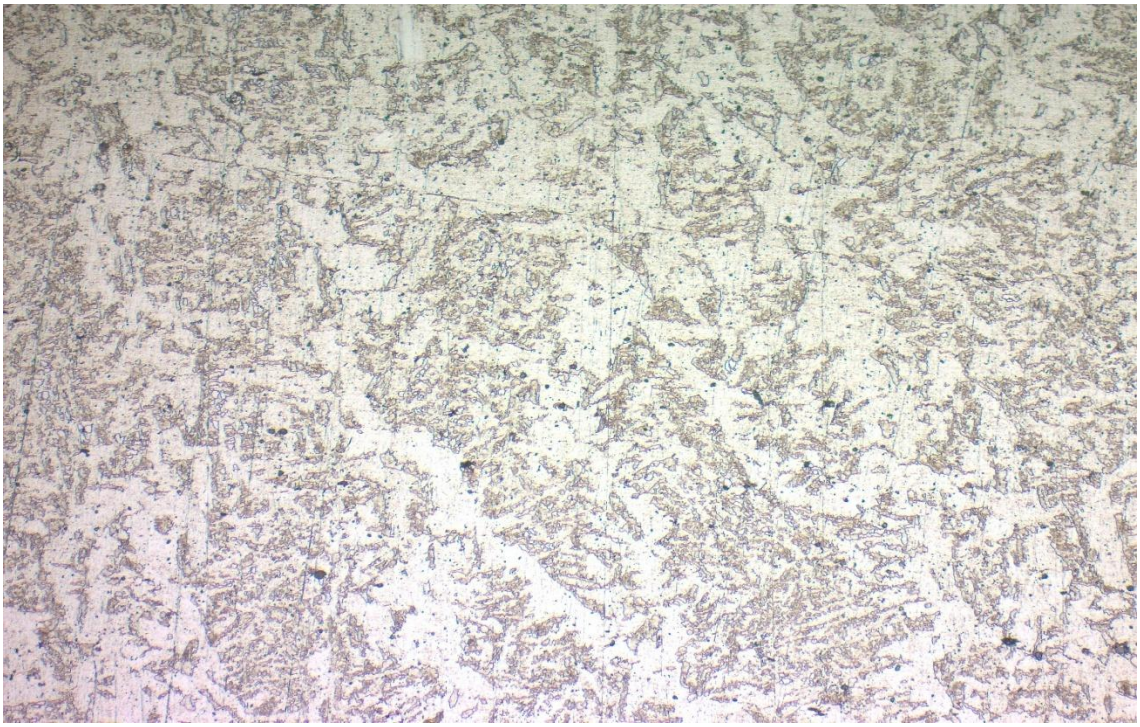
Fuente: Propia.

Figura 76. Micrografía probeta con cloruros 100 aumentos de la zona del cordón.



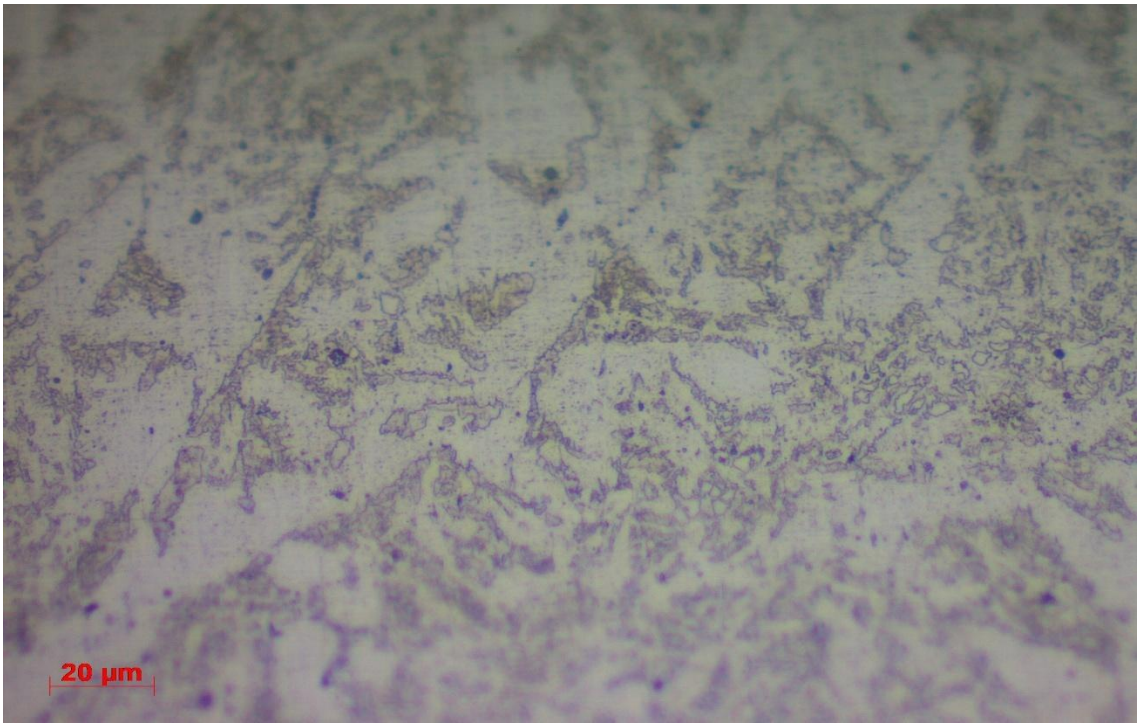
Fuente: Propia.

Figura 77. Micrografía probeta con cloruros 200 aumentos de la zona del cordón.



Fuente: Propia.

Figura 78. Micrografía probeta con cloruros 500 aumentos de la zona del cordón.

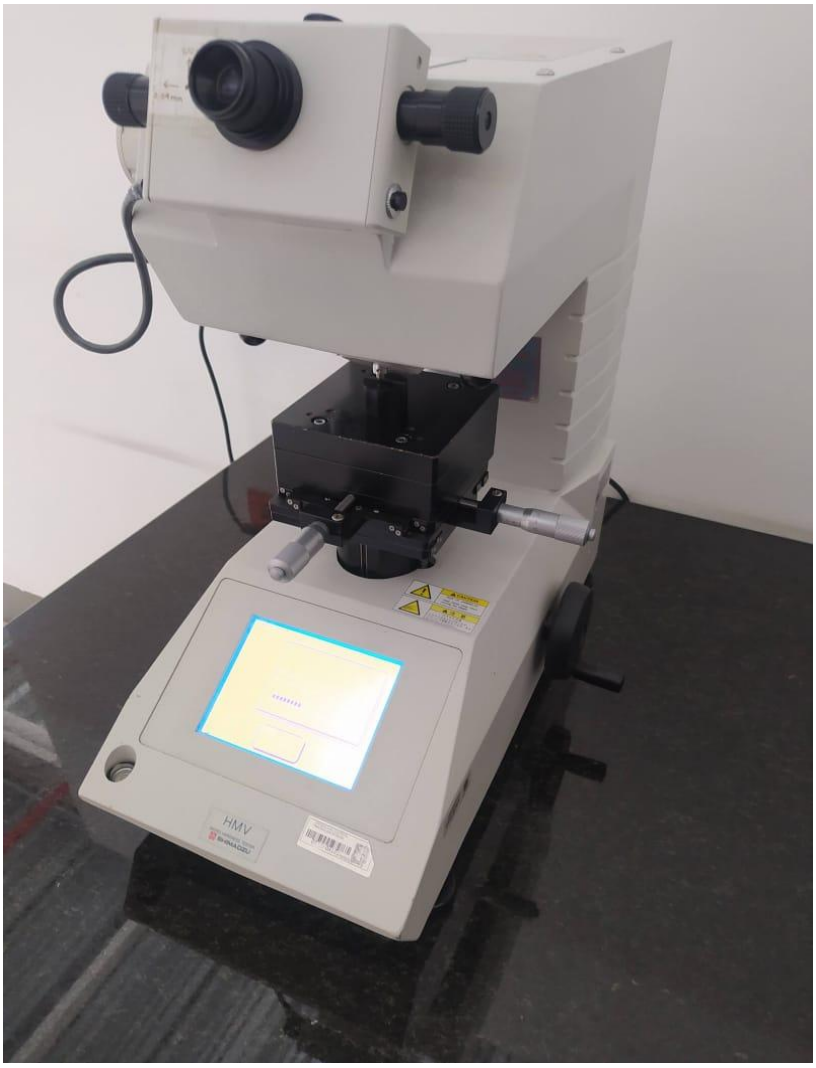


Fuente: Propia.

8.9. MICRODUREZA

Una vez capturadas todas las fotos con el microscopio se procede a tomar los puntos de microdureza en las muestras en las muestras con el microdurómetro marca SHIMADZU modelo HMV-2 (**ver figura 79**). Las microdurezas se tomaron bajo una carga de 10 N, obteniendo un total de 18 puntos por muestra (**ver anexos**). Estos puntos se tomaron en la línea media y línea superior de la probeta, identificando la microdureza de cada zona ilustrada.

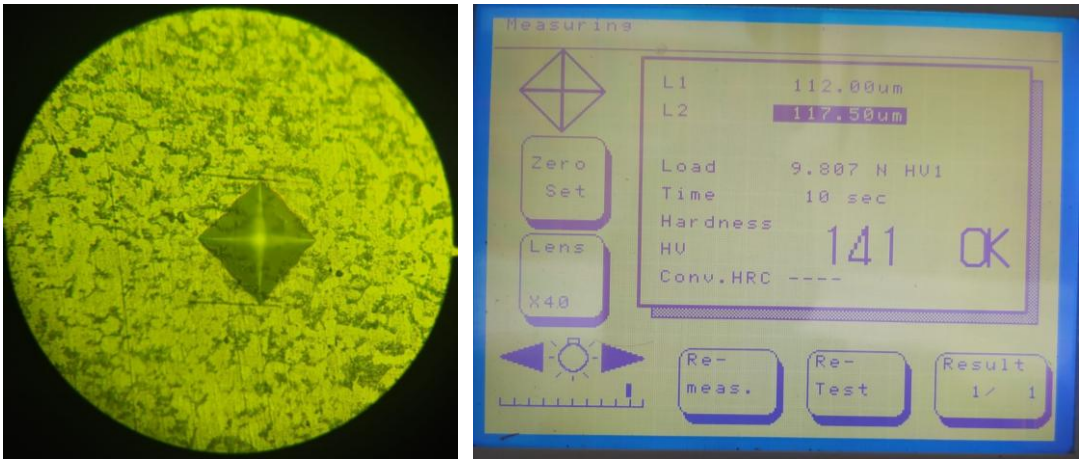
Figura 79. Microdurómetro metalográfico SHIMADZU modelo HMV-2, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital.



Fuente: Propia.

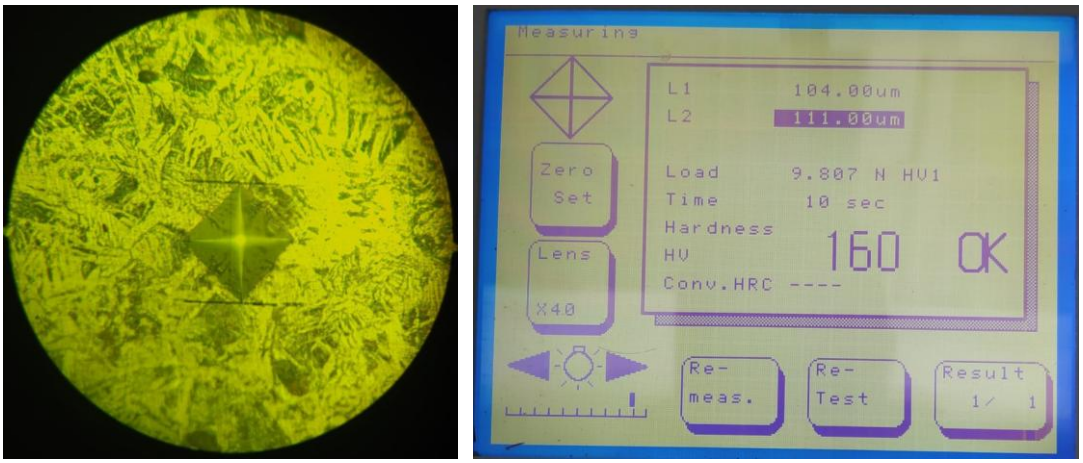
8.9.1. Microdureza probeta sin cloruro

Figura 55. Microdureza 1 probeta sin cloruro de la zona material base.



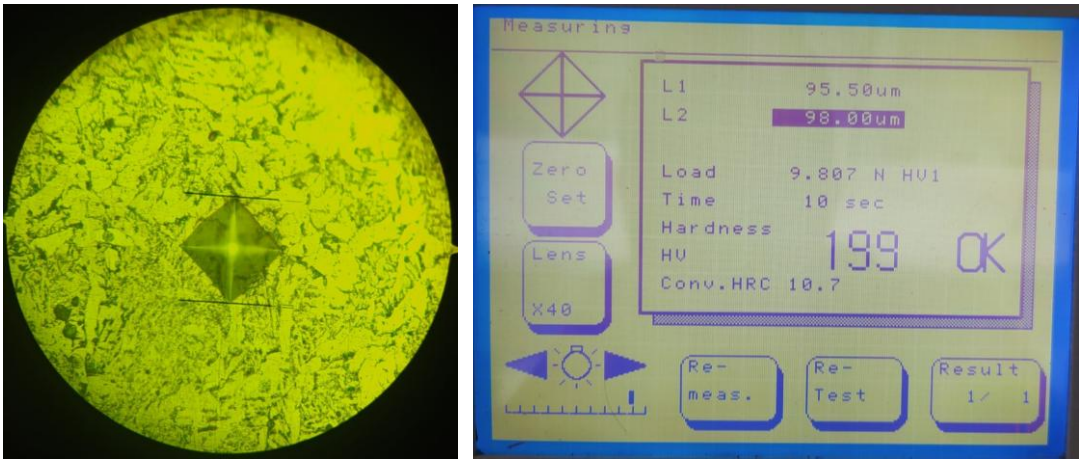
Fuente: Propia.

Figura 80. Microdureza 1 probeta sin cloruro de la zona afectada.



Fuente: Propia.

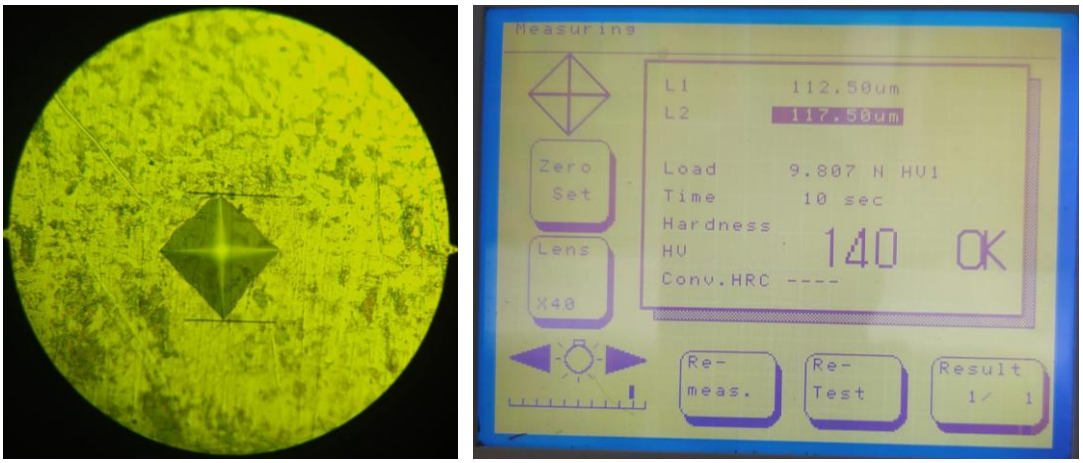
Figura 81. Microdureza 1 probeta sin cloruro de la zona del cordón.



Fuente: Propia.

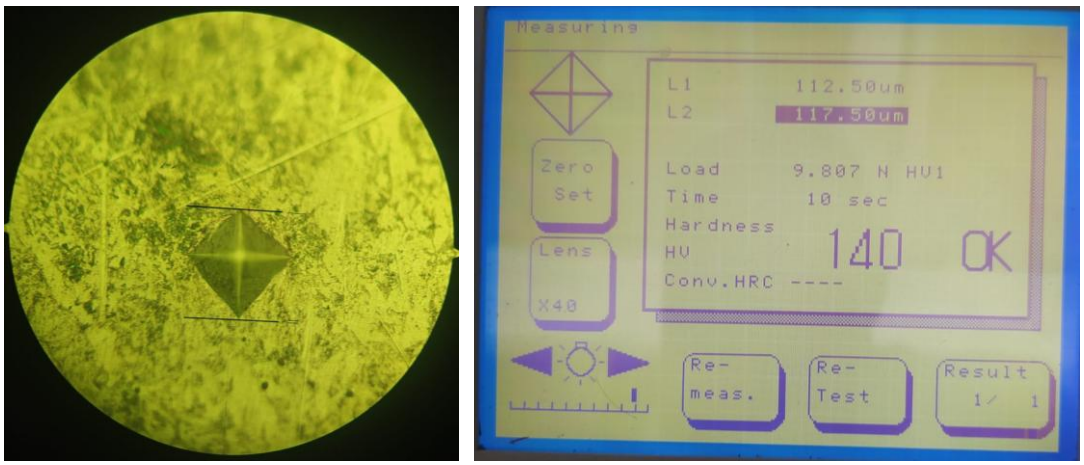
8.9.2. Microdureza probeta con cloruro

Figura 82. Microdureza 1 probeta con cloruro de la zona material base.



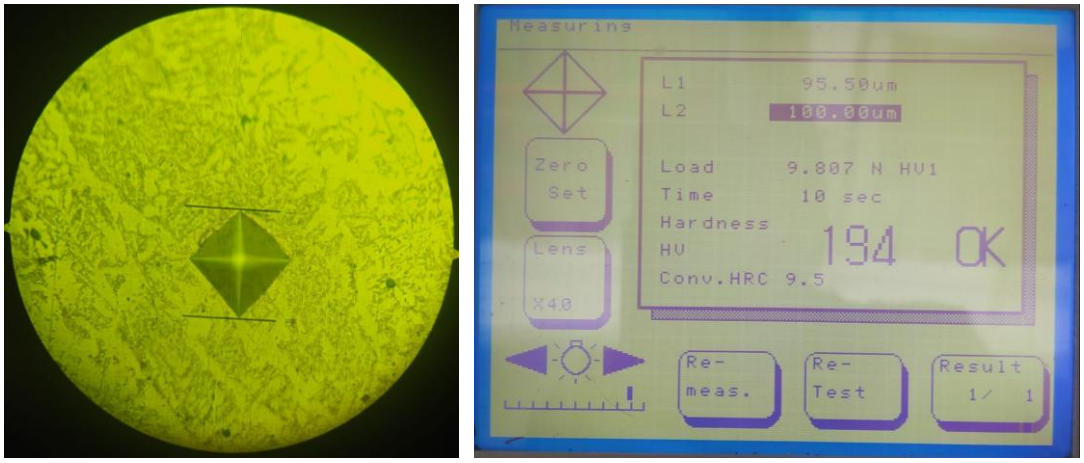
Fuente: Propia.

Figura 83. Microdureza 1 probeta con cloruro de la zona afectada.



Fuente: Propia.

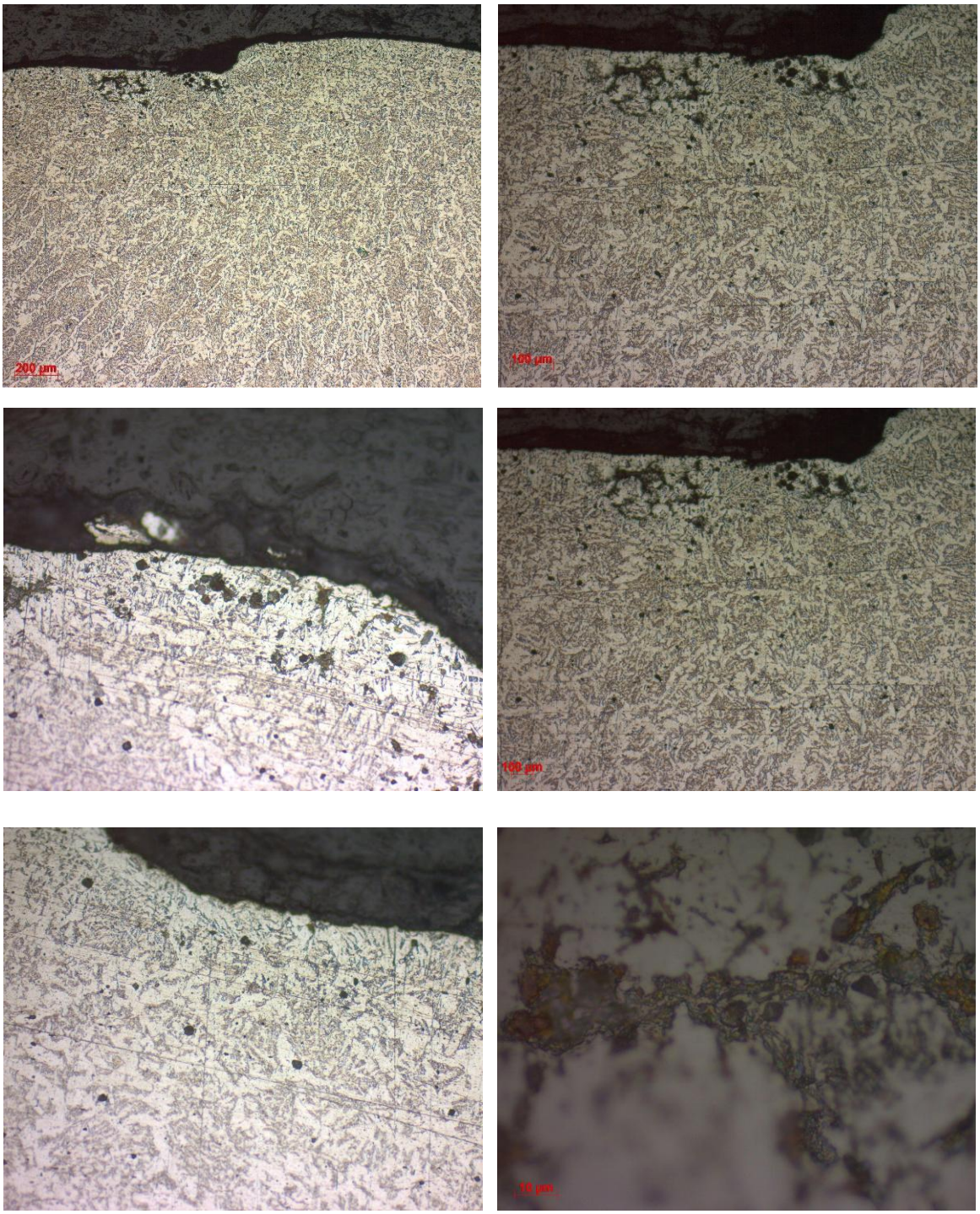
Figura 84. Microdureza 1 probeta con cloruro de la zona del cordón.

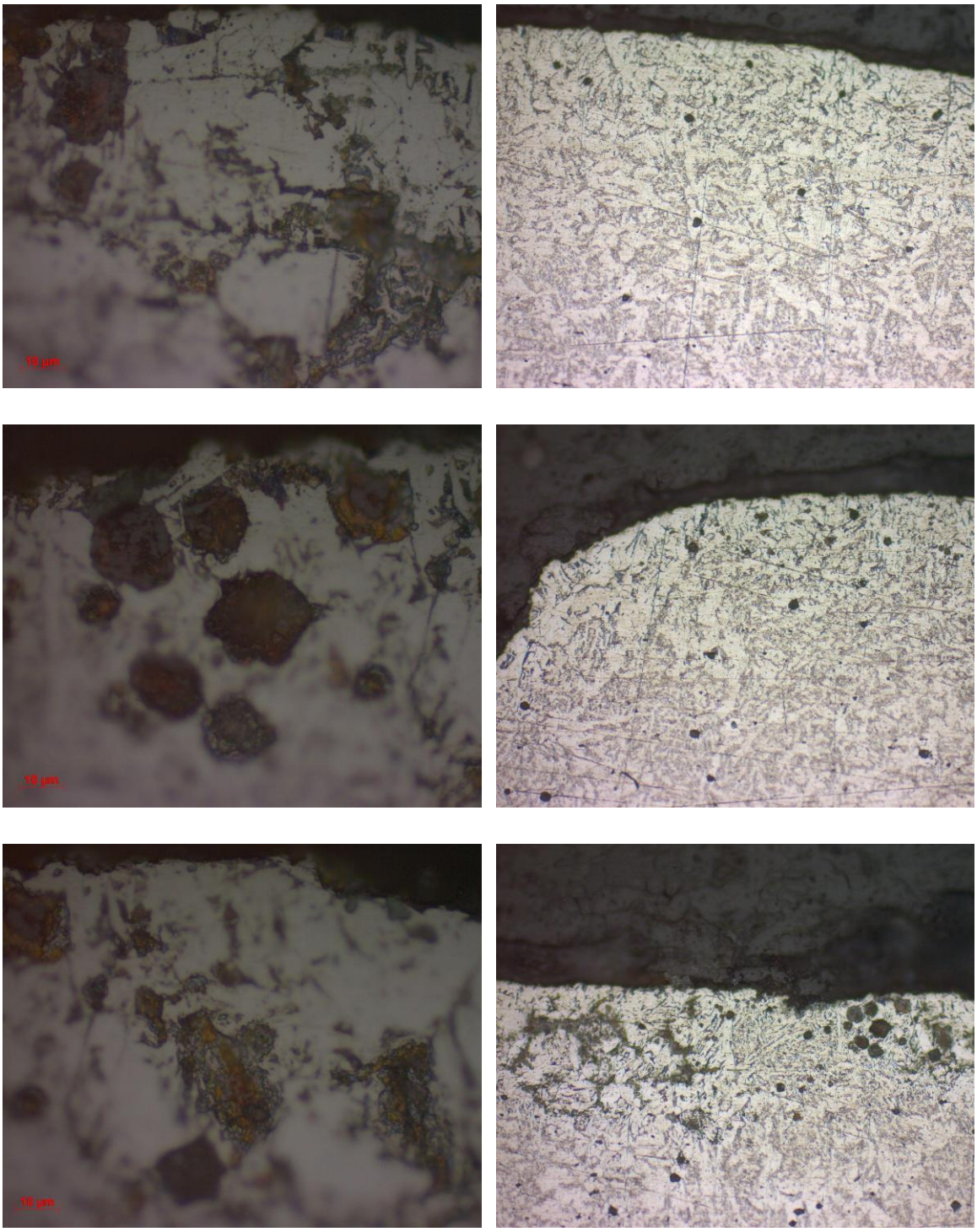


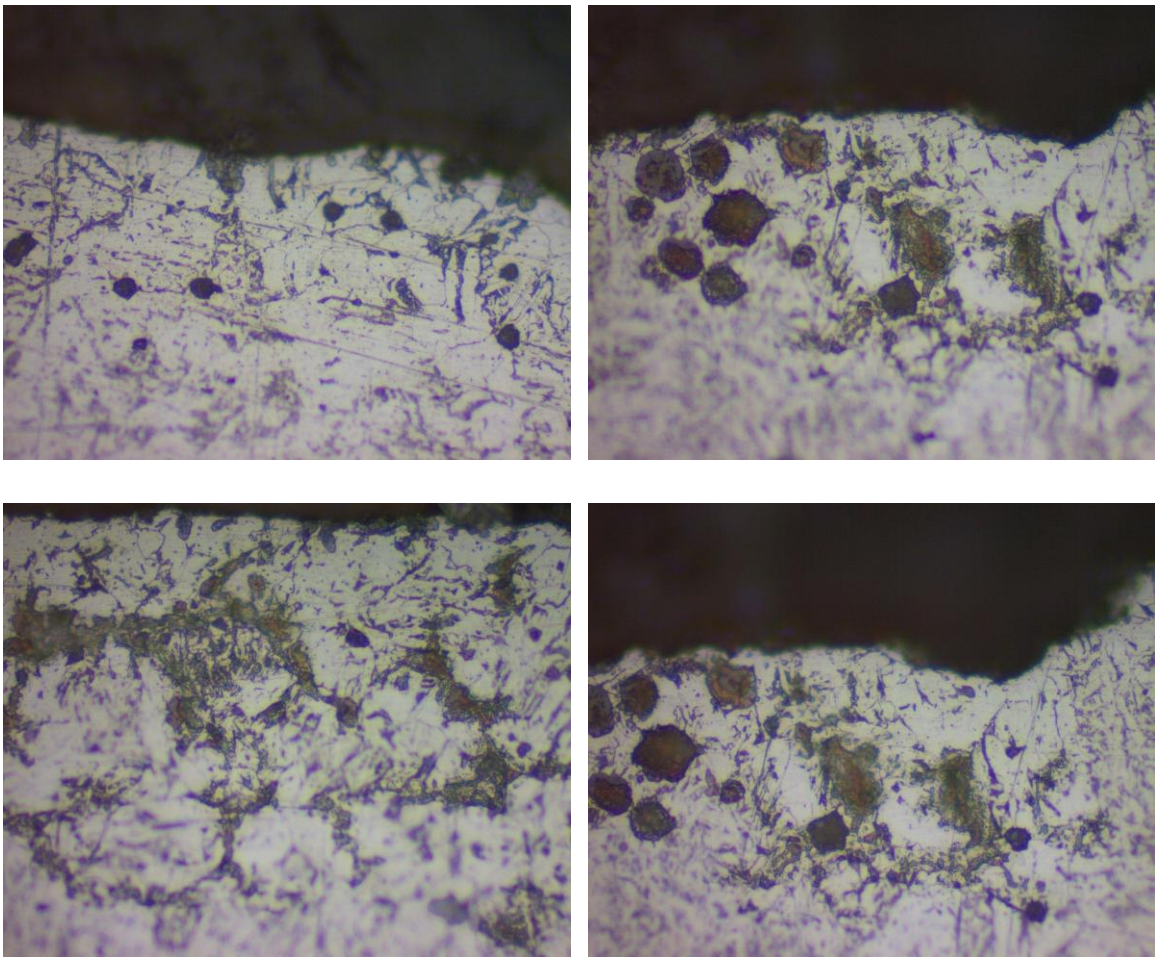
Fuente: Propia.

9. 1|RESULTADOS CORROSIÓN PROBETA CON CLORUROS

Figura 85. Resultados afectación de la corrosión en probeta con cloruros.





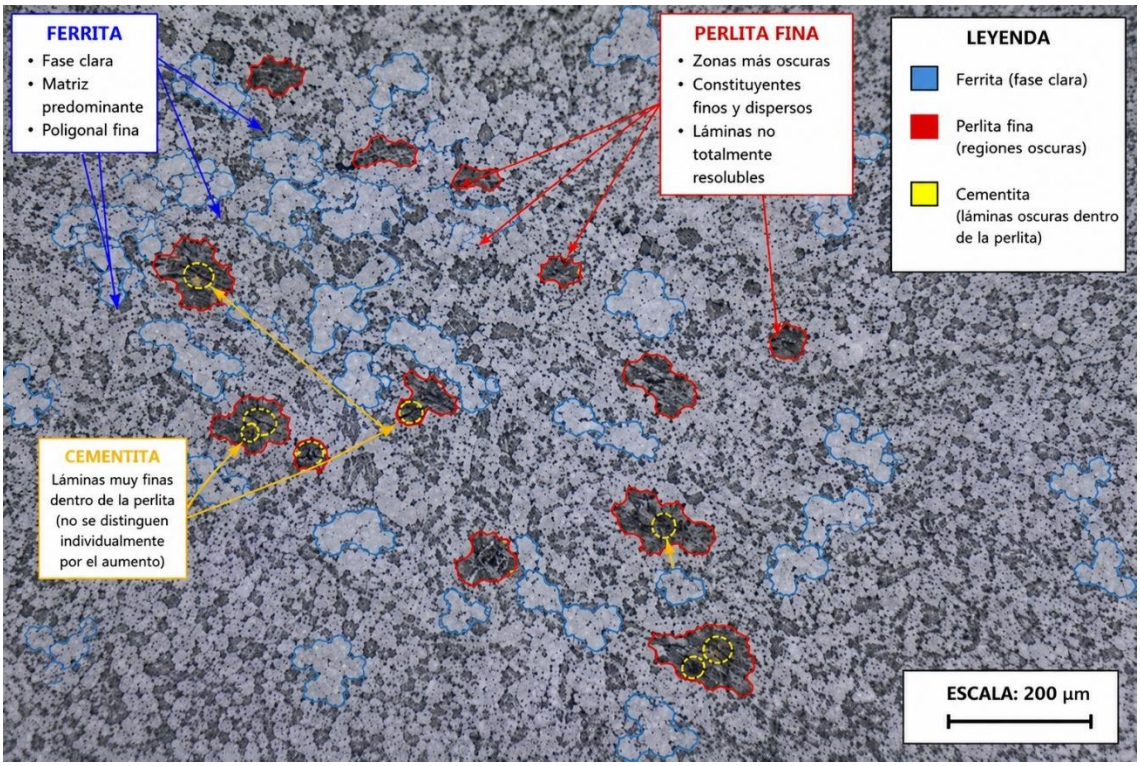


Fuente: Propia.

10. ANALISIS DE RESULTADOS

10.1. MICROESTRUCTUCTURA PROBETA SIN CLORUROS

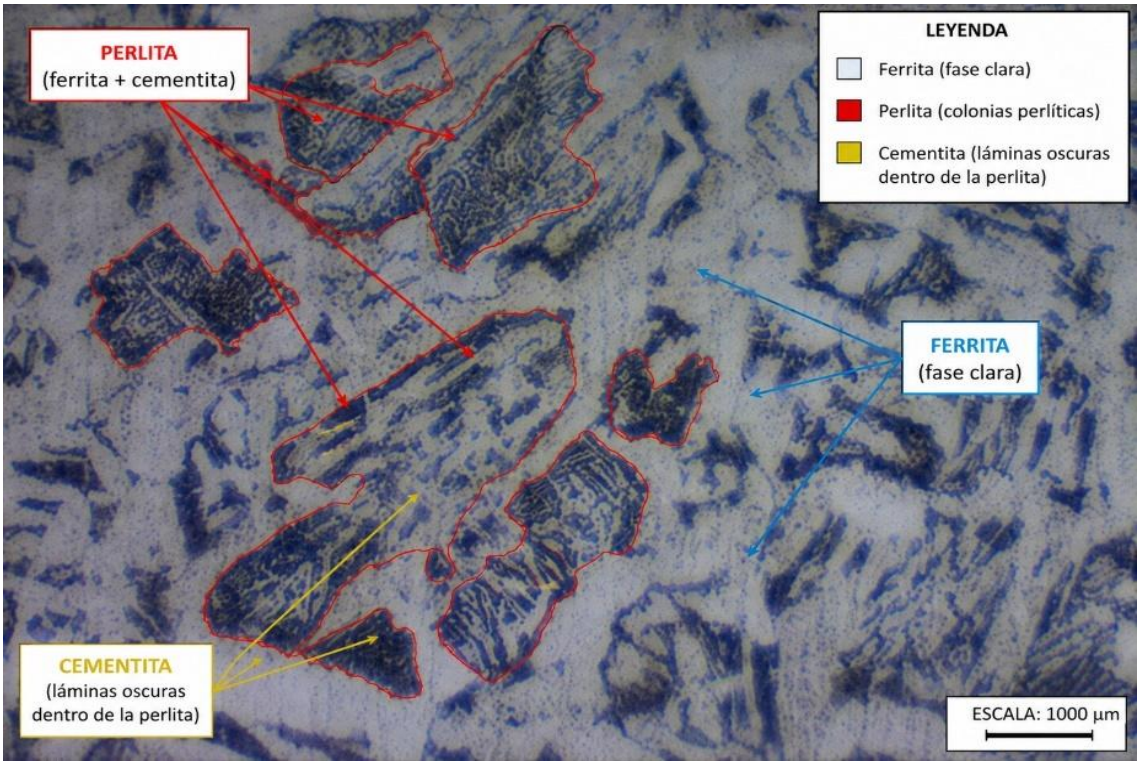
Figura 86. Micrografía probeta sin cloruros a 200X muestra de la zona material base.



Fuente: Propia.

La figura 86 corresponde a la zona afectada por el calor (zona 1) de la muestra sin cloruros. Micrografía tomada con lente de 200X aumentos, mediante inspección visual se logra identificar granos perlíticos con una distribución de cementita laminar muy fina, se evidencia formación de ferrita. Se mantiene la morfología equiaxial.

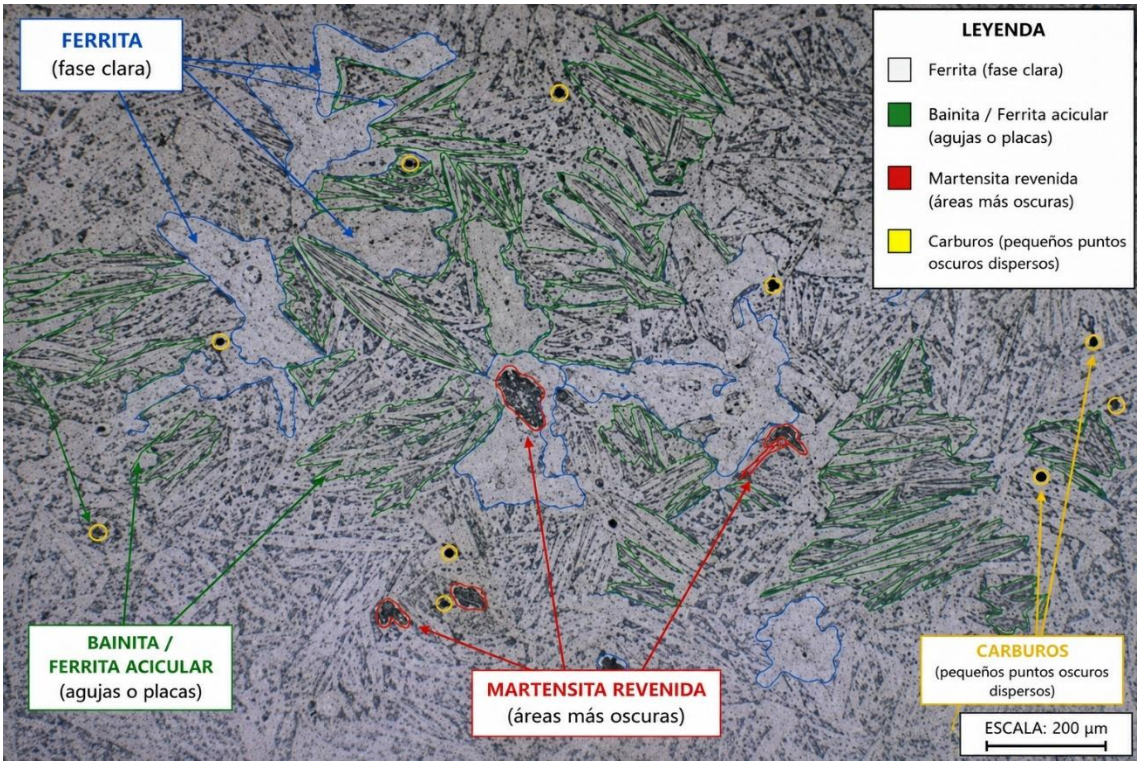
Figura 87. Micrografía probeta sin cloruros a 1000X muestra de la zona afectada.



Fuente: Propia.

La figura 87 corresponde a la zona afectada por el calor (zona 2) de la muestra sin cloruros. Micrografía tomada con lente de 1000X aumentos, mediante inspección visual se logra identificar granos perlíticos con una distribución de cementita laminar donde el tamaño del grano es mucho más grande con respecto al grano identificado en la zona del material base, se evidencia la formación de ferrita proeutectoide o matriz ferrítica de hierro alfa (α). Se mantiene la morfología equiaxial.

Figura 88. Micrografía probeta sin cloruros a 200X muestra zona del cordón.

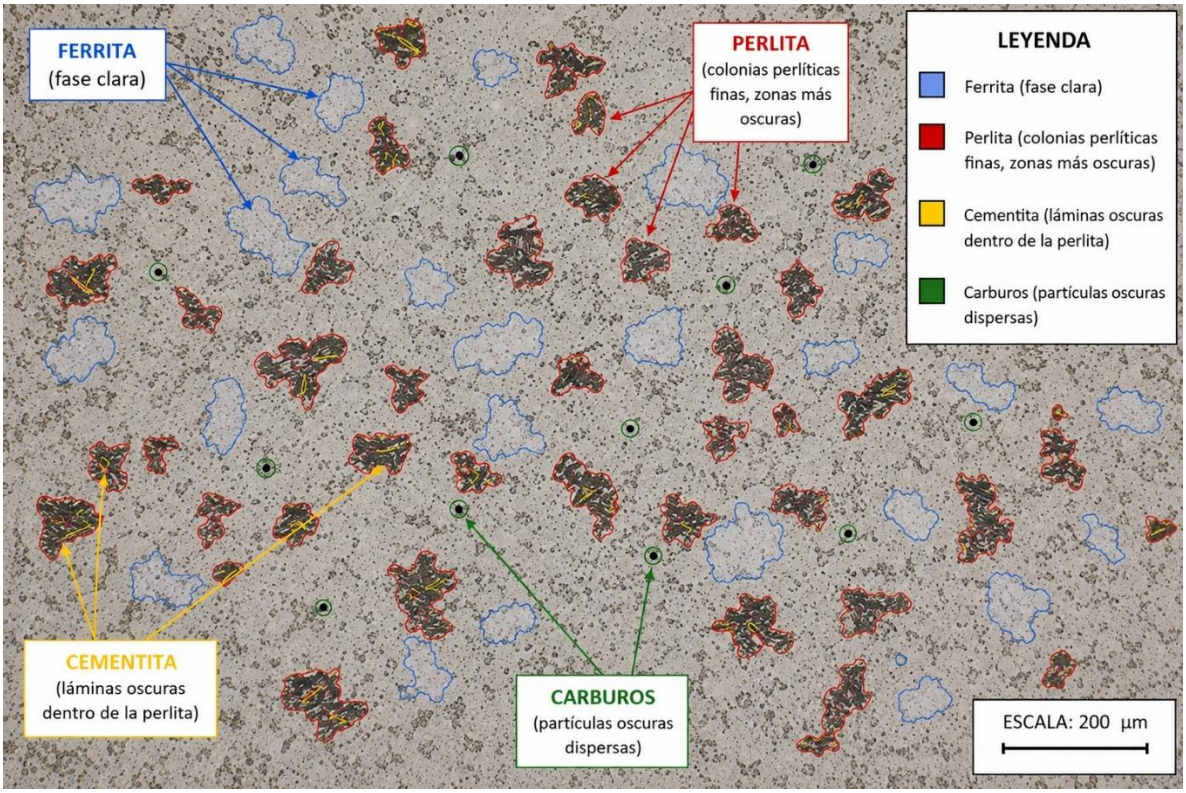


Fuente: Propia.

La figura 88 corresponde a la zona del material de aporte de penetración del cordón de soldadura (zona 3) de la muestra sin cloruros. Micrografía tomada con lente de 200X aumentos, mediante la inspección visual se logra identificar una microestructura con un tamaño de grano mucho más pequeño donde se tiene una matriz ferrítica de hierro alfa (α) en mayor proporción reduciendo el grano perlítico, además se logran identificar carburos de hierro (Fe3C) formados en los límites de granos ferríticos.

10.2. MICROESTRUCTUCTURA PROBETA CON CLORUROS

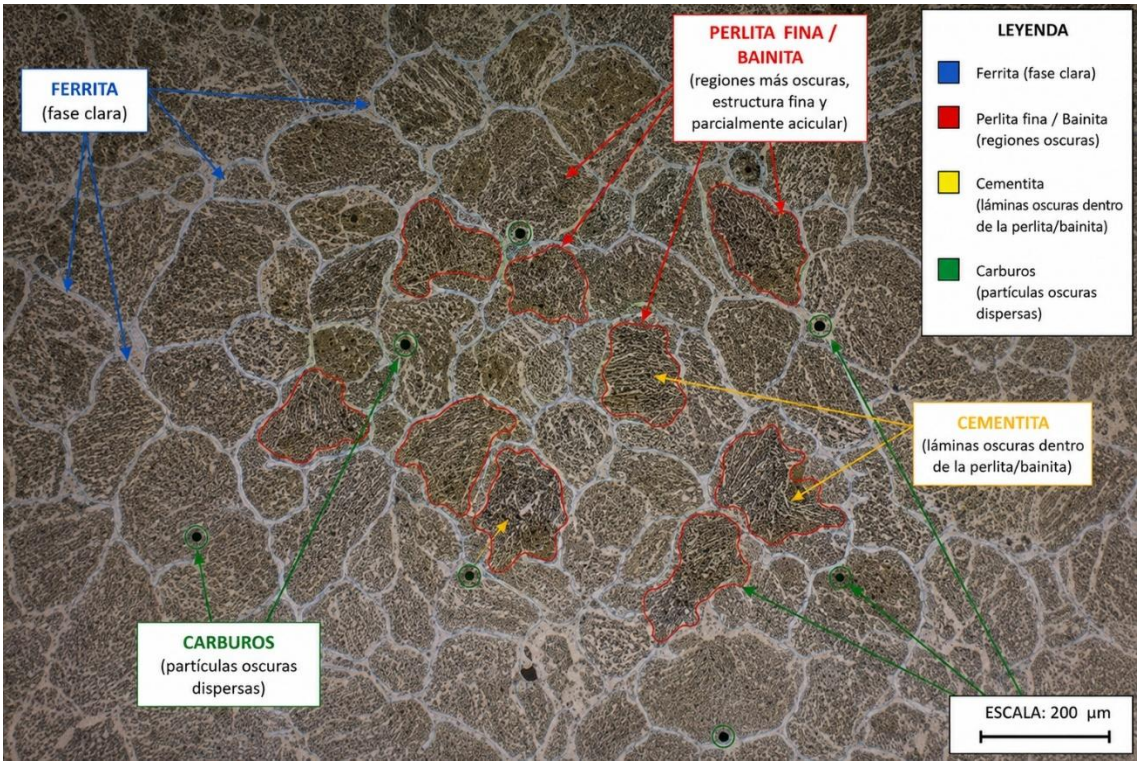
Figura 89. Micrografía probeta con cloruros a 200X muestra zona material base.



Fuente: Propia.

La figura 89 corresponde a la zona del material de aporte de penetración del cordón de soldadura (zona 1) de la muestra sin cloruros. Micrografía tomada con lente de 200X aumentos mediante la inspección visual se logra identificar una matriz ferrítica con regiones perlíticas más pequeñas, también se logran identificar partículas dispersas interpretadas como carburos.

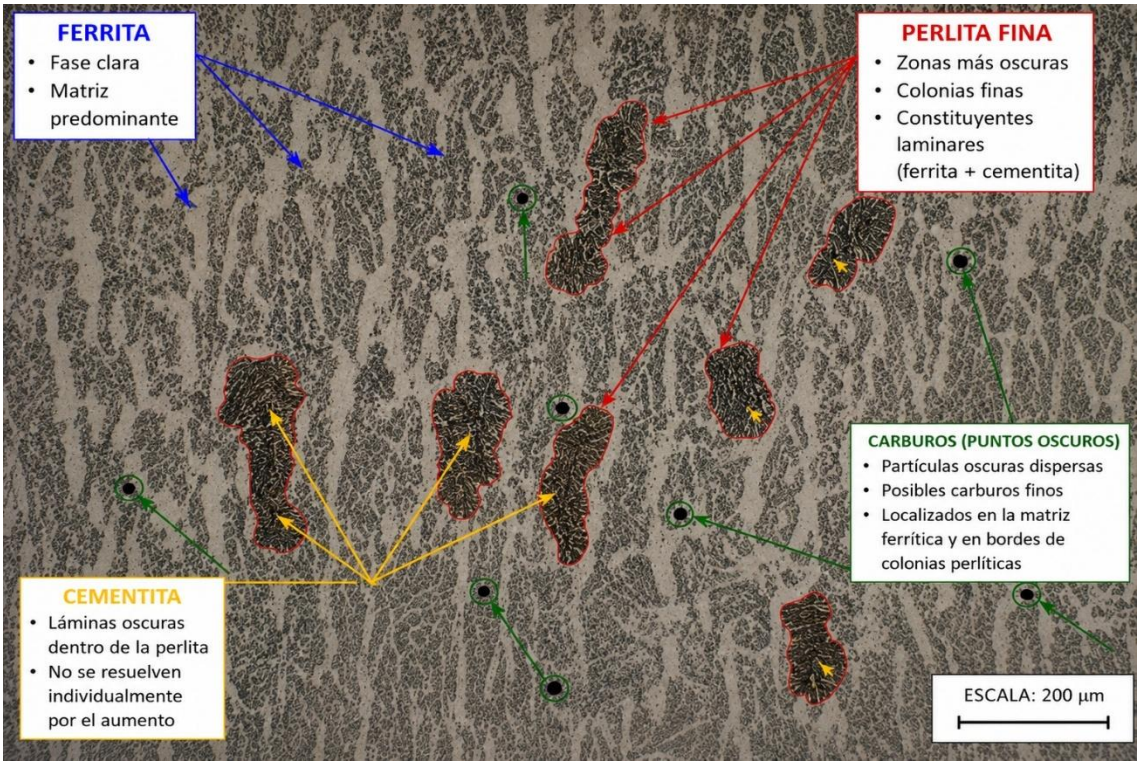
Figura 90. Micrografía probeta con cloruros a 200X muestra de la zona afectada.



Fuente: Propia.

La figura 90 corresponde a la zona del material de aporte de penetración del cordón de soldadura (zona 2) de la muestra sin cloruros. Micrografía tomada con lente de 200X aumento tomada mediante la inspección visual se logra identificar una matriz ferrítica clara continua que delimita regiones oscuras refinadas correspondientes a perlita, además se logran identificar pequeñas partículas negras asociadas a carburos de hierro (Fe3C) formados en los límites de granos ferríticos.

Figura 91. Micrografía probeta con cloruros a 200X muestra de la zona del cordón.

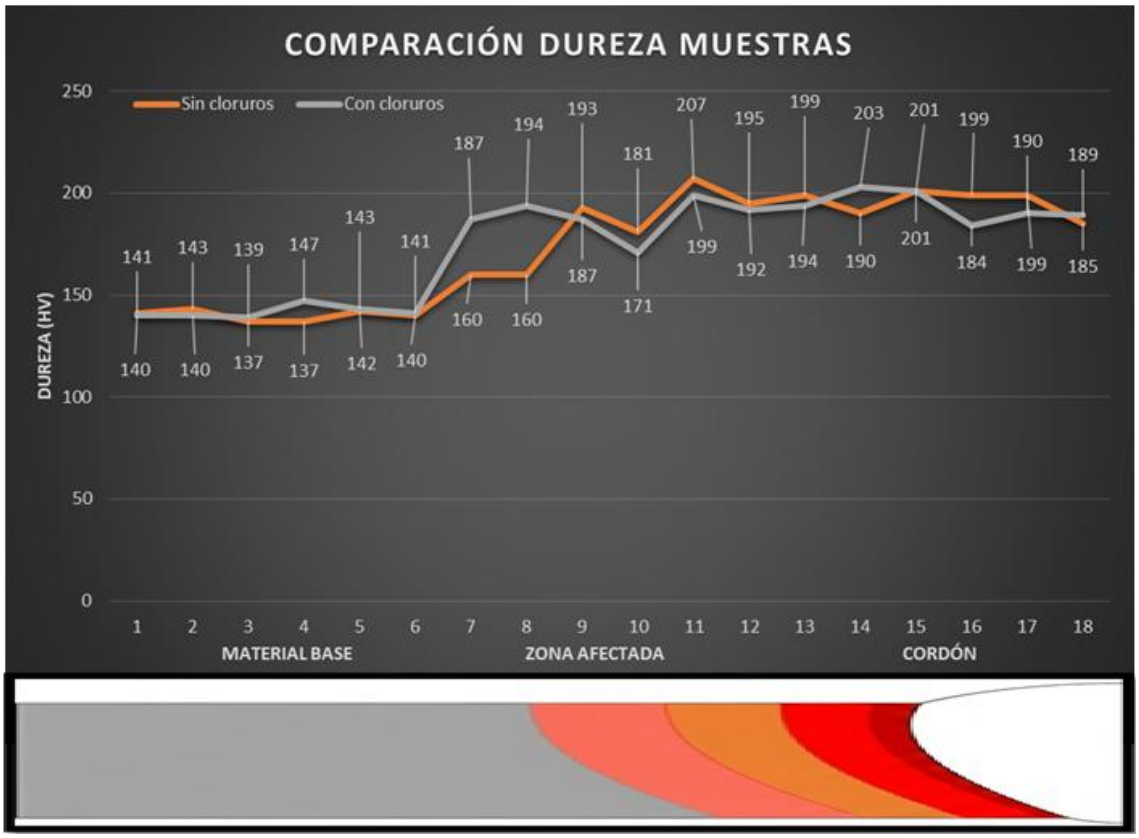


Fuente: Propia.

La figura 91 corresponde a la zona del material de aporte de penetración del cordón de soldadura (zona 2) de la muestra sin cloruros. Micrografía tomada con lente de 200X aumentos tomada mediante la inspección visual. Se logra identificar una matriz ferrítica con algunas colonias de perlita fina, al igual se observan pequeños puntos dispersos asociados a carburos de hierro.

10.3. MICRODUREZA

Gráfica 1. Comparación de durezas muestras sin cloruro y con cloruro.



Fuente: Propia.

- En la región correspondiente al material base, los perfiles de microdureza de ambas probetas muestran un comportamiento prácticamente idéntico, registrando valores sumamente estables que oscilan en un rango estrecho entre **137 HV y 147 HV**. Esta superposición casi perfecta de las curvas se debe a que el material base, al encontrarse alejado de la fuente de calor del arco eléctrico, no experimentó las transformaciones de fase térmicas ni los ciclos de enfriamiento rápido característicos del proceso de unión. Asimismo, la exposición posterior a los iones cloruro no generó una degradación mecánica de la matriz en esta zona debido a la ausencia de tensiones mecánicas severas, permitiendo que la microestructura original mantuviera intacta su resistencia a la indentación en ambas muestras.

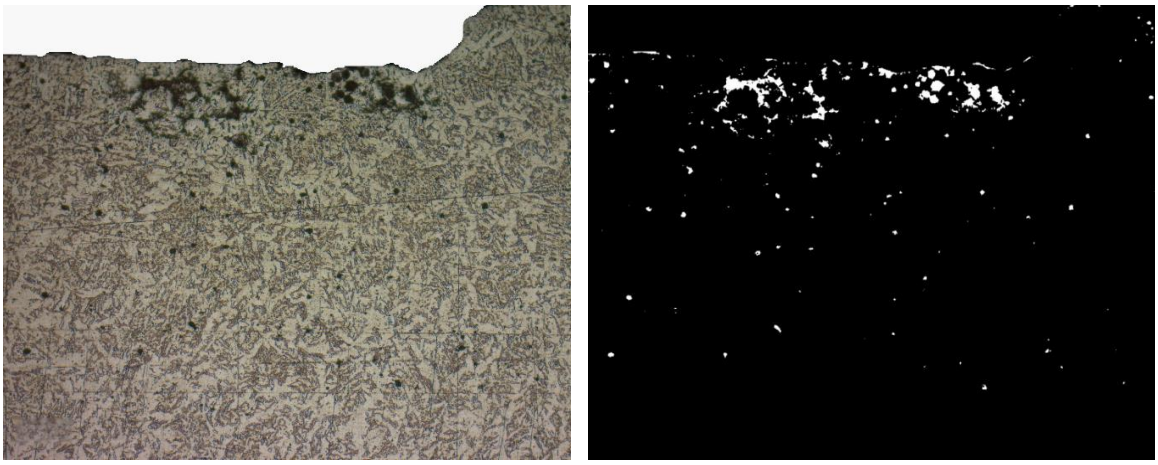
- La Zona Afectada por el Calor (**ZAT**) representa la región de mayor divergencia y criticidad entre los dos tratamientos, evidenciando un incremento drástico en la dureza de la probeta expuesta a cloruros, la cual

alcanza picos de **187 HV y 194 HV** en los puntos 7 y 8, frente a los **160 HV** estables de la muestra sana. Desde la perspectiva metalúrgica, la ZAT posee microestructuras térmicamente alteradas y un elevado estado de **tensiones residuales** producto del fuerte gradiente térmico de la soldadura. Al introducir los iones cloruro en este entorno tensionado, se desencadenan fenómenos de microfragilización localizada e interacción atómica en los límites de grano; la acumulación de microdefectos y la distorsión de la red cristalina restringen el movimiento de las dislocaciones en la matriz, manifestándose físicamente como un endurecimiento severo y localizado (de hasta un 21% superior) en la muestra corroída.

- Finalmente, en la zona del cordón de soldadura o metal de aporte, ambas probetas alcanzan sus niveles máximos de microdureza, fluctuando de manera consistente en un rango elevado entre **184 HV** y **207 HV**, con curvas que tienden a converger hacia el final del barrido. Este incremento generalizado es consecuencia directa del proceso de fusión y rápida solidificación del metal de aporte, el cual promueve el desarrollo de una microestructura fina y altamente entrelazada (como ferrita acicular o estructuras dendríticas refinadas) diseñada específicamente para otorgar altas propiedades mecánicas. Aunque la probeta expuesta a cloruros exhibe ligeras fluctuaciones o caídas puntuales debido a la agresividad del medio químico, la alta homogeneidad de la aleación del cordón mitiga el impacto del ataque, demostrando que la composición química del metal de aporte tolera mejor la degradación en comparación con la susceptibilidad mecánica observada en la interfaz de la **ZAT**.

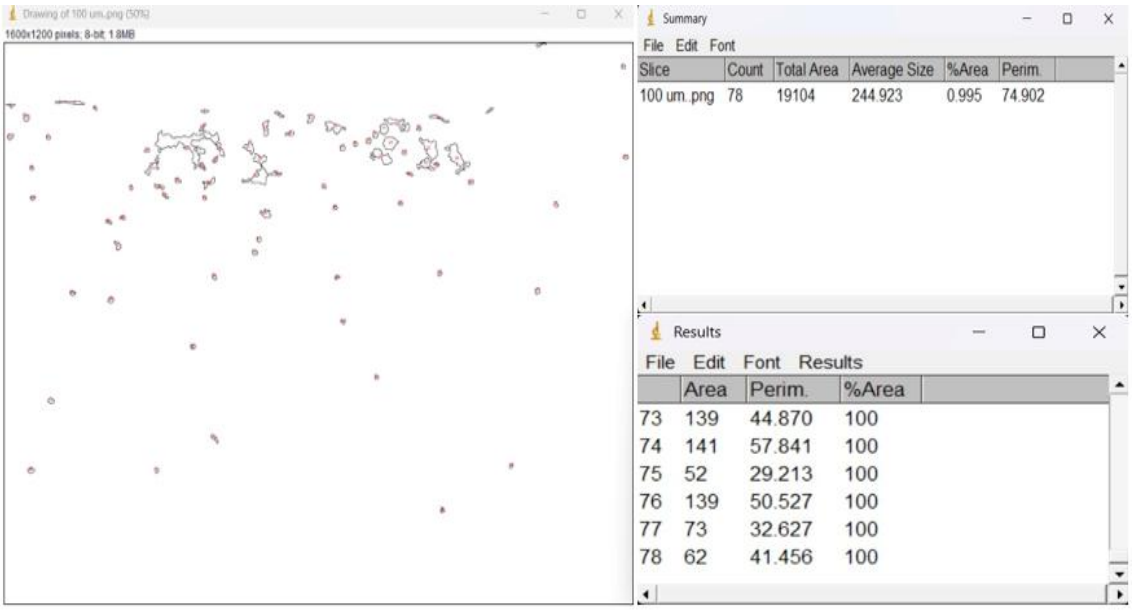
10.4. CORROSIÓN SUPERFICIAL

Figura 92. Apreciación 1 de puntos corrosión con programa Imagej 100 aumentos.



Fuente: Propia.

Figura 93. Resultados 1 de puntos corrosión con programa Imagej 100 aumentos.

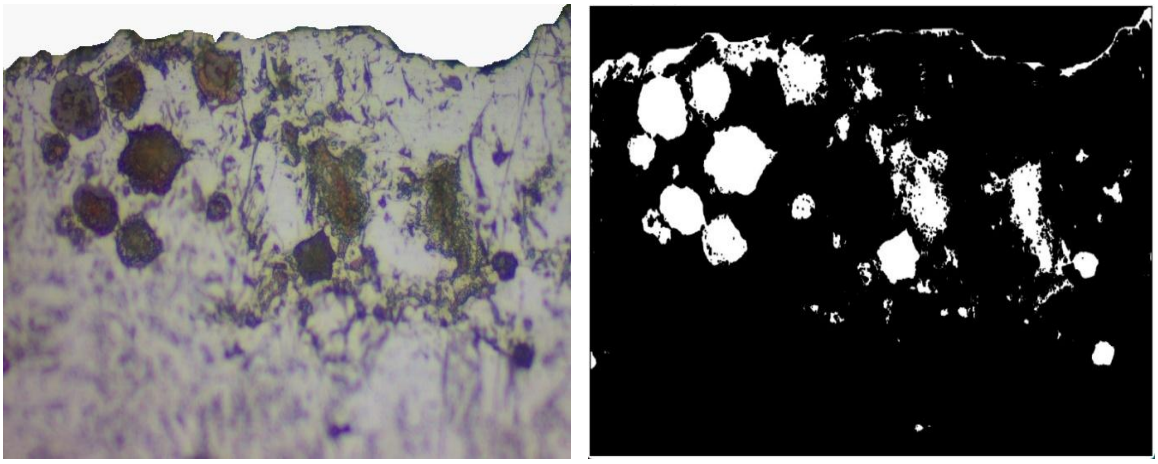


Fuente: Propia.

- Se realizó un análisis digital de la micrografía obtenida a **100 aumentos** (**ver figura 92**), excluyendo del procesamiento la resina de montaje y la barra de escala, con el fin de cuantificar únicamente las zonas correspondientes al material metálico. Mediante la segmentación de las regiones oscuras asociadas a productos de corrosión superficial, se determinó que estas ocupan aproximadamente **el 1,2 % del área analizada**. Asimismo, se identificó una distribución dispersa de los focos de corrosión, con una mayor

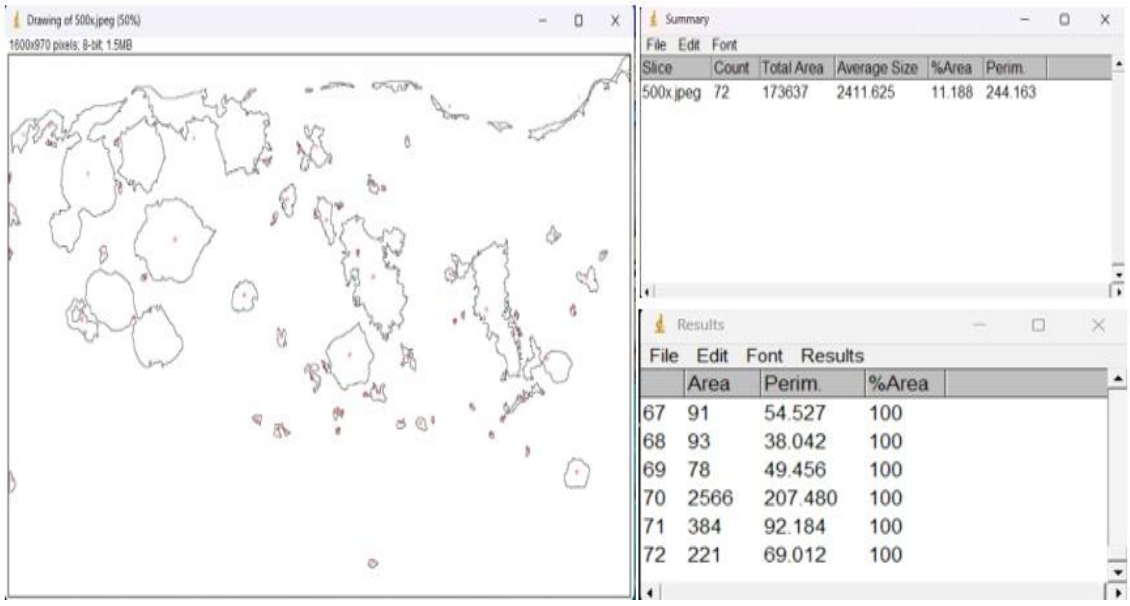
concentración en la superficie **expuesta al medio con cloruros**, lo que evidencia el inicio de un proceso de ataque superficial, sin que se observe una propagación significativa hacia el interior del material en el campo analizado.

Figura 94. Apreciación 2 de puntos corrosión con programa Imagej 500 aumentos.



Fuente: Propia.

Figura 95. Resultados 2 de puntos corrosión con programa Imagej 500 aumentos.

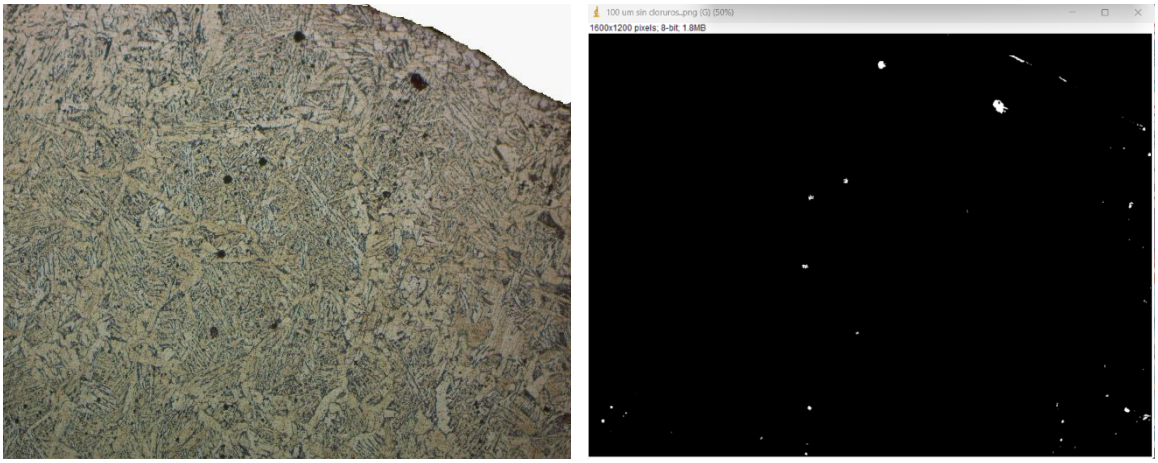


Fuente: Propia.

- Mediante el análisis digital de la micrografía obtenida a **500 aumentos** (**ver figura 94**), se cuantificó el área ocupada por los productos de corrosión

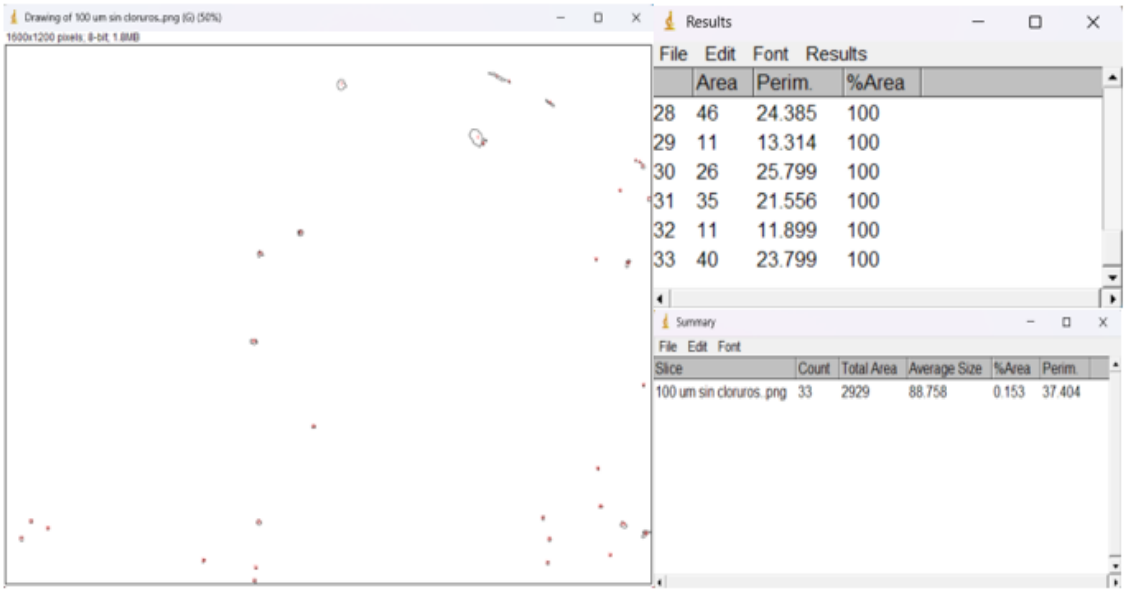
superficiales, excluyendo del procesamiento la resina de montaje. La segmentación de las regiones correspondientes a los productos de corrosión permitió determinar que aproximadamente **el 16,5 % del área analizada** se encuentra afectada por el proceso corrosivo. Se observa la acumulación de productos de corrosión sobre el material base, mientras que hacia el interior de la muestra la afectación disminuye significativamente.

Figura 96. Comparación muestra sin cloruros con programa Imagej 100 aumentos.



Fuente: Propia.

Figura 97. Resultados comparación muestra sin cloruros con programa Imagej 100 aumentos.



Fuente: Propia.

- Se realizó un análisis digital de la micrografía obtenida a **100 aumentos** correspondiente a la probeta de referencia (**ver figura 96**), la cual no fue sometida al ensayo de inmersión en solución con cloruros. Para la cuantificación se consideraron exclusivamente los **puntos circulares oscuros y aislados**, descartando la resina de montaje y las características propias de la microestructura (ferrita y perlita). Como resultado del procesamiento se identificaron aproximadamente **33 sitios puntuales**, equivalente al **0,21 % del área total analizada**. La baja sección de área ocupada y la distribución dispersa de estas discontinuidades indican que corresponden a defectos superficiales aislados o inclusiones presentes en la condición inicial del material, sin evidencias de un proceso de corrosión superficial significativo.

Tabla 13. Comparación de resultados de las dos probetas.

Variable	Probeta con cloruros	Probeta sin cloruros	Variación
Conteo de picaduras	78	33	+ 136.3% (Mayor densidad de ataque)
Área total corroída (μm²)	19,104	2,929	El área dañada es ≈ 6.5 veces mayor
Tamaño promedio de picadura (μm²)	244,92	88,76	Incremento del 175.9% en el tamaño
Perímetro promedio de picadura (μm)	74,9	37,4	Incremento del 100.2% (Bordes más irregulares)
Porcentaje de área afectada (%)	1.20	0.21	Mayor severidad de corrosión localizada

Fuente: Propia.

- A través del análisis cuantitativo realizado con el software ImageJ, se pudo comprobar de manera estadística la notable agresividad del medio salino sobre la junta soldada. La probeta que estuvo en contacto con los cloruros no solo mostró una mayor cantidad de puntos críticos (78 en comparación con los 33 de la probeta sana), sino que también desarrolló micropicaduras

con un área promedio mayor (**244.92 µm²**) en comparación con la probeta sana (**88.76 µm²**). Este aumento del **175.9%** en el tamaño de las picaduras, junto con la duplicación del perímetro promedio (**74.90 µm**), evidencia un mecanismo de fusión y avance intergranular del ataque por cloruros, lo que explica la pérdida de la continuidad mecánica y también el endurecimiento por deformación local que se observó en los ensayos de microdureza de la **ZAT**.

- El análisis digital mediante el programa ImageJ (**ver figura 93**), revela una concentración de corrosión del **0.995%** del área total analizada, con una distribución de 78 puntos críticos (**picaduras**). Aunque el porcentaje de área afectada parece un poco baja, en términos metalúrgicos, la corrosión por picaduras es una de las formas más peligrosas de desgaste en los materiales metálicos, ya que representa una pérdida localizada que puede comprometer bastante la integridad estructural, sin necesidad de que se presente un daño en la masa que sea significativo.

- La presencia de **iones de cloruro** en la probeta son el factor principal del daño en este caso. Estos iones son altamente agresivos y tienen la capacidad de penetrar y romper la capa pasiva (**la película protectora de óxido**) del metal. Por otro lado, también se observan zonas con ataque preferencial en los límites de grano o cerca de la superficie en la zona expuesta, lo que justificaría los procesos de corrosión intergranular y pitting provocados por los cloruros. Este tipo de corrosión se entiende porque los límites de grano poseen una energía de mayor tamaño y una actividad electroquímica más grande, que favorece una disolución localizada del material. El mayor ataque en la superficie se justifica por el contacto del acero con el medio salino, donde el oxígeno y los iones de cloruros estimulan a la formación de los productos de corrosión y su deterioro.

- La microestructura de la probeta que no ha estado expuesta a cloruros (**ver figura 96**), tiene una estructura interna muy uniforme y estable en el material base. Los granos están bien formados y hay una buena distribución de ferrita y perlita. No se ven defectos ni cambios por el calor en esta zona. En la zona que ha estado expuesta al calor, los granos crecieron y la perlita ya no tiene una forma tan uniforme. Esto suele pasar porque la soldadura ha hecho que el material cambie por el calor. Aunque la estructura interna no es tan uniforme como antes, no se ven signos de corrosión. El cordón de soldadura tiene una estructura interna muy variada, típica de cuando el metal se enfría rápidamente. Hay diferencias en el tamaño de los granos y en cómo están distribuidas las fases, pero no se ven inclusiones ni cavidades que puedan afectar la calidad del material.

- La microestructura de la probeta expuesta a cloruros (**ver figura 85**), muestra un deterioro importante en todas sus zonas. El material base se ve afectado porque su estructura interna deja de ser uniforme, con bordes de grano irregulares, agujeros y pequeñas muescas que indican el comienzo de la corrosión en áreas específicas. En la zona que ha sido afectada por el calor, la acción de los cloruros se suma al cambio que ya sufre el material debido al calor de la soldadura. Esto hace que los granos crezcan de manera irregular, que la perlita pierda su definición y que aparezcan agujeros superficiales y profundos. Todo esto afecta la resistencia del material, convirtiendo esta zona en el punto más débil de la unión. En el cordón de soldadura, la mezcla inicial de metales se vuelve aún más heterogénea debido al ataque corrosivo. Se observan pequeñas muescas, discontinuidades y una pérdida de definición en las fases de ferrita y perlita.

11. CONCLUSIONES

- Se logró cumplir satisfactoriamente con la elaboración de las probetas soldadas a tope mediante el proceso de soldadura por arco de metal protegido (SMAW), obteniendo muestras geométricamente estables y aptas para los ensayos posteriores de microdureza y corrosión. No obstante, el análisis operativo del proceso permitió identificar que la aplicación del electrodo celulósico E6010 en el cordón de raíz introdujo desafíos técnicos debido a la inestabilidad intermitente del arco y la generación de escoria y salpicaduras abundantes (suciedad en la soldadura). A pesar de estas dificultades, el procedimiento manual fue el adecuado para la obtención de uniones soldadas robustas a nivel de laboratorio, cumpliendo con los requerimientos previos de alineación y geometría de los biseles.

- A partir de las dificultades operacionales experimentadas con el encendido y la continuidad del electrodo revestido de raíz, se concluye la necesidad de evaluar alternativas tecnológicas como el proceso GMAW (MIG/MAG) para futuros desarrollos o réplicas del proyecto. La implementación de un sistema de soldadura con gas de protección y alimentación de alambre continuo optimizaría significativamente la consistencia del arco en la raíz, reduciendo los problemas de contacto eléctrico y la inclusión de impurezas o la necesidad de limpieza entre pases. Esta transición de un proceso manual a uno semiautomático no solo facilitaría la labor del soldador, sino que también garantizaría un cordón más homogéneo, con menor nivel de defectos internos y un mejor acabado superficial en la junta a tope.

- Se logró documentar con éxito la especificación del procedimiento de soldadura (**WPS**) bajo los criterios técnicos del código **ASME B31.3** (American Society of Mechanical Engineers, 2023), asegurando el seguimiento de las variables esenciales y no esenciales requeridas para la unión de tubería **ASTM A106 Grado B**. El documento consolidado define con precisión los parámetros operativos para el proceso **SMAW**, incluyendo la selección de materiales de aporte **AWS E6010** y **E7010** con sus respectivos números **F (F-3)** y números **A (A-1)**. Esta formalización garantiza que el procedimiento de soldadura sea repetible y cumpla con los estándares de calidad exigidos por la normativa internacional para tuberías de proceso bajo presión.

- La elaboración del **WPS** permitió establecer un plan de trabajo claro para la ejecución de la junta a tope con diseño en "**V**", especificando tolerancias críticas como el ángulo de ranura y la abertura de raíz de raíz. Al documentar variables como el espesor de pared y los diámetros de electrodo de electrodo, se disminuye la improvisación técnica durante la fase de taller. Se concluye que el diseño detallado de la junta y la instrucción de limpieza inicial y entre pases son elementos fundamentales integrados en el documento para prevenir defectos como inclusiones de escoria y asegurar la integridad mecánica de la soldadura.

- Se concluye que el ensayo de inmersión en una solución de salmuera durante un periodo continuo de **30 días** reprodujo con éxito las condiciones de agresividad química características de un entorno marino real sobre la junta soldada. La exposición prolongada propició el desarrollo macroscópico de óxidos superficiales y un ataque severo por picaduras localizadas, especialmente concentradas en la interfaz de la unión. Este resultado valida el diseño metodológico del ensayo electroquímico a escala de laboratorio, demostrando que un lapso de **30 días** es mecánicamente suficiente para activar los mecanismos de corrosión por cloruros y evaluar de forma cualitativa y cuantitativa la vulnerabilidad de los aceros estructurales de tubería.

- Los resultados del ensayo de corrosión permitieron comprobar de manera concluyente las partes vulnerables de las zonas de la soldadura ante agentes marinos, sirviendo como base directa para explicar las alteraciones mecánicas observadas en el perfil de microdureza. El ataque químico severo y la difusión de iones cloruro en las regiones metalúrgicas modificadas por el calor no solo promovieron la pérdida de material por picaduras, sino que interactuaron directamente con los campos de tensiones residuales de la junta. Esto confirma que el ensayo en salmuera no solo simula un daño estético o superficial, sino que altera la integridad microestructural profunda de la Zona Afectada por el Calor (**ZAT**), induciendo los fenómenos de endurecimiento localizado y microfragilización analizados.

- Se logró caracterizar con éxito la microestructura de las tres zonas críticas de la unión soldada antes y después de la interacción con el medio agresivo mediante microscopía óptica, lo que permitió correlacionar las fases metalúrgicas con los mecanismos de daño. Antes de la exposición, se identificó la transición desde una estructura equiaxial en el material base hasta una red refinada y acicular en el cordón, pasando por el crecimiento de

grano en la **ZAT**. Tras la exposición a cloruros, las micrografías evidenciaron que la degradación no ocurre de forma homogénea, sino mediante un mecanismo de corrosión por picaduras intergranulares que ataca preferencialmente los límites de grano y las zonas con desajustes cristálicos inducidos por el ciclo térmico, validando ópticamente el agrietamiento local y la pérdida de integridad en la interfaz de la junta.

- A partir de las variaciones observadas en las micrografías ópticas, se concluye la necesidad de optimizar las etapas de preparación superficial de las probetas en futuros ensayos, específicamente en los procesos de desbaste y pulido espejado. El análisis de las imágenes demostró que pequeñas imperfecciones en la planicidad o la presencia de microrayas limitan la nitidez del enfoque microscópico a altos aumentos (como a 500x y 1000x), lo que puede enmascarar el inicio de micropicaduras o dificultar la delimitación exacta de fases como la perlita y la ferrita. Incrementar el control en el pulido final con alúmina o pasta de diamante garantizará superficies planas, incrementando la calidad en el procesamiento digital de imágenes para una cuantificación más exacta del área corroída.

- Se observó que los resultados obtenidos demuestran que la exposición a un medio con presencia de iones cloruro afecta significativamente el comportamiento de las juntas soldadas, promoviendo mecanismos de corrosión localizada principalmente en forma de picaduras. Aunque el área corroída cuantificada mediante ImageJ correspondió únicamente al 0.995% de la superficie analizada, la identificación de 78 puntos críticos puso en evidencia una alta susceptibilidad del material a procesos de degradación localizada.

- La cuantificación del área corroída se realizó mediante análisis digital de imágenes, utilizando segmentación por niveles de intensidad para identificar los productos de corrosión superficial y calcular el porcentaje de área afectada respecto al área total del material analizado.

- Por medio de la evaluación microestructural se permitió establecer que las modificaciones inducidas por el ciclo térmico de soldadura influyen directamente en la resistencia a la corrosión de la junta. Mientras que la muestra sin exposición a cloruros presento una microestructura estable compuesta por ferrita, perlita y partículas dispersas de carburos de hierro, la muestra expuesta evidencio irregularidades en los límites de grano, perdida

de definición de las fases microestructurales, formación de cavidades y discontinuidades asociadas al ataque corrosivo. La zona afectada por el calor (**ZAT**) se identificó como la región más vulnerable debido al crecimiento de grano y a la heterogeneidad microestructural generada durante la soldadura, confirmando que la interacción entre las condiciones de exposición y las transformaciones microestructurales determina el desempeño y la durabilidad de las juntas soldadas en ambientes salinos.

- La cuantificación de las micrografías permitió evidenciar el efecto de la exposición a la solución con cloruros sobre la superficie del acero ASTM A106 Grado B. La muestra sin inmersión presentó una afectación mínima, con un **área corroída del 0,21 %**, correspondiente a discontinuidades superficiales aisladas. En la muestra expuesta **durante 30 días**, el análisis realizado a **100 aumentos** permitió obtener una evaluación general de la superficie, determinándose un **área corroída aproximada del 1,2 %**. Posteriormente, se efectuó un análisis complementario a **500 aumentos** sobre una región representativa de la muestra, con el propósito de caracterizar con mayor detalle los productos de corrosión y verificar la distribución del ataque localizado. En esta región se obtuvo un **área corroída aproximada del 16,5 %**, resultado **que no representa un incremento de la corrosión por efecto del aumento, sino una cuantificación más detallada de una zona específica** donde la degradación superficial pudo observarse con mayor resolución. En conjunto, ambos análisis confirmaron que la exposición al medio con cloruros favoreció el desarrollo de corrosión localizada sobre la superficie del acero.

12. BIBLIOGRAFÍA

Alfonso Ciendúa, H. A., y Bernal Aponte, K. D. (2026). Evaluación de la aptitud para el servicio de una tubería con corrosión por picadura mediante la aplicación de la norma API 579-1/ASME FFS-1 (Fitness For Service), Apartado 6 [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

American Petroleum Institute. (2021). API Standard 1104: Welding of pipelines and related facilities (22nd ed.). American Petroleum Institute.

American Society of Mechanical Engineers. (2023). ASME B31.3: Process piping. ASME.

American Society of Mechanical Engineers. (2023). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX: Welding, brazing, and fusing qualifications. ASME.

American Society of Mechanical Engineers. (2023). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Article 9: Visual examination. ASME.

American Welding Society. (2020). AWS D1.1/D1.1M:2020: Structural welding code—Steel. American Welding Society.

ASTM International. (2016). Standard specification for carbon structural steel (ASTM A36/A36M-16). ASTM International. https://www.astm.org/a0036_a0036m-16.html.

ASTM International. (2021). ASTM G31-21: Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals. ASTM International. https://doi.org/10.1520/G0031-21

ASTM International. (2025). ASTM E112-25: Standard test methods for determining average grain size. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0112-25

Báquero Hernández, N., y Páez López, C. E. (2024). Evaluación de la aptitud para el servicio de una tubería con defecto tipo abolladura mediante la aplicación de la norma API 579-1/ASME FFS-1, Apartado 12 [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

Flores, C. E. (s.f.). Soldadura al arco eléctrico SMAW (Boletín Electrónico No. 08). Universidad Rafael Landívar. http://www.url.edu.gt/publicaciones.

Geary, W. (2013). Analysis of a corrosion under insulation failure in a carbon steel refinery hydrocarbon line. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 1(4), 249–256. https://doi.org/10.1016/j.csefa.2013.09.001.

Hernández-Leos, R., Pérez-Quiroz, J. T., Martínez, M., Torres, J., Castañeda, F., Morales, J., & Antaño, R. (2019). Corrosion evaluation of the welded zone between carbon steel and stainless steel embedded in concrete and exposed

to a marine-like environment. International Journal of Electrochemical Science, 14, 5690–5706. https://doi.org/10.20964/2019.06.45.

International Organization for Standardization. (2022). ISO 17639:2022. Destructive tests on welds in metallic materials—Macroscopic and microscopic examination of welds. ISO.

López López, O. J. (2026). Evaluación de la tasa de corrosión de tuberías API 5L grado 52 con protección catódica de corriente impresa [Monografía de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

Lozano Marín, J. K., y Pérez Bernal, C. E. (2024). Análisis metalográfico de microdureza en una unión soldada de acero inoxidable martensítico AISI 420 y acero AISI/SAE 4340 con diferentes postratamientos térmicos [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

Niebles, E. E., & Arnedo, W. G. (2009). Procedimientos de soldadura y calificación de soldadores: una propuesta de enseñanza y guía de aplicación para la industria. Información Tecnológica, 20(3), 19–30. https://doi.org/10.4067/S0718-07642009000300004.

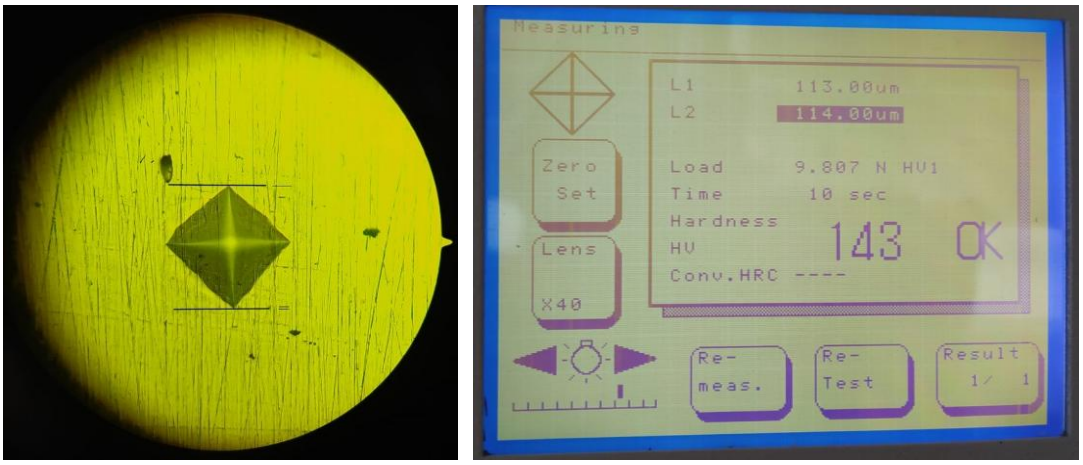
Ochoa Varela, D. F., y Cuesta Hinestroza, Y. A. (2025). Evaluación de la tasa de corrosión en tuberías de intercambiadores de calor ASTM A 106 Grado B con protección catódica operados con agua de mar [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital.

Prawoto, Y. (2013). Synergy of erosion and galvanic effects of dissimilar steel welding: Field failure analysis case study and laboratory test results. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 25(1), 59–64. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2011.12.002.

Vinoth Jebaraj, A., Ajaykumar, L., Deepak, C. R., & Aditya, K. V. V. (2017). Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications - A recent review. Journal of Advanced Research, 8(3), 183–199. https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.002.

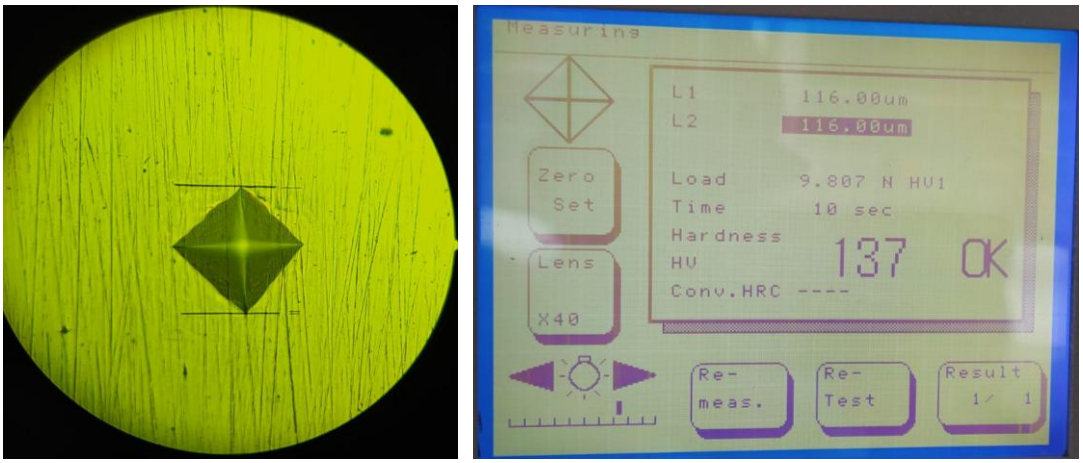
13. ANEXOS

Microdureza 2 probeta sin cloruro de la zona material base.



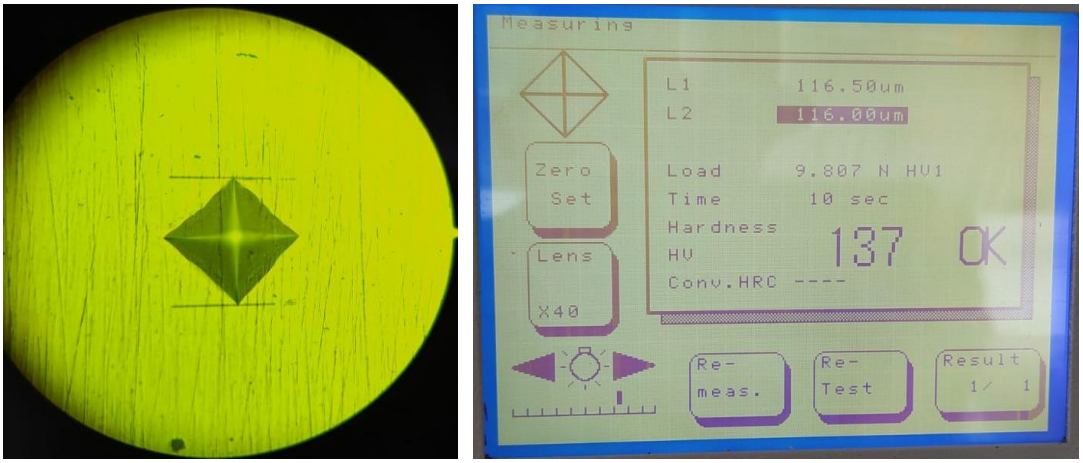
Fuente: Propia.

Microdureza 3 probeta sin cloruro de la zona material base.



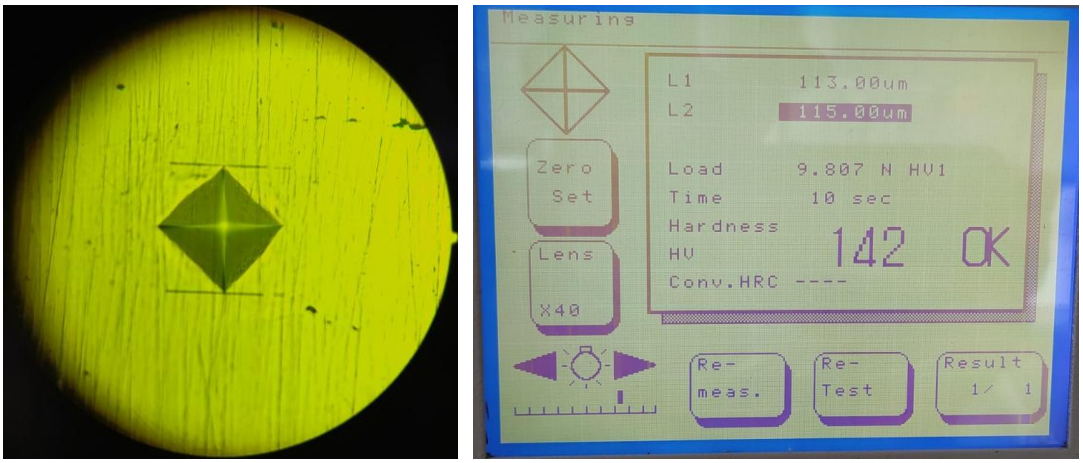
Fuente: Propia.

Microdureza 4 probeta sin cloruro de la zona material base.



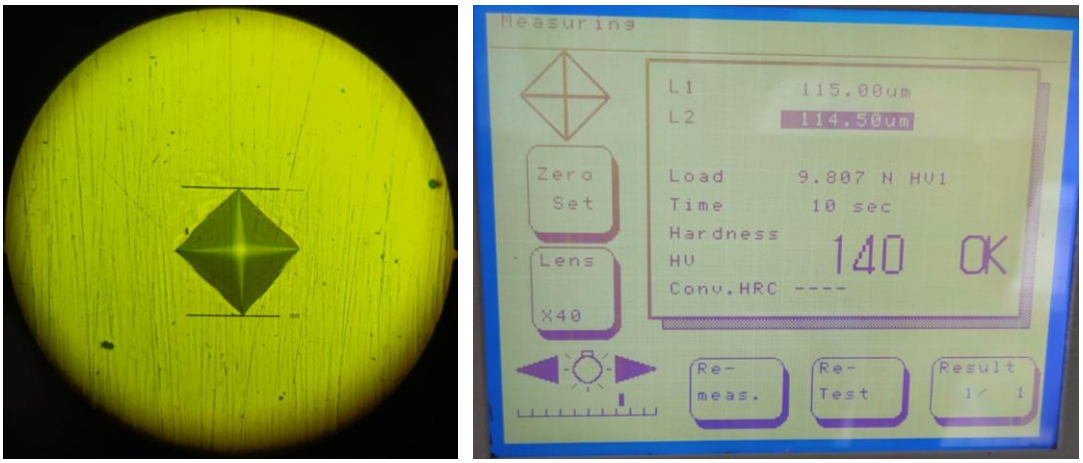
Fuente: Propia.

Microdureza 5 probeta sin cloruro de la zona material base.



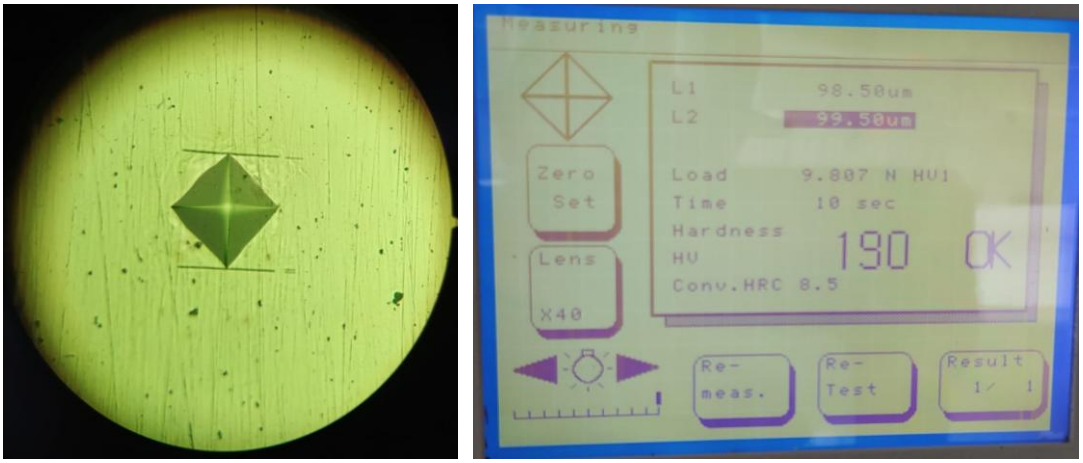
Fuente: Propia.

Microdureza 6 probeta sin cloruro de la zona material base.



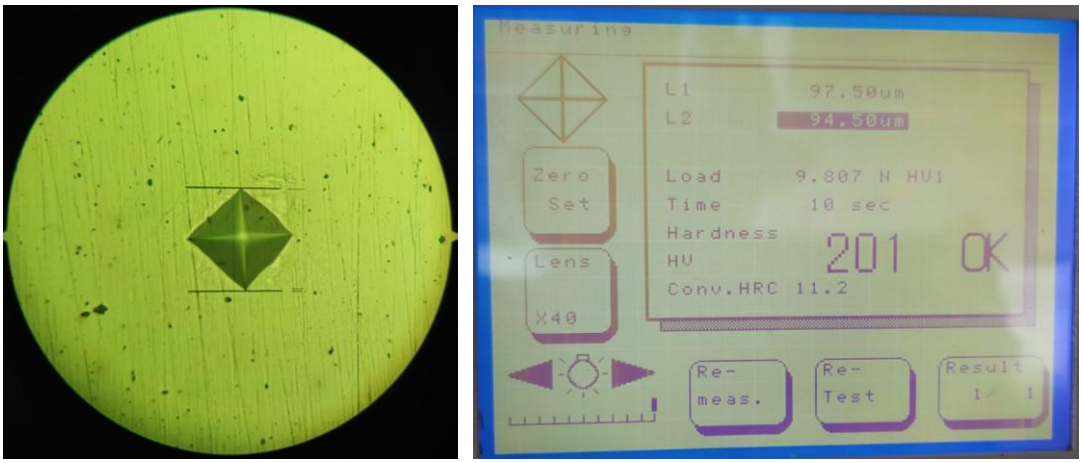
Fuente: Propia.

Microdureza 2 probeta sin cloruro de la zona del cordón.



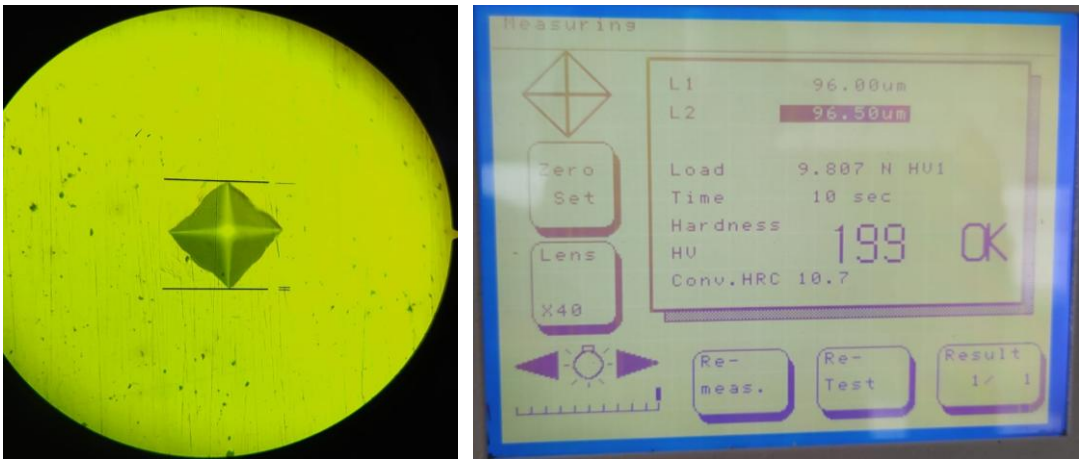
Fuente: Propia.

Microdureza 3 probeta sin cloruro de la zona del cordón.



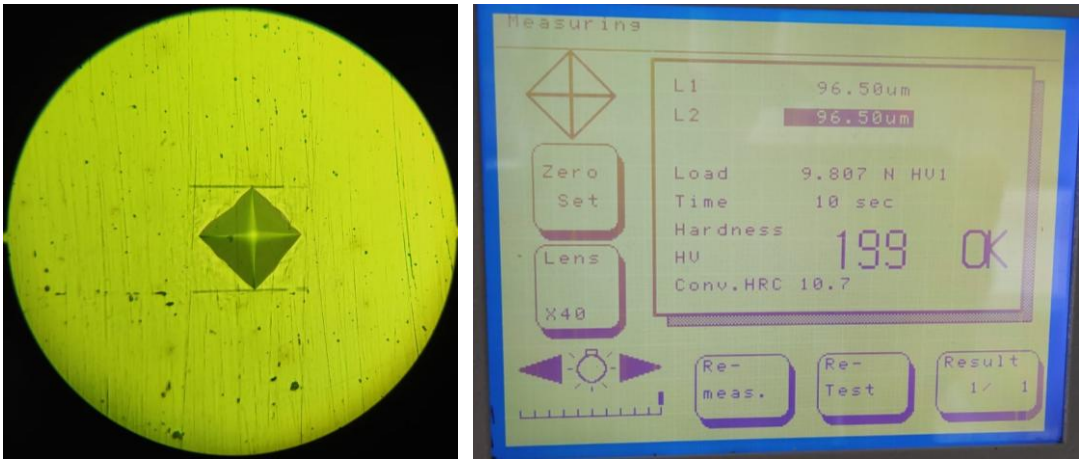
Fuente: Propia.

Microdureza 4 probeta sin cloruro de la zona del cordón.



Fuente: Propia.

Microdureza 5 probeta sin cloruro de la zona del cordón.



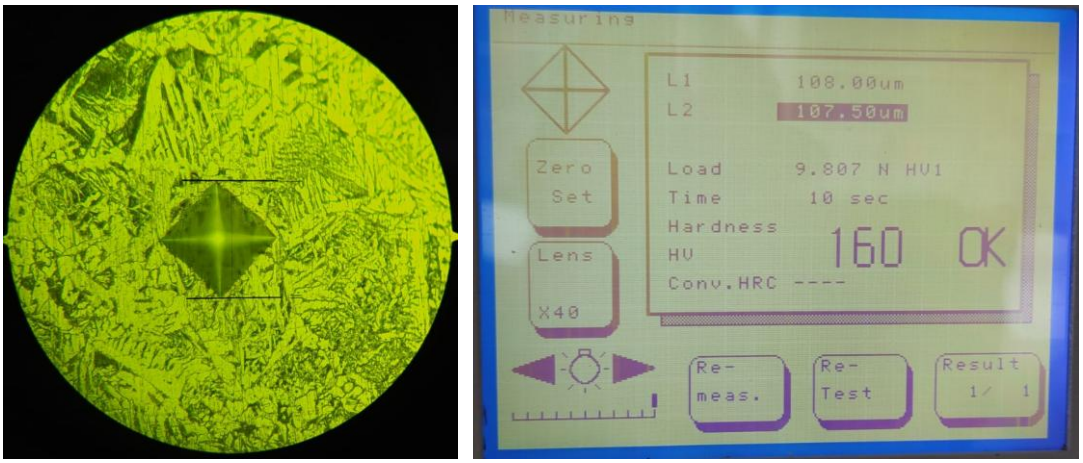
Fuente: Propia.

Microdureza 6 probeta sin cloruro de la zona del cordón.



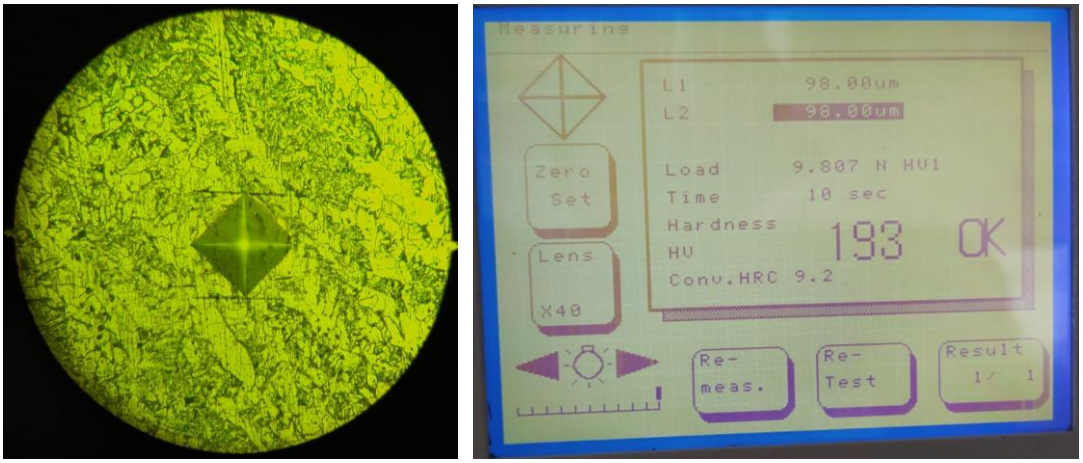
Fuente: Propia.

Microdureza 2 probeta sin cloruro de la zona afectada.



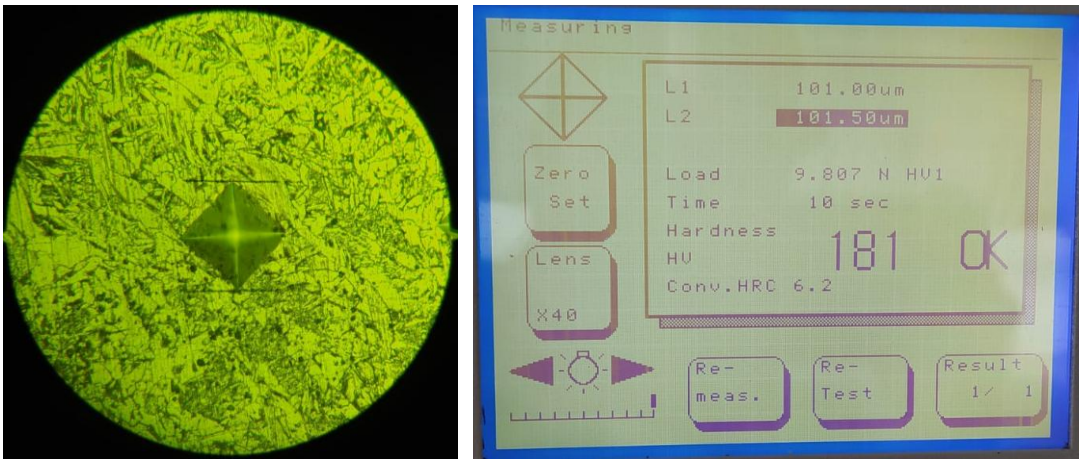
Fuente: Propia.

Microdureza 3 probeta sin cloruro de la zona afectada.



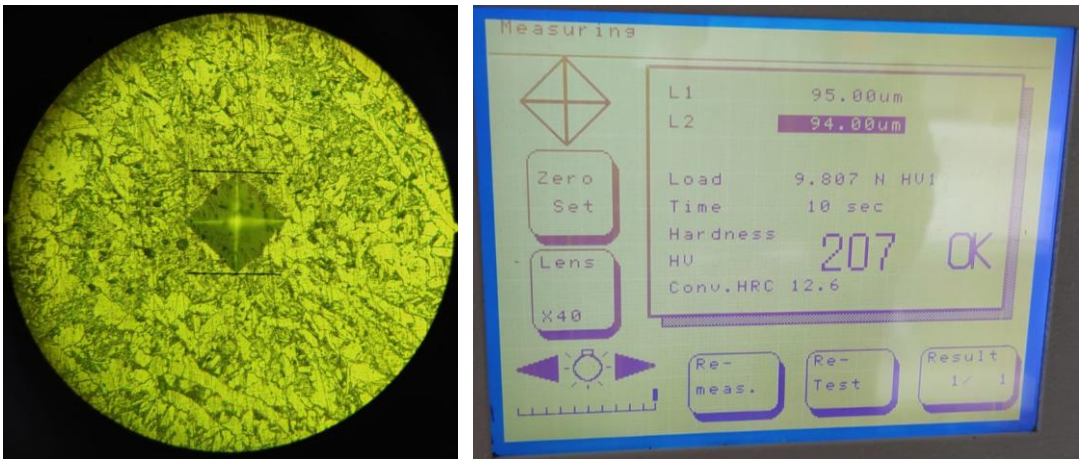
Fuente: Propia.

Microdureza 4 probeta sin cloruro de la zona afectada.



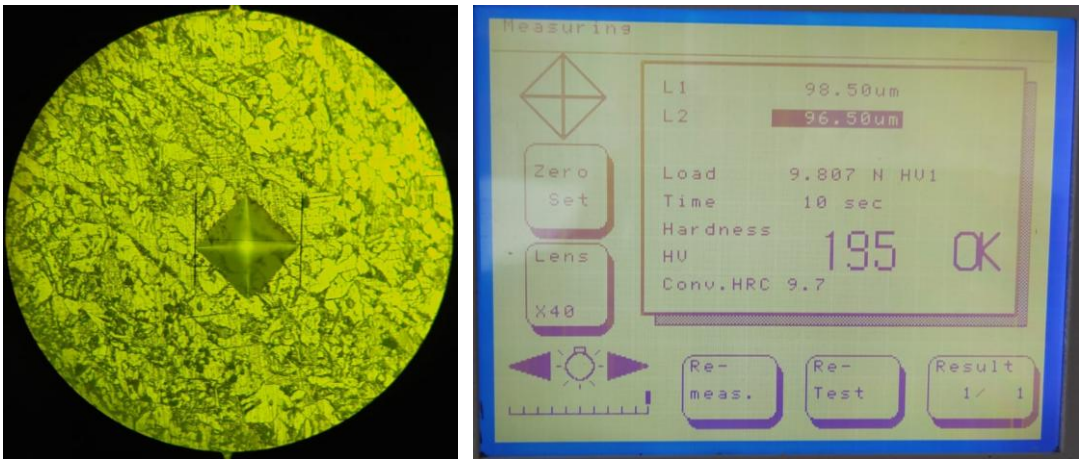
Fuente: Propia.

Microdureza 5 probeta sin cloruro de la zona afectada.



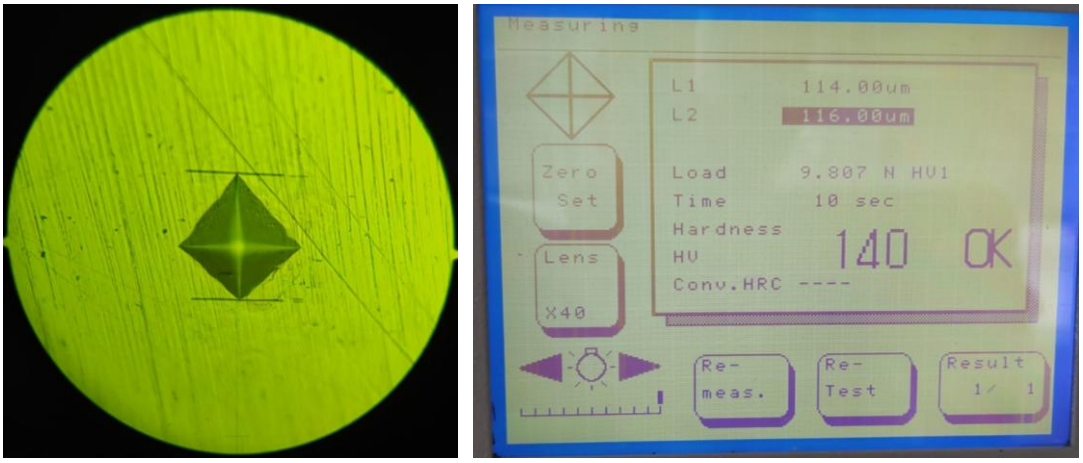
Fuente: Propia.

Microdureza 6 probeta sin cloruro de la zona afectada.



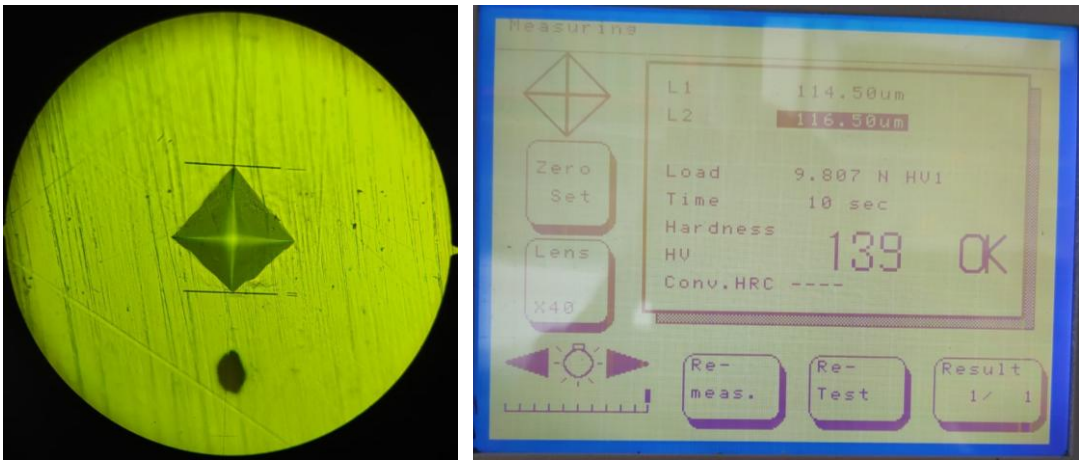
Fuente: Propia.

Microdureza 2 probeta con cloruro de la zona material base.



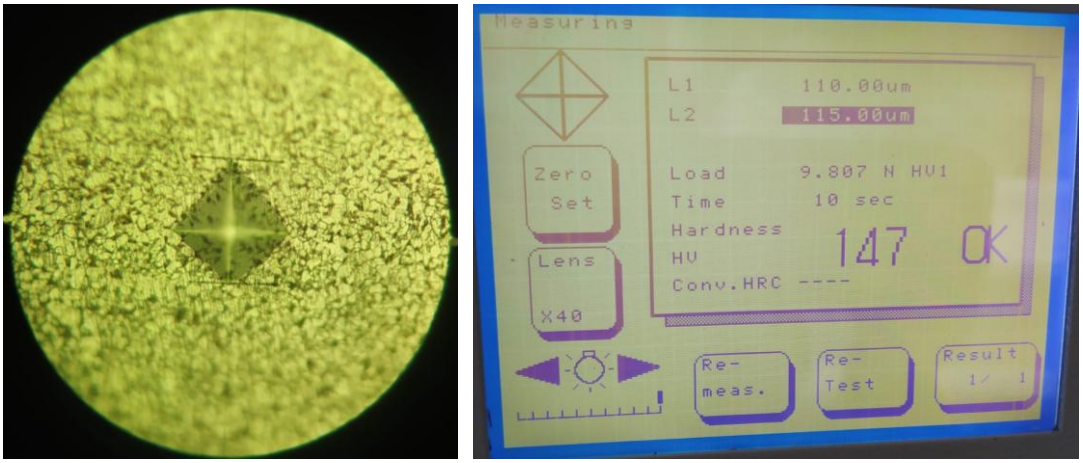
Fuente: Propia.

Microdureza 3 probeta con cloruro de la zona material base.



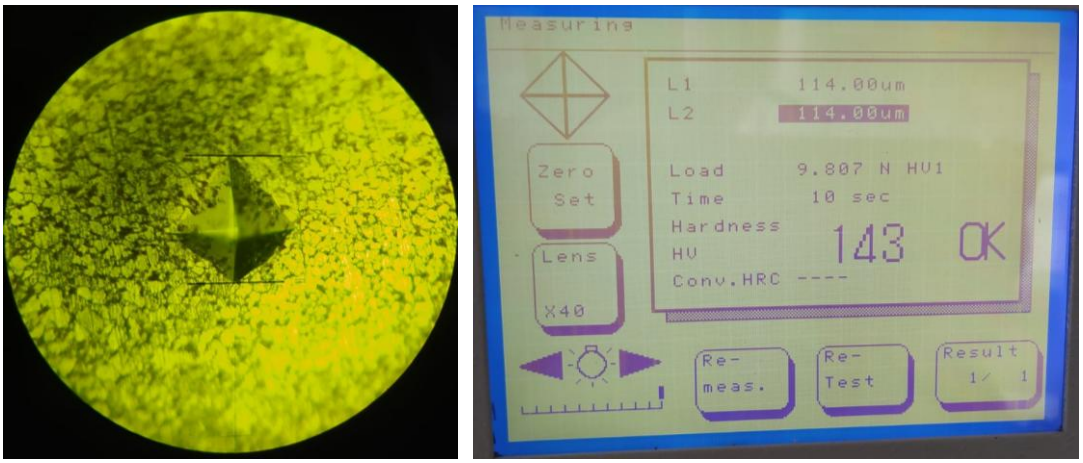
Fuente: Propia.

Microdureza 4 probeta con cloruro de la zona material base.



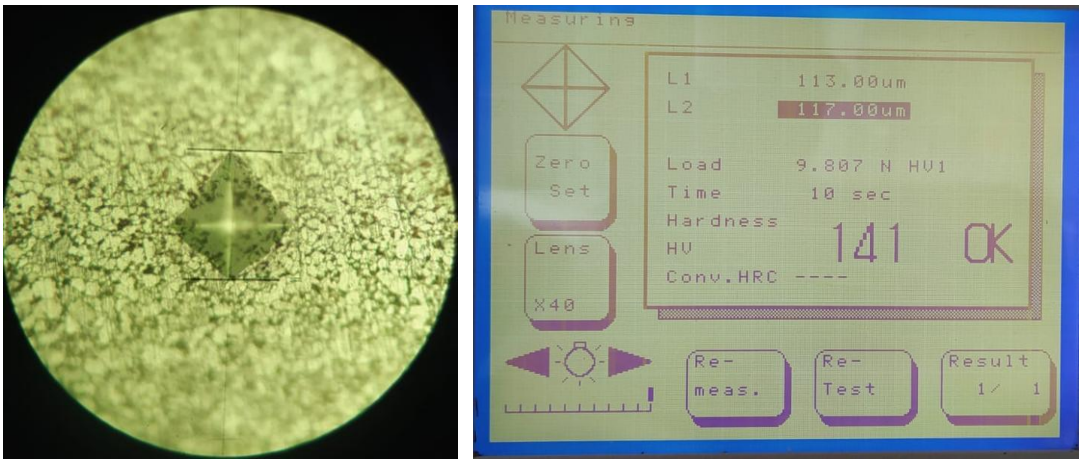
Fuente: Propia.

Microdureza 5 probeta con cloruro de la zona material base.



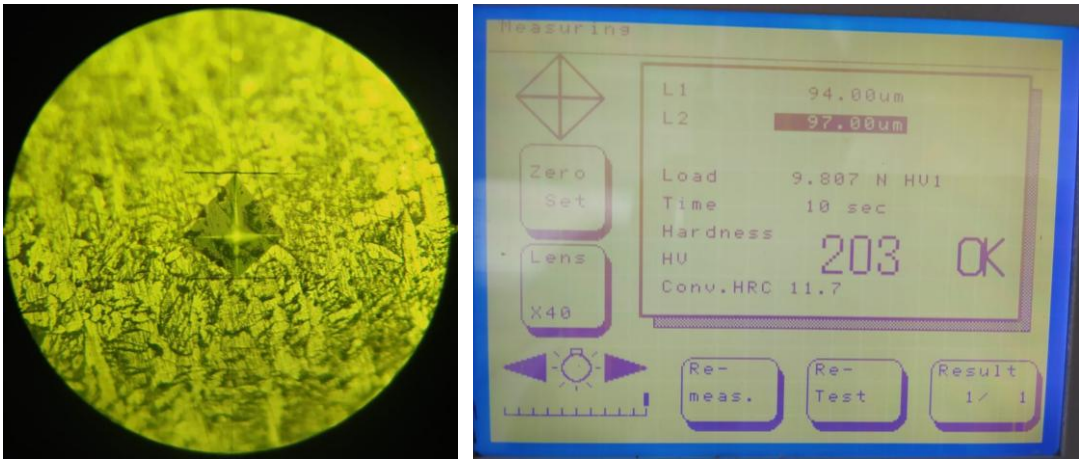
Fuente: Propia.

Microdureza 6 probeta con cloruro de la zona material base.



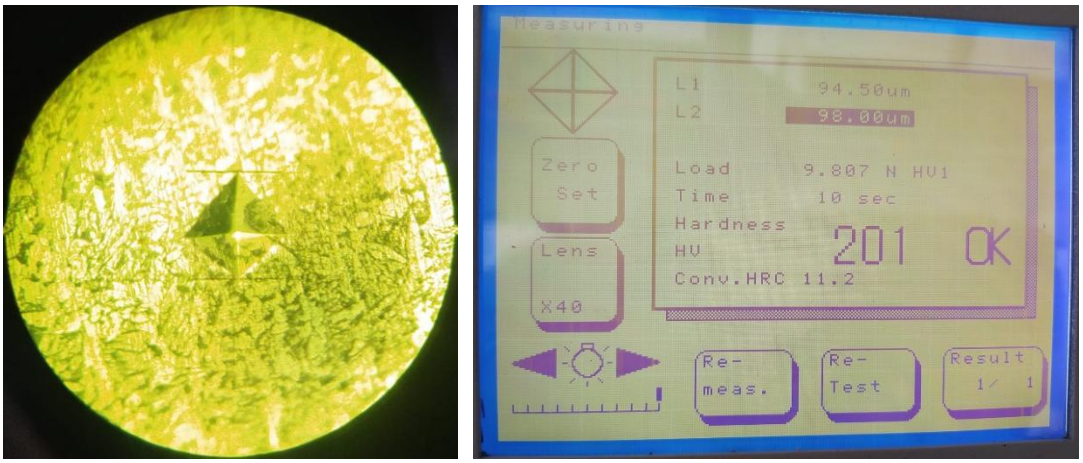
Fuente: Propia.

Microdureza 2 probeta con cloruro de la zona del cordón.



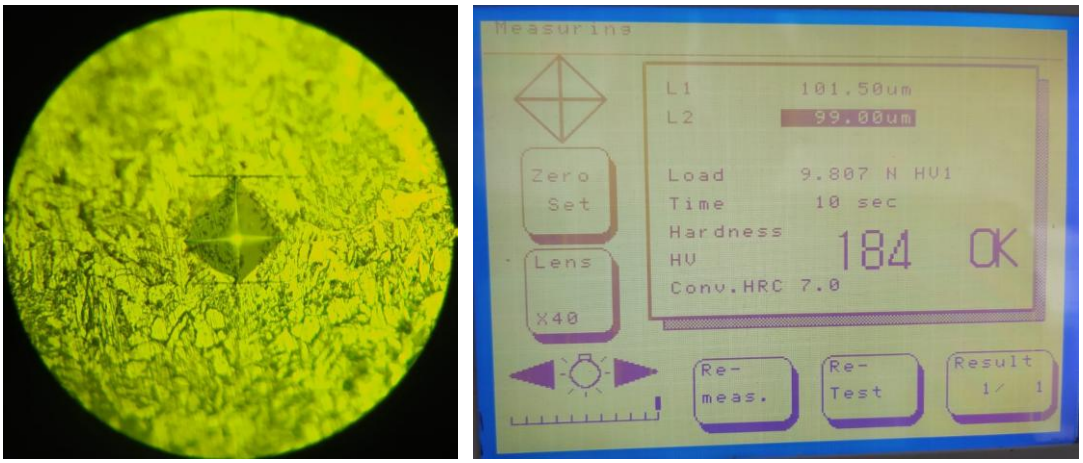
Fuente: Propia.

Microdureza 3 probeta con cloruro de la zona del cordón.



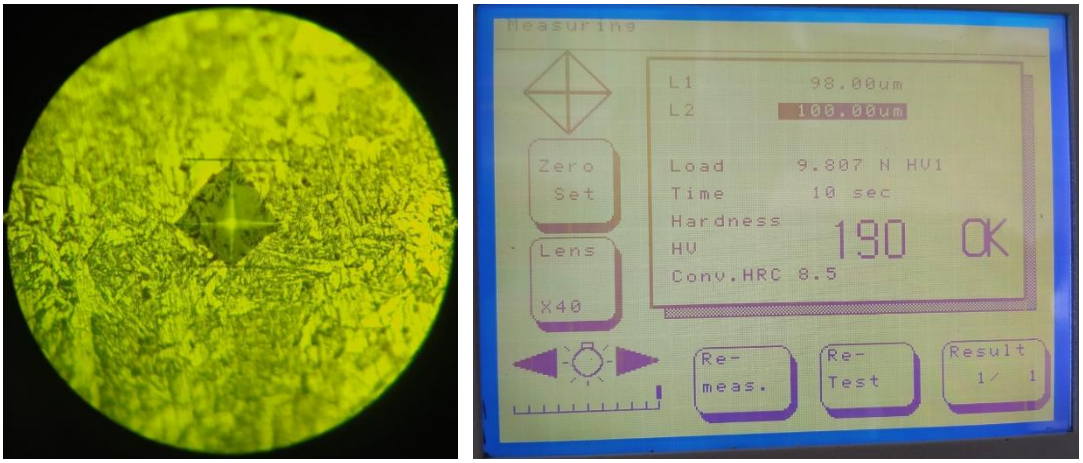
Fuente: Propia.

Microdureza 4 probeta con cloruro de la zona del cordón.



Fuente: Propia.

Microdureza 5 probeta con cloruro de la zona del cordón.



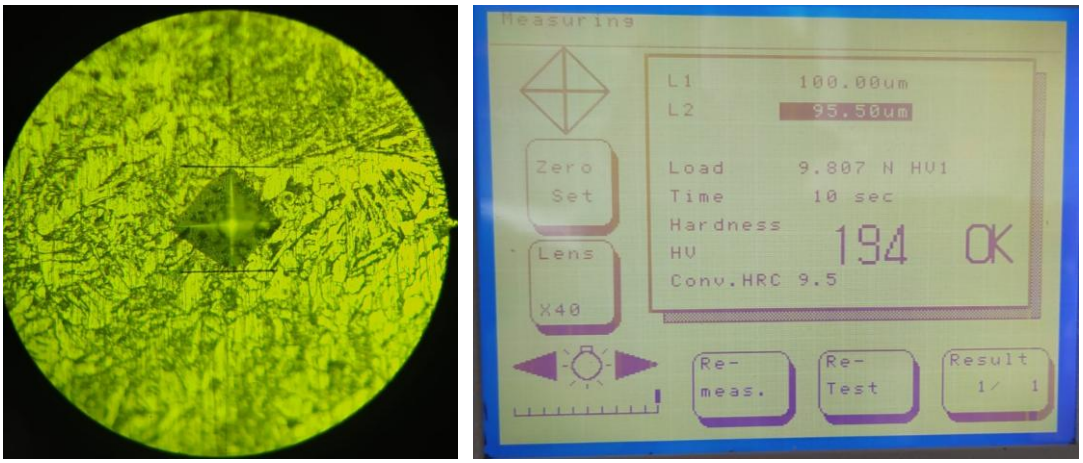
Fuente: Propia.

Microdureza 6 probeta con cloruro de la zona del cordón.



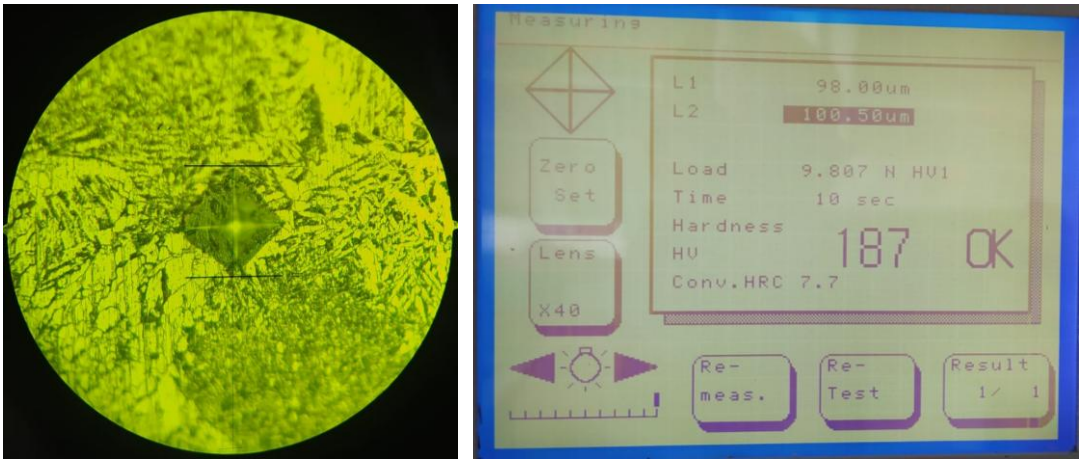
Fuente: Propia.

Microdureza 2 probeta con cloruro de la zona afectada.



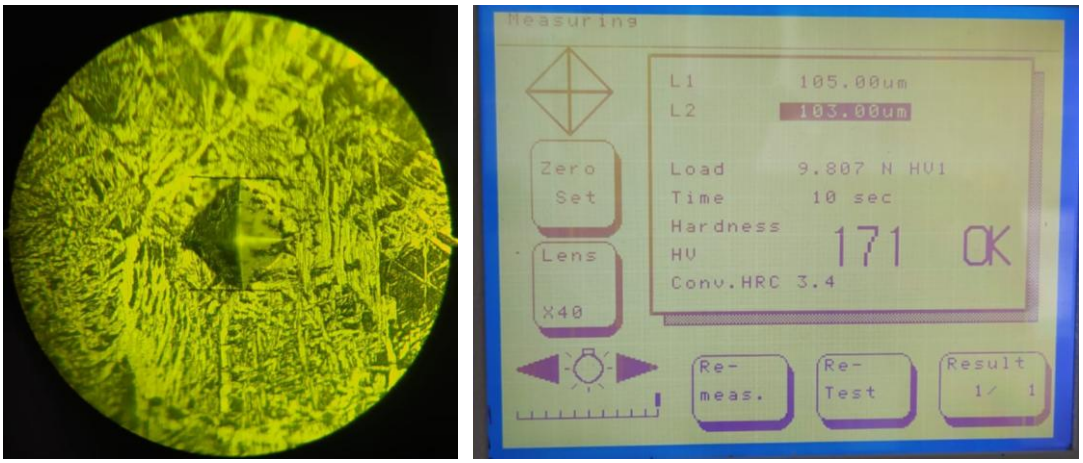
Fuente: Propia.

Microdureza 3 probeta con cloruro de la zona afectada.



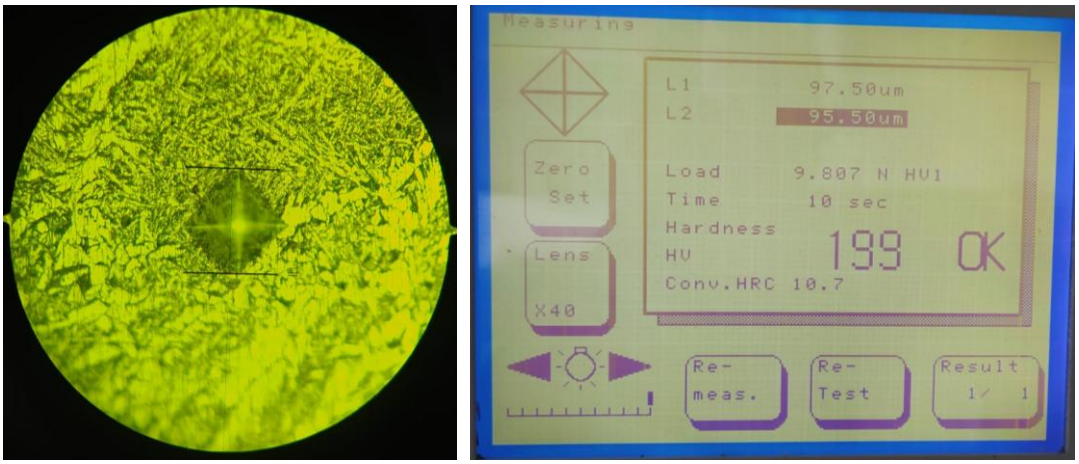
Fuente: Propia.

Microdureza 4 probeta con cloruro de la zona afectada.



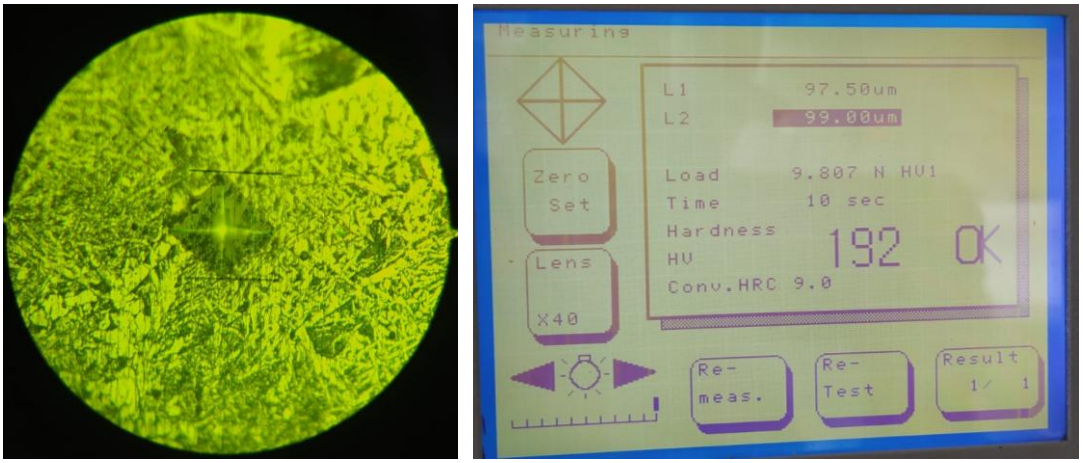
Fuente: Propia.

Microdureza 5 probeta con cloruro de la zona afectada.



Fuente: Propia.

Microdureza 6 probeta con cloruro de la zona afectada.



Fuente: Propia.

- Formato del WPS: wps para anexar documento.xlsx