

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**Influencia de la Temperatura de Pre calentamiento de Soldadura en las**

**Propiedades Mecánicas del acero API 5L PSL2 X70M**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico**

**AUTOR:**

Bach. Edgar André Mendoza Castillo

**ASESOR:**

Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

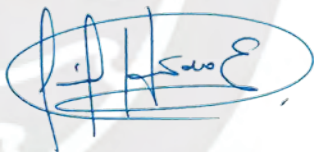
Lima, marzo, 2025

## Informe de Similitud

Yo, **RAÚL CARLOS HURTADO ESPEJO**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO DE SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO API 5L PSL2 X70M**, del autor **EDGAR ANDRÉ MENDOZA CASTILLO**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **17%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **17/03/2025**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 17 de Marzo de 2025.

Apellidos y nombres del asesor: HURTADO ESPEJO, RAÚL CARLOS	
DNI: 10610827	Firma 
ORCID: 0000-0002-8511-1767	

## Resumen

El presente estudio abarca el análisis de la influencia de la temperatura de precalentamiento del acero API PSL2 X70M mediante los ensayos de caracterización del material y procedimiento de soldadura bajo la norma API 1104. En la primera parte del estudio se comprueba mediante ensayos mecánicos los requerimientos exigidos por la especificación del acero. Luego, una vez realizado la verificación del material, se procede a soldar según los lineamientos de la norma API 1104 y analizar posteriormente a través de ensayos mecánicos los cumplimientos de esta normativa.

En los ensayos de caracterización, se encontró que todos los valores están acorde a los rangos indicados por la especificación del material base. Asimismo, al ensayar las tuberías soldadas bajo el API 1104, los resultados obtenidos fueron aceptables según lo establecido por la norma.

Se pudo determinar que los valores de dureza del material base obtenidos al soldar desde la temperatura ambiente hasta los 120°C respetan los rangos exigidos por la API 1104.

Finalmente, se puede concluir que es posible soldar este acero API PSL2 X70M de ultra bajo carbono a temperatura ambiente y cumplir con los criterios de aceptación indicados en la norma API 1104. Esto ayudará a optimizar recursos en tiempo y costos del proyecto donde esté involucrado el material ya que no será necesario invertir energía para precalentar el acero.

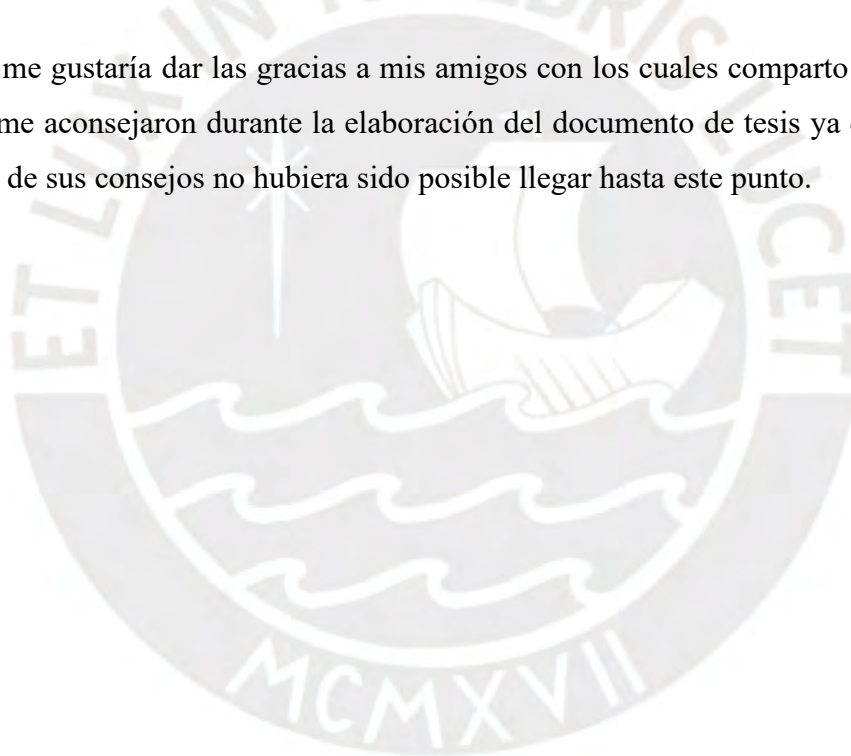
## Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia, por darme el soporte en todo momento para lograr todos mis objetivos que he ido trazando en mi vida. Sin ellos no habría sido posible llegar hasta esta instancia.

Por otro lado, quisiera dar las gracias a mi asesor el profesor Raúl Hurtado por siempre brindarme su ayuda en la revisión del presente documento. La paciencia y dedicación que mostró me ayudaron a poder finalizar el presente documento.

Asimismo, agradezco a todo el personal tanto de la empresa SOLDEXA donde se elaboraron los cupones de soldadura como a todo el personal del laboratorio de material PUCP.

Finalmente, me gustaría dar las gracias a mis amigos con los cuales comparto la misma carrera que me aconsejaron durante la elaboración del documento de tesis ya que sin la recopilación de sus consejos no hubiera sido posible llegar hasta este punto.



## Índice de Contenido

Resumen .....	i
Agradecimientos .....	ii
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tablas.....	viii
Introducción.....	1
Objetivos.....	2
Capítulo 1: Marco teórico .....	3
1.1. Aceros para gasoductos.....	3
1.1.1. Aceros HSLA.....	4
1.1.2. Aceros API 5L.....	5
1.1.3. Metalografía del acero .....	6
1.1.4. Requerimientos para la composición del material base .....	8
1.1.5. Requerimientos mecánicos del material base .....	9
1.1.5.1. Requerimientos para el ensayo de tracción del material base.....	9
1.1.5.2. Requerimientos para el ensayo de impacto del material base.....	10
1.1.5.3. Requerimientos para el ensayo de dureza del material base.....	10
1.2. Soldabilidad .....	11
1.2.1. Carbono equivalente .....	11
1.2.1.1. Fórmula propuesta por el IIW.....	12
1.2.1.2. Fórmula utilizada por el AWS D1.1 .....	13
1.2.1.3. Fórmula de Düren.....	13
1.2.2. Fisuración en caliente .....	13
1.2.3. Fisuración en frío .....	15
1.2.3.1. Fórmula de Yurioka.....	17
1.2.4. Temperatura de precalentamiento.....	17
1.2.4.1. Método del Instituto Internacional de Soldadura.....	18
1.2.4.2. Método de Seferian.....	20
1.2.4.3. Método del CET (SEW 088) .....	21
1.3. Tiempo de enfriamiento $t_{8/5}$ .....	22
1.4. Procesos de unión.....	23
1.4.1. Soldadura .....	23
1.4.1.1. Soldadura tipo SMAW .....	26

1.4.1.2.	Soldadura tipo GMAW.....	28
1.4.1.3.	Soldadura tipo GTAW.....	29
1.5.	Código API 1104.....	31
1.5.1.	Variables esenciales.....	31
1.6.	Calificación de WPS.....	32
1.6.1.	Ensayos de inspección visual.....	32
1.6.2.	Ensayos de radiografía industrial.....	32
1.6.3.	Ensayos mecánicos.....	34
1.6.3.1.	Ensayo de tracción.....	34
1.6.3.2.	Ensayo de doblado.....	35
1.6.3.3.	Ensayo de Nick Break.....	36
1.6.3.4.	Ensayo de impacto Charpy.....	36
1.6.3.5.	Ensayo de dureza.....	37
Capítulo 2:	Métodos experimentales.....	38
2.1.	Caracterización del metal base.....	38
2.1.1.	Ensayo de composición química del acero.....	38
2.1.2.	Ensayo metalográfico del acero.....	39
2.1.3.	Ensayo de tracción del acero.....	40
2.1.4.	Ensayo de impacto del acero.....	41
2.1.5.	Ensayo de dureza del acero.....	42
2.2.1.	Cupón de prueba.....	50
2.2.2.	Inspección visual.....	50
2.2.4.	Doblado.....	53
2.2.5.	Dureza.....	56
2.2.7.	Nick Break.....	61
2.2.8.	Metalografía.....	64
Capítulo 3:	Evaluación y Discusión de resultados.....	68
3.1.	Análisis de resultados de los ensayos de caracterización.....	68
3.1.1.	Ensayo de composición química del material base.....	68
3.1.2.	Ensayo de metalografía del material base.....	68
3.1.3.	Ensayo de Tracción del material base.....	69
3.1.4.	Ensayo de impacto del material base.....	70
3.1.5.	Ensayo de dureza del material base.....	70
3.2.	Análisis de resultados de los ensayos de WPS.....	72

3.2.1.	Inspección Visual.....	72
3.2.2.	Metalografía de la soldadura.....	74
3.2.3.	Tracción.....	79
3.2.4.	Doblado.....	87
3.2.5.	Dureza.....	90
3.2.5.1.	Dureza muestras M1.....	96
3.2.5.2.	Dureza muestras M2.....	98
3.2.5.3.	Dureza muestras M3.....	100
3.2.6.	Impacto.....	102
3.2.7.	Nick Break.....	105
CONCLUSIONES.....		107
RECOMENDACIONES.....		108
BIBLIOGRAFÍA.....		109



## Índice de Figuras

Figura 1. Tuberías para el transporte de gas .....	3
Figura 2. Planchas de acero HSL .....	4
Figura 3. Microestructura de un acero HSLA, con perlita alargada .....	5
Figura 4. Tuberías API 5L PSL .....	6
Figura 5. Metalografía del material base en aumento 100X sin ataque .....	7
Figura 6. Metalografía del material base en aumento 100X con ataque Nital 2% .....	7
Figura 7. Metalografía del material base en aumento 500X con ataque Nital 2% .....	8
Figura 8. Diagrama de Graville .....	12
Figura 9. Fisuración en caliente .....	14
Figura 10. Fisuración en frío .....	15
Figura 11. Triángulo de Fisuración en frío .....	16
Figura 12. Pre calentamiento en tubería. ....	17
Figura 13. IBT según tipo de junta .....	18
Figura 14. Tubería API 5L PSL2 X70M .....	18
Figura 15. Temperatura de pre calentamiento según IIW .....	20
Figura 16. Soldadura en taller SOLDEXA .....	23
Figura 17. Cupones terminados .....	24
Figura 18. Soldadura tipo SMAW .....	26
Figura 19. Equipamiento para soldadura SMAW .....	27
Figura 20. Soldadura tipo GMAW .....	28
Figura 21. Equipamiento soldadura GMAW .....	28
Figura 22. Soldadura tipo GTAW .....	29
Figura 23. Equipamiento para soldadura GTAW .....	30
Figura 24. Inspección visual .....	32
Figura 25. Ensayo de radiografía industrial .....	33
Figura 26. Máquina de ensayo de tracción .....	34
Figura 27. Máquina de doblado .....	35
Figura 28. Máquina de ensayo de impacto Charpy .....	36
Figura 29. Equipo de ensayo de dureza Vickers .....	37
Figura 30. Máquina para ensayo químico Q8 MAGELLAN .....	38
Figura 31. Probeta ensayo químico .....	39
Figura 32. Dimensiones para ensayo metalográfico .....	40
Figura 33. Probeta de ensayo de tracción .....	40
Figura 34. Dimensiones probeta tracción .....	41
Figura 35. Dimensiones para ensayo de impacto Charpy .....	41
Figura 36. Retazos de tubería API 5L PSL2 X70M .....	42
Figura 37. Material de aporte .....	48
Figura 38. Ubicación de las probetas para ensayos del WPS .....	49
Figura 39. Cupón de soldadura .....	50

Figura 40. Inspección visual .....	50
Figura 41. Probeta para ensayo a la tracción .....	51
Figura 42. Probetas de Tracción .....	52
Figura 43. Preparación de probetas de Tracción.....	52
Figura 44. Probetas de tracción acondicionadas .....	53
Figura 45. Plano para probeta de doblado .....	54
Figura 46. Ensayos de doblado API 1104.....	54
Figura 47. Lente graduado .....	55
Figura 48. Fisura observada con lente graduado .....	55
Figura 49. Locación de las indentaciones .....	56
Figura 50. Distancia entre puntos de muestra.....	57
Figura 51. Ubicación para el ensayo de impacto Charpy .....	58
Figura 52. Equipo para entalle BLACKS CHARPY .....	60
Figura 53. Probetas con entalla para ensayo de impacto .....	60
Figura 54. Plano de ensayo Nick Break.....	61
Figura 55. Preparación de probetas Nick Break .....	62
Figura 56. Ensayo Nick Break por API 1104 .....	62
Figura 57. Cortadora metalográfica LECO SX-100M.....	64
Figura 58. Briquetadora BUEHLER.....	65
Figura 59. Muestra encapsuladas sin pulir.....	65
Figura 60. Pulidora STRUERS .....	66
Figura 61. Muestra para metalografía pulida.....	66
Figura 62. Microscopio óptico.....	67
Figura 63. Curva de alargamiento.....	69
Figura 64. Microestructura a Tamb con aumento 100X.....	74
Figura 65. Microestructura a Tamb con aumento 500X.....	75
Figura 66. Microestructura a 60°C con aumento 100X.....	75
Figura 67. Microestructura a 60°C con aumento 500X.....	76
Figura 68. Microestructura a 90°C con aumento 100X.....	76
Figura 69. Microestructura a 90°C con aumento 500X.....	77
Figura 70. Microestructura a 120°C con aumento 100X.....	77
Figura 71. Microestructura a 120°C con aumento 500X.....	78
Figura 72. Resultados ensayos de Tracción a Tamb.....	80
Figura 73. Resultados ensayos de Tracción a 60°C.....	81
Figura 74. Resultados ensayos de Tracción a 90°C.....	82
Figura 75. Resultados ensayos de Tracción a 120°C.....	83
Figura 76. Fisuración probeta DL-2.1 a temperatura ambiente.....	88
Figura 77. Fisuración de probeta DL-2.2 a temperatura 60°C.....	88
Figura 78. Gráficas de dureza M1 a distintas temperaturas.....	96
Figura 79. Gráficas de dureza M2 a distintas temperaturas.....	98
Figura 80. Gráficas de dureza M3 a distintas temperaturas.....	100
Figura 81. Gráficas de impacto Charpy a distintas temperaturas .....	103

## Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química de aceros PSL2 .....	8
Tabla 2. Requerimientos del ensayo a la tracción.....	9
Tabla 3. Requerimientos del ensayo de impacto .....	10
Tabla 4. Número de ensayos para el WPS .....	49
Tabla 5. Probetas de impacto del WPS a ensayar .....	59
Tabla 6. Resultados del ensayo químico .....	68
Tabla 7. Resultados ensayo de tracción del material base .....	69
Tabla 8. Resultados ensayo de impacto del material base .....	70
Tabla 9. Resultados análisis de dureza del material base .....	70
Tabla 10. Tabla de conversión para aceros no austeníticos .....	71
Tabla 11. Ensayos de inspección visual del WPS.....	73
Tabla 12. Resultados del ensayo de tracción del WPS .....	79
Tabla 13. Probetas de tracción ensayadas del WPS.....	84
Tabla 14. Probetas de doblado ensayadas del WPS.....	87
Tabla 15. Resultados de dureza para el WPS M1 (temperatura ambiente y 60°C) .....	90
Tabla 16. Resultados de dureza para el WPS M1 (temperatura 90°C y 120°C).....	91
Tabla 17. Resultados de dureza para el WPS M2 (temperatura ambiente y 60°C) .....	92
Tabla 18. Resultados de dureza para el WPS M2 (temperatura 90°C y 120°C).....	93
Tabla 19. Resultados de dureza para el WPS M3 (temperatura ambiente y 60°C) .....	94
Tabla 20. Resultados de dureza para el WPS M3 (temperatura 90°C y 120°C).....	95
Tabla 21. Resultados de impacto para el WPS (temperatura ambiente y 60°C) .....	102
Tabla 22. Resultados de impacto para el WPS (temperatura 90°C y 120°C).....	102
Tabla 23. Resultados del ensayo a la rotura del WPS.....	105

## Introducción

El Perú es un país con una gran cantidad de recursos energéticos entre los que destaca el gas natural. En el año 2001 se inició la construcción del Gasoducto de Camisea que logró conectar al principal yacimiento de gas natural del país, ubicado en las Malvinas (Cusco), con el Distrito de Lurín (Lima). Por lo tanto, estableció, a través de su recorrido, una conexión entre los departamentos: Cusco, Ayacucho, Huancavelica, Ica y Lima. Además, como en todo proyecto, es necesario efectuar un mantenimiento de la obra para evitar accidentes que puedan poner en riesgo la integridad de las personas y el medio ambiente. Esto se podrá lograr con la obtención de toda la información necesaria acerca de los diversos materiales empleados en la ejecución de la obra. Entre los más importantes destacan las tuberías de acero API 5L PSL2 X70, empleada ampliamente durante la ejecución del proyecto. Las tuberías del gasoducto son unidas con el proceso de soldadura, siendo la temperatura de precalentamiento una de sus variables más importantes. Existen varios métodos de cálculo teórico de la temperatura de precalentamiento, sin embargo, cuando se realizan los trabajos de soldadura en campo, a lo largo del recorrido del gasoducto, se atraviesan diversas condiciones climáticas. Estas dependerán de la región donde se encuentre, lo cual, en muchos casos, produce que se efectúe la soldadura por debajo de la temperatura de precalentamiento recomendada. El presente estudio tiene por objetivo determinar la influencia de la temperatura de precalentamiento en las propiedades mecánicas de la tubería de acero API 5L PSL2 X70, con especial énfasis en la dureza y la tenacidad al impacto de la zona afectada por el calor de soldadura. Para lo cual, se soldarán probetas de tubería a diferentes temperaturas de precalentamiento, partiendo de la temperatura ambiente hasta la temperatura de precalentamiento recomendada. La obtención de las propiedades mecánicas, tanto de la tubería como de la junta soldada, se obtendrán mediante ensayos experimentales. Este trabajo pretende contribuir con las buenas prácticas de soldadura proporcionando datos experimentales sobre la influencia de la temperatura de precalentamiento sobre las propiedades mecánicas de la tubería y determinar la mínima temperatura de precalentamiento a la cual se pueda soldar la tubería de manera segura.

## Objetivos

### Objetivo general

- Determinar la influencia de la temperatura de precalentamiento sobre las propiedades mecánicas de una unión soldada de un acero API 5L PSL2 X70M.

### Objetivos específicos

- Determinar mediante ensayos de caracterización si el material en estudio cumple con los valores de esfuerzos mecánicos y composición química según la especificación para aceros API 5L.
- Evaluar mediante ensayos metalográficos la microestructura en el material API 5L PSL2 X70M.
- Evaluar los datos obtenidos a través de los ensayos al acero API 5L PSL2 X70M para determinar la mínima temperatura de precalentamiento a emplear durante la soldadura, la cual permita obtener propiedades mecánicas aceptables.

## Capítulo 1: Marco teórico

### 1.1. Aceros para gasoductos

El gasoducto es el sistema de tuberías exteriores y/o enterradas a través de las cuales se transporta el gas natural. Estas tuberías deberán respetar las propiedades mecánicas que dicta la especificación del material API 5L.

La técnica del transporte por tuberías fue introducida en 1920 cuando surgió la soldadura eléctrica y fue posible la producción de tubos de acero sin costura de gran fortaleza lo que permitió posteriormente la transmisión de volúmenes de gas a altas presiones. Fue diseñada para poder mover inmensas cantidades de gas desde los yacimientos hasta las plantas de tratamiento de la misma para finalmente distribuirla a los hogares y/o estaciones de servicio.

Existen principalmente dos tipos de clase de tubería para transporte de gas: PSL1 y PLS2, siendo esta última diseñada para soportar mayores exigencias mecánicas en campo.

Hoy en día es común encontrar en el mercado diámetros comerciales para las tuberías de gasoductos, entre los cuales se encuentran las de 1/2", 3/4" para uso comúnmente de drenaje y otras de mayores diámetros como 2" en adelante para el transporte de fluidos de procesos (propano, butano, entre otros).



Figura 1. Tuberías para el transporte de gas  
Nota. Tomado de "GasAlbertaInc.", 2023.

### 1.1.1. Aceros HSLA

Los aceros HSLA se desarrollaron en la década de 1960 para gasoductos de diversos diámetros: 1/2", 3/4", 1", 2" entre otros. La tubería utilizada en estos proyectos requería mayor resistencia y tenacidad que el acero al carbono y una buena soldabilidad proporcionada por un equivalente con bajo contenido de carbono.

Los aceros HSLA (High-strength low-alloy steel por sus siglas en inglés) son un tipo de acero al carbono que tiene pequeñas cantidades de elementos aleantes. Además de poder proporcionar una mayor resistencia que el acero al carbono, el acero HSLA también se puede fabricar para que tenga una mayor tenacidad y responda mejor al tratamiento térmico.

El acero HSLA es un material versátil con muchas aplicaciones que pueden beneficiar significativamente la fuerza, tenacidad y resistencia al desgaste y la corrosión. Sin embargo, es esencial sopesar estos beneficios con sus desventajas, como mayor costo, menor capacidad de deformación elástica, técnicas de soldadura especiales y dificultad de mecanizado. El uso de acero HSLA dependerá de las necesidades específicas de su proyecto y de los requisitos de su industria.

Los límites de esfuerzo a la fluencia típicos de los aceros HSLA varían desde 290 MPa a 760 MPa, esfuerzo de tensión en el rango de 410 MPa a 830 MPa. Los aceros HSLA a menudo se producen con estricto control de impurezas (por ejemplo, azufre, fósforo y oxígeno) para mejorar otras propiedades como maleabilidad, resistencia al desgarro laminar y tenacidad.

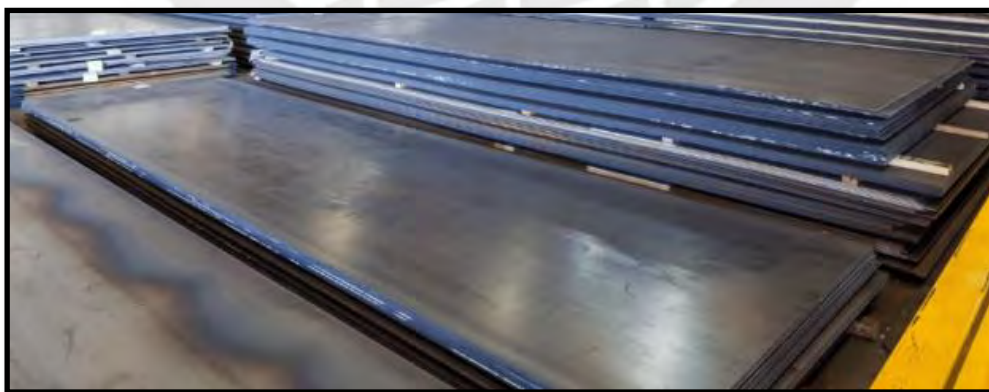


Figura 2. Planchas de acero HSL  
Nota. Tomado de "Kloeckner metals", 2023.

La microestructura del acero HSLA es muy variada y esto dependerá de los porcentajes de elementos aleados que estén presente, asimismo se deberá tener en consideración los

tratamientos térmicos ya que pueden dar lugar a la transformación de ferrita, cementita, perlita, bainita y martensita o incluso hasta de martensita revenida.

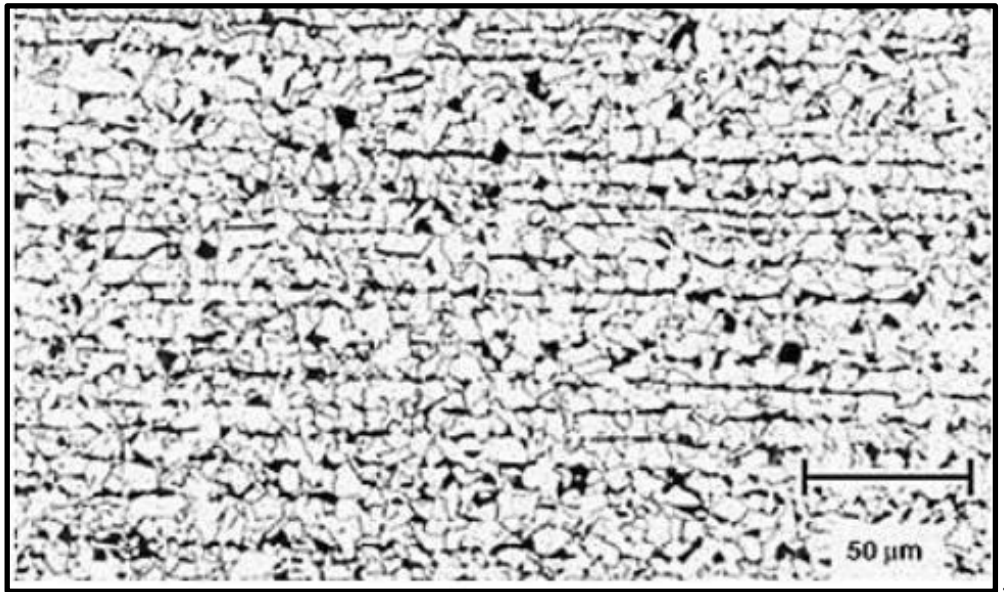


Figura 3. Microestructura de un acero HSLA, con perlita alargada  
Nota. Tomado de "RUBÉN GARCÍA JACOBO"

### 1.1.2. Aceros API 5L

Los aceros para el transporte de gas en la etapa de distribución vienen a ser de 2 tipos: PSL1 y PSL2 como se menciona en la especificación para aceros API 5L. El primer grupo de tipos de aceros para transporte de gas cubre las demandas estándar en operación. Por otro lado, los PSL2 están diseñados para condiciones más críticas ya que está diseñada para condiciones de esfuerzo más demandantes, es por ello que su composición química varía en relación a los PS1. La tubería de acero API 5L incluye diferentes grados de acero, los cuales generalmente son Grado B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 y X80. A mayor grado en el acero, mejores propiedades mecánicas.



Figura 4. Tuberías API 5L PSL  
Nota. Tomado de “OCTA”, 2023

### 1.1.3. Metalografía del acero

La metalografía es el estudio de la microestructura de los metales y aleaciones, a menudo mediante microscopía. El análisis metalográfico es esencial para comprender las propiedades mecánicas de los materiales, incluido su tamaño de grano y la presencia de defectos como grietas o inclusiones no metálicas. En metalografía, la superficie de una muestra de metal se prepara mediante varios pasos (incluidos corte, montaje, pulido y grabado) para revelar la microestructura del metal. Luego se analiza mediante microscopía óptica o electrónica, para identificar la microestructura del metal, esto permite inferir sobre las propiedades que tendrá el material. Para el caso en estudio, será importante visualizar mediante un ensayo metalográfico la microestructura del metal para poder determinar el grado del material.

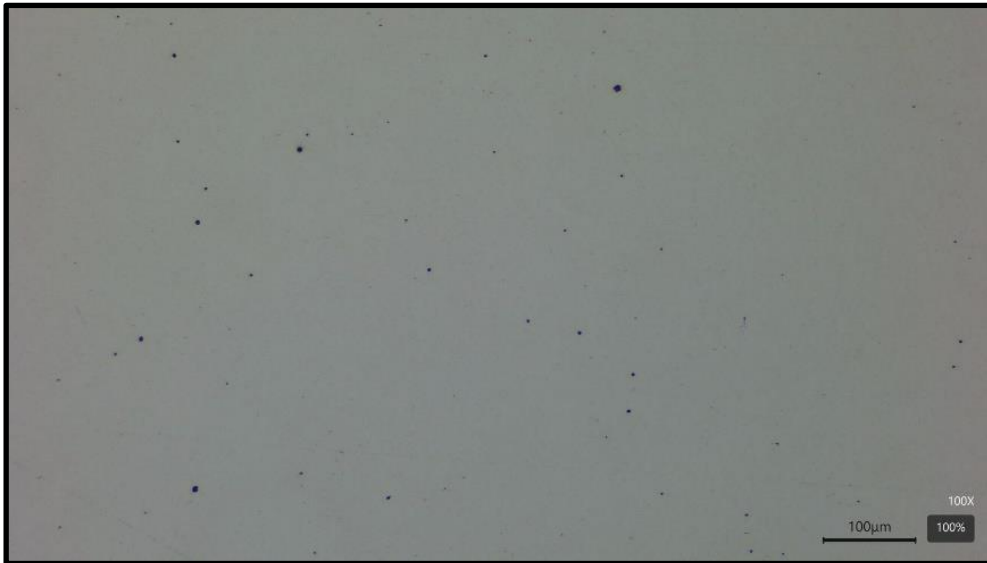


Figura 5. Metalografía del material base en aumento 100X sin ataque  
Nota. Fuente propia



Figura 6. Metalografía del material base en aumento 100X con ataque Nital 2%  
Nota. Fuente propia



Figura 7. Metalografía del material base en aumento 500X con ataque Nital 2%  
Nota. Fuente propia.

#### 1.1.4. Requerimientos para la composición del material base

Como ya se comentó líneas arriba, los aceros API 5L poseen diversos grados entre los cuales está el X70M. A continuación, se muestra una tabla con las diferencias en la composición química entre un acero X70 clase PLS1 y uno de clase PLS2.

Tabla 1. Composición química de aceros PSL2

Aceros PSL2 (espesor $\leq 25$ mm)									
Grado del acero	C <sup>b</sup>	Si	Mn <sup>b</sup>	P	S	V	Nb	Ti	Otros
Tubería soldada									
X70M	0.12 <sup>f</sup>	0.45 <sup>f</sup>	1.7 <sup>f</sup>	0.025	0.015	g	g	g	h,l
<b>Notas:</b> b. Por cada reducción del 0,01 % por debajo del máximo especificado para C, se requiere un aumento del 0,05 % por encima del máximo especificado para Mn permisible, hasta un máximo de 1,65 % para grados $\geq$ L245 o B, pero $\leq$ L360 o X52; hasta un máximo del 1,75 % para las calificaciones $>$ L360 o X52, pero $<$ L485 o X70; hasta un máximo de 2,00 % para grados $\geq$ L485 o X70, pero $\leq$ L555 o X80; y hasta un máximo del 2,20 % para grados $>$ L555 o X80. f. Salvo indicación contraria. g. Salvo acuerdo contrario, Nb + V + Ti $\leq$ 0,15 %. h. Salvo acuerdo contrario, Cu $\leq$ 0,50 %; Ni $\leq$ 0,50 %; Cr $\leq$ 0,50 % y Mo $\leq$ 0,50 %. l. Para los grados de tubería PSL 2, excepto aquellos grados a los que ya se aplica la nota al pie j), se aplica lo siguiente: a menos que se acuerde lo contrario, no se permite la adición intencionada de B y la cantidad de B residual deberá ser B $\leq$ 0,001 %.									

Nota. Tomado de Especificación API 5L 2018.

### 1.1.5. Requerimientos mecánicos del material base

Será de vital importancia conocer las propiedades mecánicas que rigen al material para tener un punto de partida con el cual se podrá comparar posteriormente los resultados de los ensayos mecánicos realizados en el presente estudio.

#### 1.1.5.1. Requerimientos para el ensayo de tracción del material base

De la especificación del material base se obtienen los siguientes valores mostrados a través de la siguiente tabla:

Tabla 2. Requerimientos del ensayo a la tracción

Grado de tubería	Cuerpo de tubería sin costura y soldada						Cordón de soldadura
	Esfuerzo de fluencia <sup>a</sup> R <sub>t0,5</sub> MPa(psi)		Esfuerzo de tracción R <sub>m</sub> MPa(psi)		Proporción <sup>a,c</sup> R <sub>t0,5</sub> / R <sub>m</sub>	Deformación (en 50 mm o 2 pulg.) A <sub>f</sub> %	Esfuerzo de tracción <sup>d</sup> R <sub>m</sub> MPa(psi)
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Máx.	Mín.	Mín.
X70M	485 (70,300)	635 (92,100)	570 (82,700)	760 (110,200)	0.93	f	570 (82,700)

**Notas:**

<sup>a</sup> Para grados intermedios, la diferencia entre el límite elástico máximo especificado y el límite elástico mínimo especificado debe ser como se indica en la tabla para el siguiente grado superior, y la diferencia entre la resistencia a la tracción mínima especificada y la el límite elástico mínimo especificado será el que se indica en la tabla para el siguiente grado superior; para grados intermedios hasta grado L320 o X46, la resistencia a la tracción debe ser ≤ 655 MPa (95.000 psi); para grados intermedios superiores al grado L320 o X46 y menor que el grado L555 o X80, la resistencia a la tracción debe ser ≤ 760 MPa (110,200 psi); para grados intermedios superiores a Grado L555 o X80, la resistencia a la tracción máxima permitida se obtendrá por interpolación; para unidades SI, el valor calculado se redondeará a los 5 MPa más próximos; para las unidades USC, el valor calculado se redondeará a los 100 psi más cercanos.

<sup>c</sup> Este límite se aplica a tuberías con D > 323,9 mm (12,750 pulg.).

<sup>d</sup> Para grados intermedios, la resistencia a la tracción mínima especificada para la costura de soldadura debe ser el mismo valor que se determinó para el cuerpo de la tubería utilizando la nota a pie de página a).

<sup>f</sup> El alargamiento mínimo especificado, A<sub>f</sub>, se determinará mediante la siguiente ecuación:

$$A_f = C * \frac{A_{xc}^{0.2}}{U^{0.9}}$$

dónde:

C es 1940 para cálculos usando unidades SI y 625,000 para cálculos usando unidades USC;

A<sub>xc</sub> es el área de la sección transversal de la pieza de ensayo de tracción aplicable, expresada en milímetros cuadrados (pulgadas cuadradas), como sigue:

1) para probetas de sección transversal circular, 130 mm<sup>2</sup> (0,20 pulg. 2) para ensayo de diámetro de 12,7 mm (0,500 pulg.) Y 8,9 mm (0,350 pulg.)

piezas; 65 mm<sup>2</sup> (0,10 pulg. 2) para probetas de 6,4 mm (0,250 pulg.) De diámetro;

2) para probetas de sección completa, el menor de a) 485 mm<sup>2</sup> (0,75 pulg. 2) y b) el área de la sección transversal de la probeta, derivado utilizando el diámetro bts especificado y el espesor de pared especificado de la tubería, redondeado al más cercano

10 mm<sup>2</sup> (0,01 pulg. 2); 3) para tiras de prueba, el menor de a) 485 mm<sup>2</sup> (0,75 pulg.2) y b) el área de la sección transversal de la pieza de prueba, derivada utilizando el ancho especificado de la pieza de prueba y el espesor de pared especificado de la tubería, redondeado a los 10 mm<sup>2</sup> más cercanos (0,01 pulg.2); U es la resistencia a la tracción mínima especificada, expresada en mega pascales (libras por pulgada cuadrada).

Nota. Tomado de Especificación API 5L 2018.

### 1.1.5.2. Requerimientos para el ensayo de impacto del material base

A continuación, se muestra un cuadro con los requerimientos para el ensayo de impacto de tuberías PSL2:

Tabla 3. Requerimientos del ensayo de impacto

Diámetro exterior D (pulg.)	Energía absorbida en ensayo Charpy						
	Mín. J (pie-lbf)						
	Grado						
	≤ L415 o X60	> L415 o X60 hasta ≤ L450 o X65	> L450 o X65 hasta ≤ L485 o X70	> L485 o X70 hasta ≤ L555 o X80	> L555 o X80 hasta ≤ L625 o X90	> L625 o X90 hasta ≤ L690 o X100	> L690 o X100 hasta ≤ L830 o X120
≤ 508 (20.000)	27 (20)	27 (20)	27 (20)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)
> 508 (20.000) hasta 762 (30.000)	27 (20)	27 (20)	27 (20)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)
> 762 (30.000) hasta 914 (36.000)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	54 (40)	54 (40)
> 914 (36.000) hasta 1219 (48.000)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	40 (30)	54 (40)	68 (50)
> 1219 (48.000) hasta 1422 (56.000)	40 (30)	54 (40)	54 (40)	54 (40)	54 (40)	68 (50)	81 (60)
> 1422 (56.000) hasta 2134 (84.000)	40 (30)	54 (40)	68 (50)	68 (50)	81 (60)	95 (70)	108 (80)

Nota. Tomado de Especificación API 5L 2018.

### 1.1.5.3. Requerimientos para el ensayo de dureza del material base

Según la especificación del material en estudio, la dureza en el cuerpo de la tubería deberá ser:

- No mayor a 270 HV10 o menor o igual a 25 HRC para grados de hasta L450 o X65
- No mayor a 300 HV10 o menor o igual a 30 HRC para grados mayores a L450 o X65 y hasta L555 o X80.
- No mayor a 325 HV10 o menor o igual a 33 HRC para grados mayores a L555 o X80.

## 1.2. Soldabilidad

Según la norma ISO 581/80, un acero se considera soldable en un grado pre-fijado, por un procedimiento determinado y para una aplicación específica, cuando mediante una técnica adecuada se pueda conseguir la continuidad metálica de la unión, de tal manera que ésta cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de la cual forma parte.

### 1.2.1. Carbono equivalente

El efecto del contenido total de aleación en un metal se puede expresar en términos de un carbono equivalente (CE). Una fórmula empírica que se puede utilizar según el código estructural AWS-D1.1 para juzgar el riesgo de agrietamiento debajo del cordón en aceros al carbono es el siguiente:

$$CE (\%) = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \dots (1)$$

Existen algunos métodos para medir la soldabilidad mediante el uso del carbono equivalente entre los cuales está el diagrama de Graville. Se utilizan los datos de la tabla 1 para tener una noción general acerca de la soldabilidad del acero API 5L X70M PSL2 utilizando las siguientes expresiones:

Para un  $\%C \leq 0.12\%$ , se considerará la siguiente ecuación:

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \dots (2)$$

Esta expresión es la ecuación Ito-Bessyo para el cálculo del carbón equivalente indicada en la especificación API 5L.

Por otro lado, si  $\%C > 0.12\%$  se deberá utilizar la siguiente ecuación:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \dots (3)$$

De la especificación API 5L, se obtiene un valor de  $CE_{Pcm} = 0.43$ , con este valor se ingresa a diagrama de Graville y se obtiene lo siguiente:

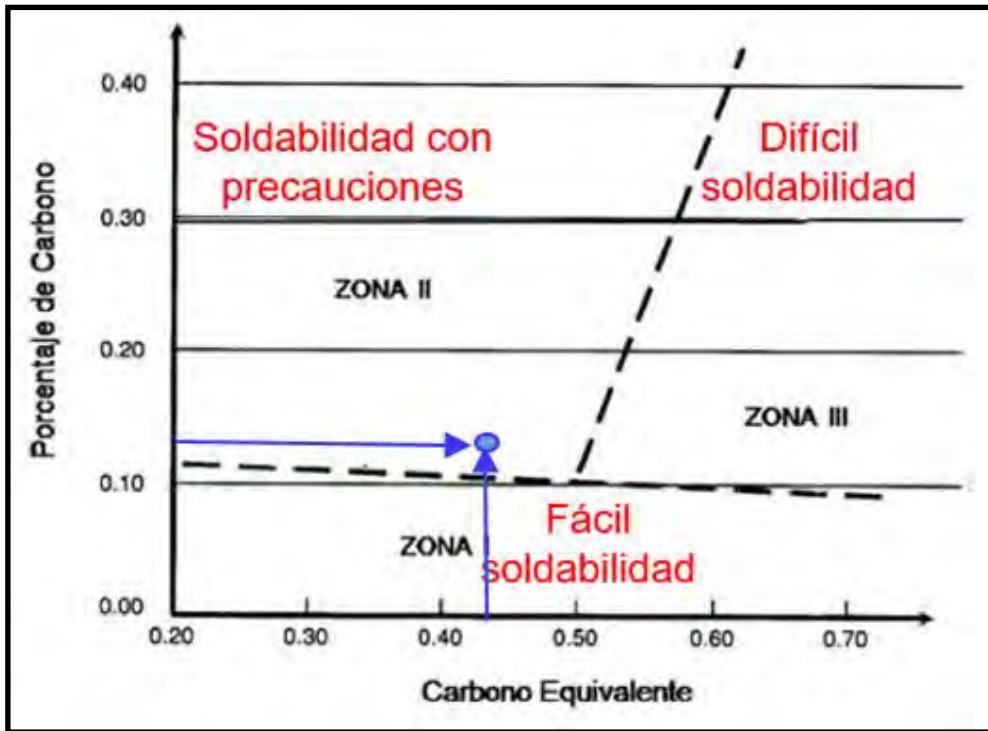


Figura 8. Diagrama de Graville  
Tomado de "METFUSION", por Mónica Salazar, 2013.

Por lo tanto, el punto caerá en la zona II, lo cual indica que el acero es soldable con precauciones.

Asimismo, existen varias fórmulas propuestas para el cálculo del carbono equivalente de las cuales se mencionan algunas de las más relevantes:

#### 1.2.1.1. Fórmula propuesta por el IIW

El Instituto Internacional de Soldadura o IIW (International Institute of Welding), propuso en 1967 oficialmente una fórmula realizada por Dearden y O'Neill's para aceros cuyo porcentaje de carbono es  $C > 0.12$ :

$$CE (\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} + \dots (4)$$

### 1.2.1.2. Fórmula utilizada por el AWS D1.1

Una expresión de parámetro de composición que ayuda a la medición del control del hidrógeno llamada PCM, es calculada mediante la siguiente expresión:

$$P_{CM} (\%) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \dots (5)$$

### 1.2.1.3. Fórmula de Düren

En 1981 se establece una relación para el cálculo del carbono equivalente CE teniendo en cuenta la velocidad de enfriamiento algo mayor tal como ocurre en campo.

$$CE (\%) = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn+Cu}{16} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + \dots (6)$$

Además, el carbono viene a ser una medición de la tendencia a la fisuración al momento de soldar o post soldadura. Según el momento en el que se origina la fisura se reconocen los siguientes casos:

### 1.2.2. Fisuración en caliente

El agrietamiento en caliente ocurre durante la solidificación. A medida que el metal de aporte y la placa base se enfrían, las tensiones aumentan producto de las contracciones durante la transformación en la fase sólida y del enfriamiento del metal. La principal causa es la presencia de constituyentes en la soldadura que tienen una temperatura de fusión relativamente baja y que se acumulan en los límites de grano durante la solidificación.



Figura 9. Fisuración en caliente  
Nota. Tomado de “Scielo”,2015.

El agrietamiento en caliente ocurre cuando el suministro disponible de metal de soldadura líquido es insuficiente para llenar los espacios entre el metal de soldadura solidificado, que se abren por deformaciones por contracción. Por tanto, la fisuración en caliente se produce cuando:

- La tensión en el baño de soldadura es demasiado alta
- El líquido no puede llegar a las regiones donde se necesita debido a un suministro inadecuado o bloqueo/canales estrechos entre los granos en solidificación.
- La temperatura es  $> 1200^{\circ}\text{C}$
- Están presentes impurezas como carbono (C), azufre (S) o fósforo (P).

Para controlar el craqueo en caliente, es necesario manipular los siguientes factores principales:

- Composición del metal de soldadura.
- Patrón de solidificación de soldadura.
- Tensión sobre el metal de soldadura solidificado.
- Agregar manganeso, cromo o molibdeno.

La Fisuración en caliente se puede prevenir mediante el control de diversos aspectos:

- Reducir el aporte de calor.
- Reducir la tensión ejercida sobre el metal de soldadura solidificado.
- Selección de materiales.
- Uso de procedimientos de soldadura y parámetros de soldadura adecuados.

### 1.2.3. Fisuración en frío

Este tipo de agrietamiento ocurre durante el proceso de enfriamiento, posterior a la solidificación del material. Puede ocurrir horas o incluso semanas después de efectuada la unión soldada. Entre las principales causas están la fragilización de la ZAC, formación de tensiones residuales en el cordón de soldadura, fragilización de hidrógeno y la fragilización por envejecimiento.

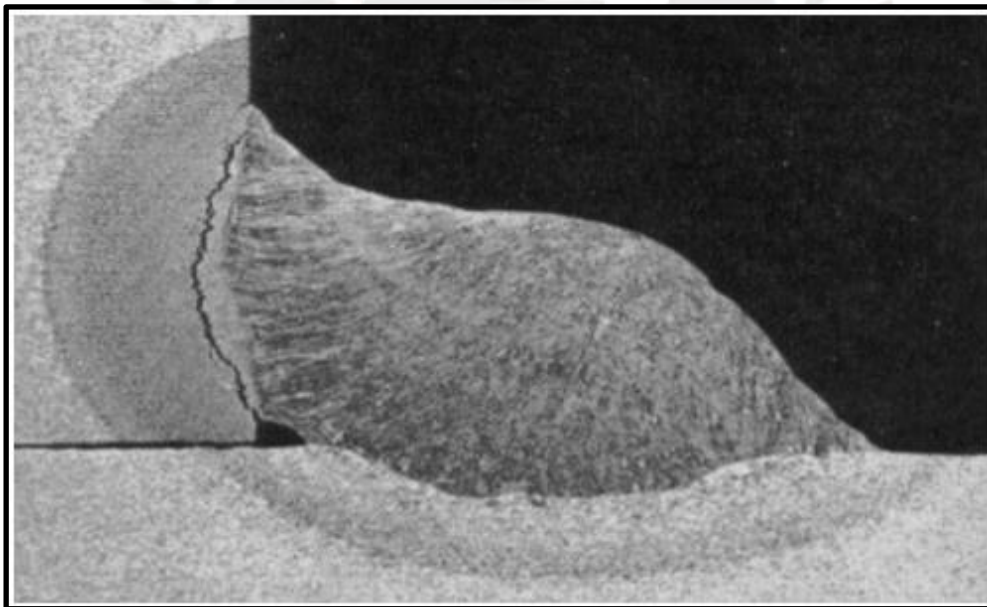


Figura 10. Fisuración en frío  
Nota. Tomado de “WelderDestiny”,2016.

Los materiales más gruesos son más propensos a agrietarse en frío porque el material que no se ve afectado por la energía de la soldadura sirve como disipador de calor, que enfría rápidamente la soldadura y permite que se forme martensita. Además, los aceros con mayores cantidades de carbono tienen más probabilidades de experimentar agrietamiento en frío porque si la cantidad de carbono es incrementada la probabilidad que se forma martensita será mayor.

La Fisuración en frío se produce en última instancia cuando coinciden tres factores:

- Existen esfuerzos de tensión.
- El acero se ha transformado en martensita o microestructuras bainíticas.
- Hay un suministro de hidrógeno en el acero.

Sin embargo, el agrietamiento en frío se puede prevenir controlando los tres factores principales: baja ductilidad, tensión residual e hidrógeno difusible. Por lo tanto, se recomienda tener especial consideración a los puntos:

- Precalentamiento el metal base para reducir la velocidad de enfriamiento de la soldadura. Esto evita la fragilización de la soldadura y elimina el hidrógeno disuelto de la soldadura.
- Prevenir discontinuidades de soldadura para evitar la concentración de tensiones.
- Utilice consumibles de soldadura de bajo contenido de hidrógeno para minimizar la difusión del hidrógeno en la soldadura.

El triángulo de fisuración en frío es un esquema conocido que ayuda a relacionar las causas de este tipo de agrietamiento:

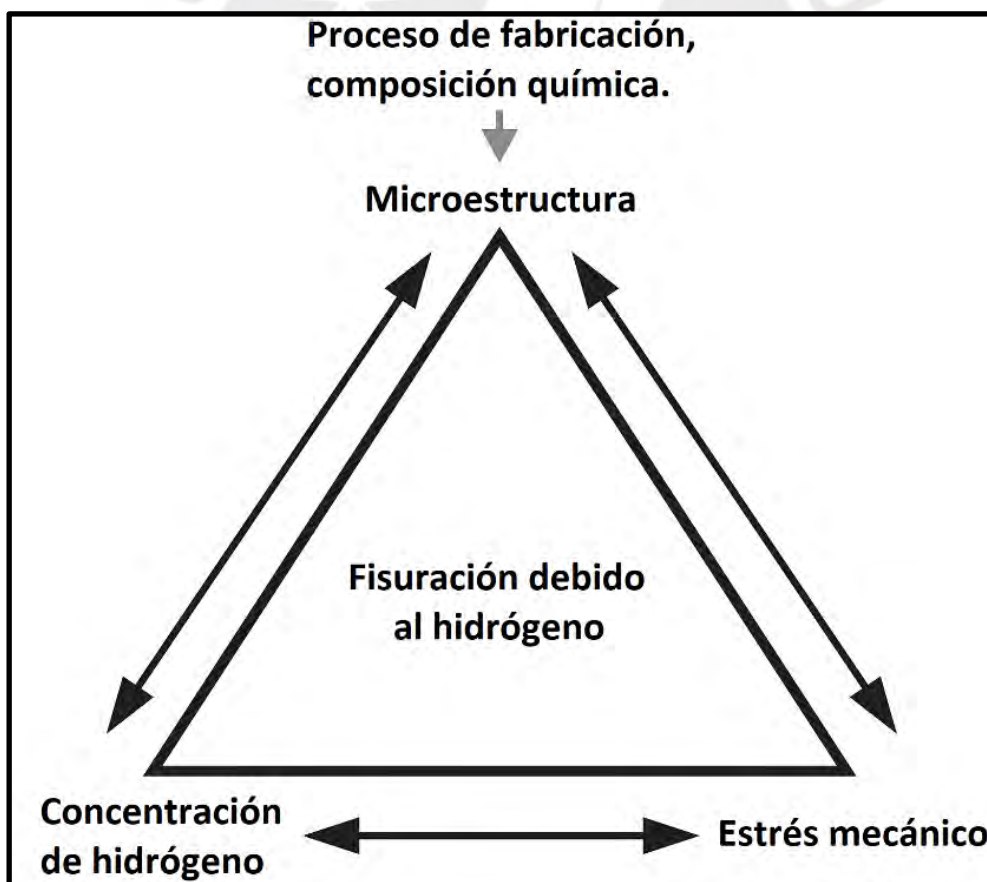


Figura 11. Triángulo de Fisuración en frío  
Nota. Tomado de “ScienceDirect”, 2023.

### 1.2.3.1. Fórmula de Yurioka

En el año 1981, Nobutaka Yurioka y Tadashi Kasuya propusieron la siguiente expresión matemática:

$$CE (\%)= C+ A(C) \left( \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr+Mo+Nb+V}{5} + 5B \right) + \dots(7)$$

Donde  $A(C) = 0.75 + 0.25 * \text{Tanh} (20 (C - 0.12))$ , para  $\%C < 0.08\%$  se considera un valor de 0.5 y para valores  $\%C > 0.18\%$  considerar un valor de 1.

Se obtendrán buenas estimaciones mediante este método para contenido de carbono de hasta 0.25%.

### 1.2.4. Temperatura de precalentamiento

El precalentamiento es el calor de aporte que se suele entregar al material base previo a la ejecución de la soldadura para evitar la formación de estructuras frágiles como la martensita. Se intenta que el material alcance una mínima temperatura de precalentamiento para así evitar desperdiciar energía.



Figura 12. Precalentamiento en tubería.  
Nota. Tomado de “Weldinganswers”, 2023.

### 1.2.4.1. Método del Instituto Internacional de Soldadura

Utilizamos el valor del  $CE=0.43$  de la tabla 5 del API 1104. Luego, según el tipo de junta soldada, se determinará el IBT (índice de brusquedad térmica).

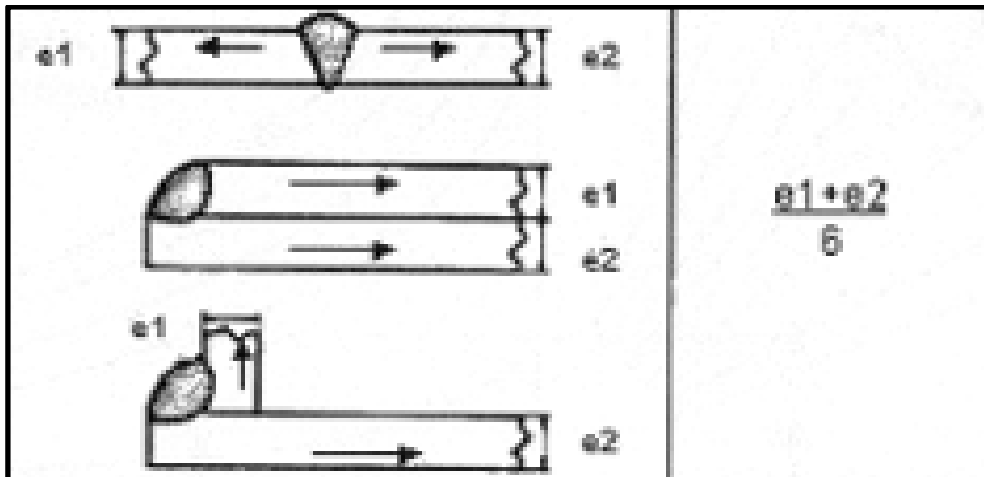


Figura 13. IBT según tipo de junta  
Nota. Tomado de "International Institute of Welding".

Se consideran 2 tuberías de espesor  $t=13$  mm con un  $\phi_{ext}=14.37$ " según medidas tomadas a los retazos de tubería.



Figura 14. Tubería API 5L PSL2 X70M  
Nota. Fuente propia

Por lo tanto, se tendrá que:

$$IBT = \frac{e_1 + e_2}{6}$$

$$IBT = \frac{13 + 13}{6}$$

$$IBT = 6.67$$

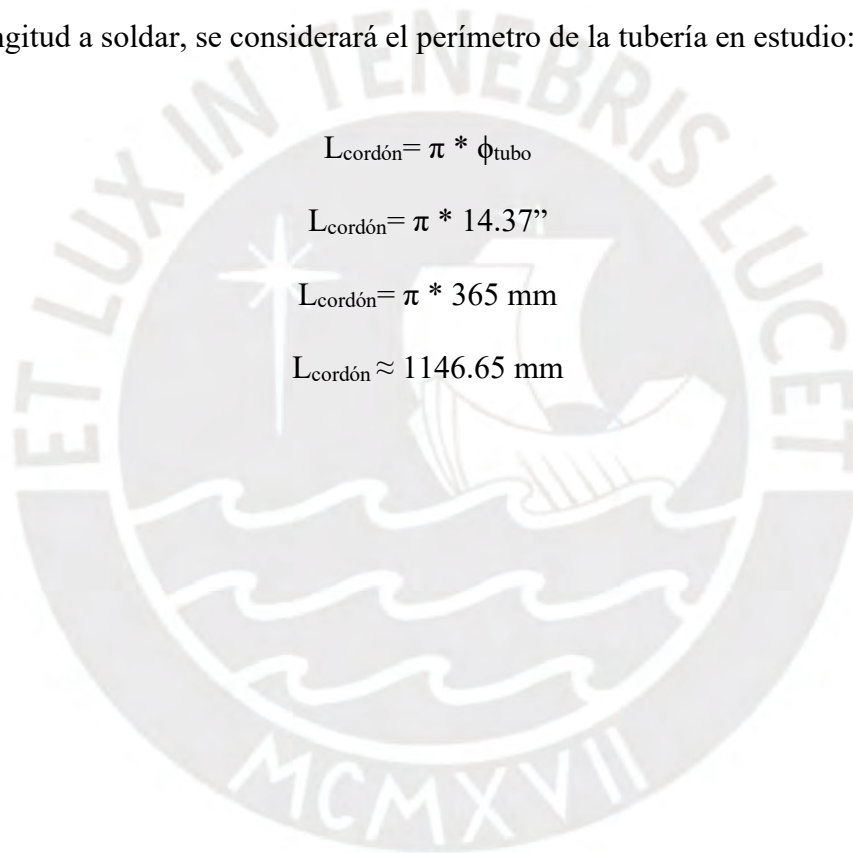
Luego, según el catálogo de recomendaciones para soldadura de Soldexa, se sugiere utilizar un electrodo de 1/8" (**3.25 mm**) para tuberías de gasoductos. Por ello, se selecciona el electrodo CELLOCORD 70 para la ejecución de los cordones de soldadura. Asimismo, para poder obtener la longitud a soldar, se considerará el perímetro de la tubería en estudio:

$$L_{\text{cordón}} = \pi * \phi_{\text{tubo}}$$

$$L_{\text{cordón}} = \pi * 14.37''$$

$$L_{\text{cordón}} = \pi * 365 \text{ mm}$$

$$L_{\text{cordón}} \approx 1146.65 \text{ mm}$$



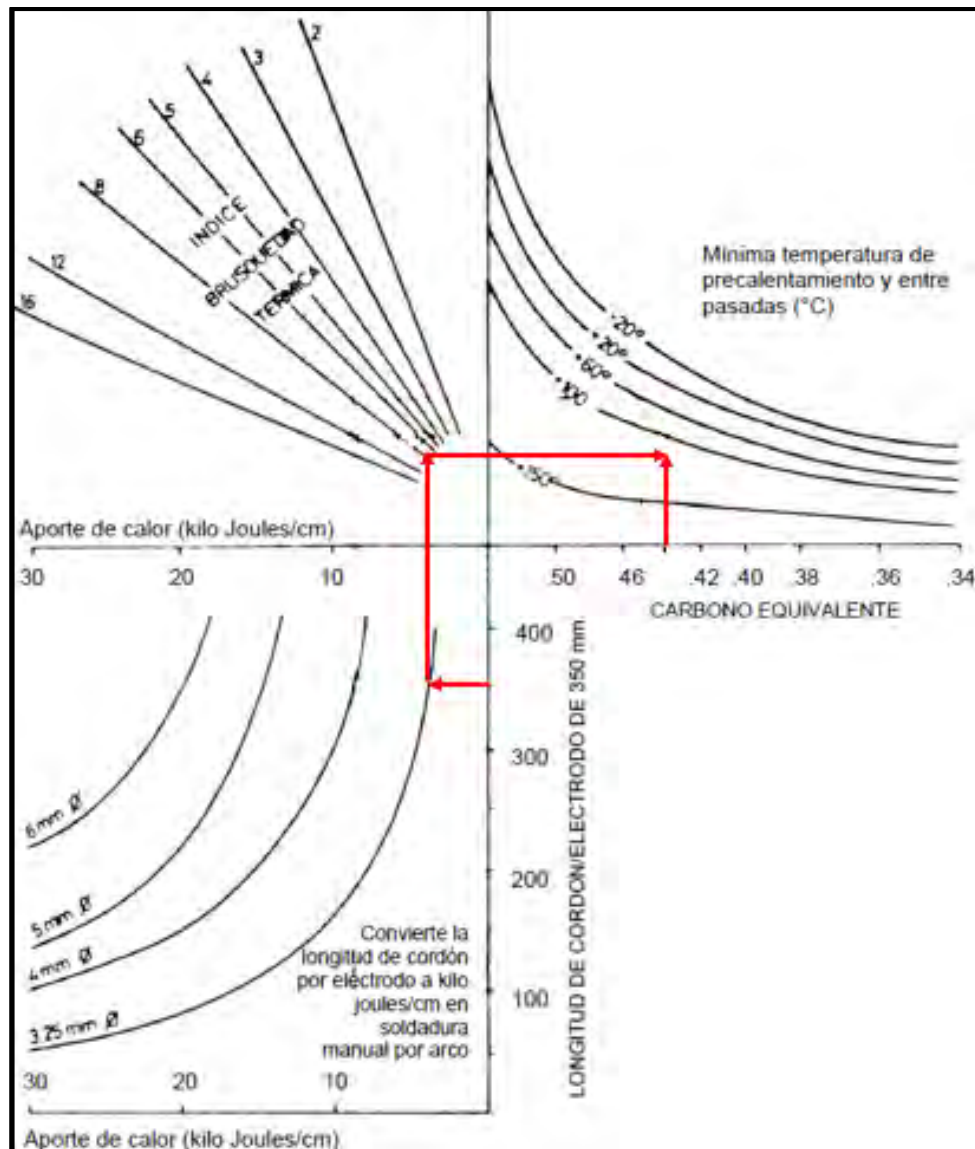


Figura 15. Temperatura de precalentamiento según IIW  
Nota. Tomado de "International Institute of Welding".

Por lo tanto, se obtiene una temperatura de precalentamiento de aproximadamente **120°C**.

#### 1.2.4.2. Método de Seferian

Este investigador propuso las siguientes expresiones matemáticas para el cálculo de la temperatura de precalentamiento:

$$T_p = 350 * \sqrt{(Ct - 0.25)} \dots (8)$$

Donde:

$$Ct = Cq + Ce \text{ y } Ce = 0.005 * e * Cq$$

Siendo "e" el espesor del material a soldar en mm.

Además, se sabe que:  $Cq = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \dots(9)$

Entonces se tiene lo siguiente:

$$Cq = 0.12 + \frac{1.7+0.5}{9} + \frac{0.5}{18} + \frac{7*0.5}{90}$$

$$Cq = 0.431$$

Además:

$$Ce = 0.005 * 13 * 0.431$$

$$Ce = 0.028$$

Por lo tanto:

$$Ct = 0.431 + 0.028$$

$$Ct = 0.459$$

Finalmente se calcula la temperatura de precalentamiento  $T_p$ :

$$T_p = 350 * \sqrt{(Ct - 0.25)}$$

$$T_p = 350 * \sqrt{(0.459 - 0.25)}$$

$$T_p = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con este valor se puede concluir que según el método de Seferian es necesario realizar un precalentamiento a las tuberías de transporte de gas por resultar un valor por encima de la temperatura ambiente del lugar.

#### 1.2.4.3. Método del CET (SEW 088)

En primer lugar, habrá que hallar el CE utilizando los datos de la tabla 1 en la siguiente expresión:

$$CET(\%) = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \dots(10)$$

$$CET(\%) = 0.2 + \frac{1.7+0.5}{10} + \frac{0.5+0.5}{20} + \frac{0.5}{40}$$

$$\text{CET (\%)} = 0.4025$$

Ahora se procede a hallar el  $H_{\text{net}}$  utilizando las leyes de Ohm:

$$H_{\text{net}} = P = V \cdot I \dots (11)$$

Según los datos tomados del Manual de Soldadura de Soldexa del electrodo CELLOCORD 70 y sabiendo que la tensión en el Perú es de 220 V se calcula lo siguiente:

$$P_{\text{mín}} = \frac{220 \cdot 75}{1000}$$

$$P_{\text{mín}} = 16.5 \text{ KJ}$$

Además, se sabe que la longitud aproximada del cordón de soldadura será de  $L_{\text{cordón}} \approx 1146.65 \text{ mm} = 114.665 \text{ cm}$ .

Entonces, se tiene lo siguiente:

$$H_{\text{net mín}} = \frac{16.5 \text{ KJ}}{114.665 \text{ cm}}$$

$$H_{\text{net mín}} = 0.144 \text{ KJ/cm}$$

De igual forma se calcula el  $H_{\text{net máx}}$ , con lo cual  $H_{\text{net máx}} = 0.249 \text{ KJ/cm}$

Se halla un promedio entre los valores obtenidos:

$$H_{\text{net promedio}} = \frac{0.144 + 0.249}{2} = 0.197 \text{ KJ/cm}$$

Por lo tanto, regresando a la ecuación del CET:

$$T_p(^{\circ}\text{C}) = 700 \cdot \text{CET} + 160 \cdot \text{Tanh}\left(\frac{t}{35}\right) + 62 \cdot \text{HD}^{0.35} + (53 \cdot \text{CET} - 35) \cdot H_{\text{net}} - 330$$

$$T_p(^{\circ}\text{C}) = 700 \cdot 0.2586 + 160 \cdot \text{Tanh}\left(\frac{20}{35}\right) + 62 \cdot 20^{0.35} + (53 \cdot 0.2586 - 35) \cdot 0.197 - 330$$

$$T_p(^{\circ}\text{C}) = 264.25 + 160 \cdot 0.5164 + 0.197 \cdot 449.94$$

$$T_p(^{\circ}\text{C}) = 183.4^{\circ}\text{C}$$

### 1.3. Tiempo de enfriamiento $t_{8/5}$

El tiempo de enfriamiento entre los  $800^{\circ}\text{C}$  y los  $500^{\circ}\text{C}$  es de especial importancia ya que tendrá directa influencia sobre la dureza que puedan provocar los elementos aleados debajo de la línea de fusión (ZAC). Es en esta zona donde se espera tener la máxima dureza porque es donde se presenta la máxima temperatura y la mayor velocidad de enfriamiento. Estos valores servirán,

por lo tanto, de base para comparar contra la velocidad crítica de temple en donde, en caso se sobre pase a esta, habrá la presencia de martensita en la microestructura y el material tenderá a tener mayor dureza.

#### 1.4. Procesos de unión

Existen diversas formas de unir 2 materiales ya sean de las mismas composiciones o distintas. Entre las diversas formas de unión entre materiales están la colada, la fusión y la soldadura. Siendo este último de especial interés para el presente documento.

##### 1.4.1. Soldadura

La soldadura es un proceso de unión mediante el cual dos o más partes se fusionan por medio de calor, presión o ambos, formando una unión a medida que las partes se enfrían. La soldadura generalmente se usa en metales y termoplásticos. La unión soldada completa puede denominarse soldadura.



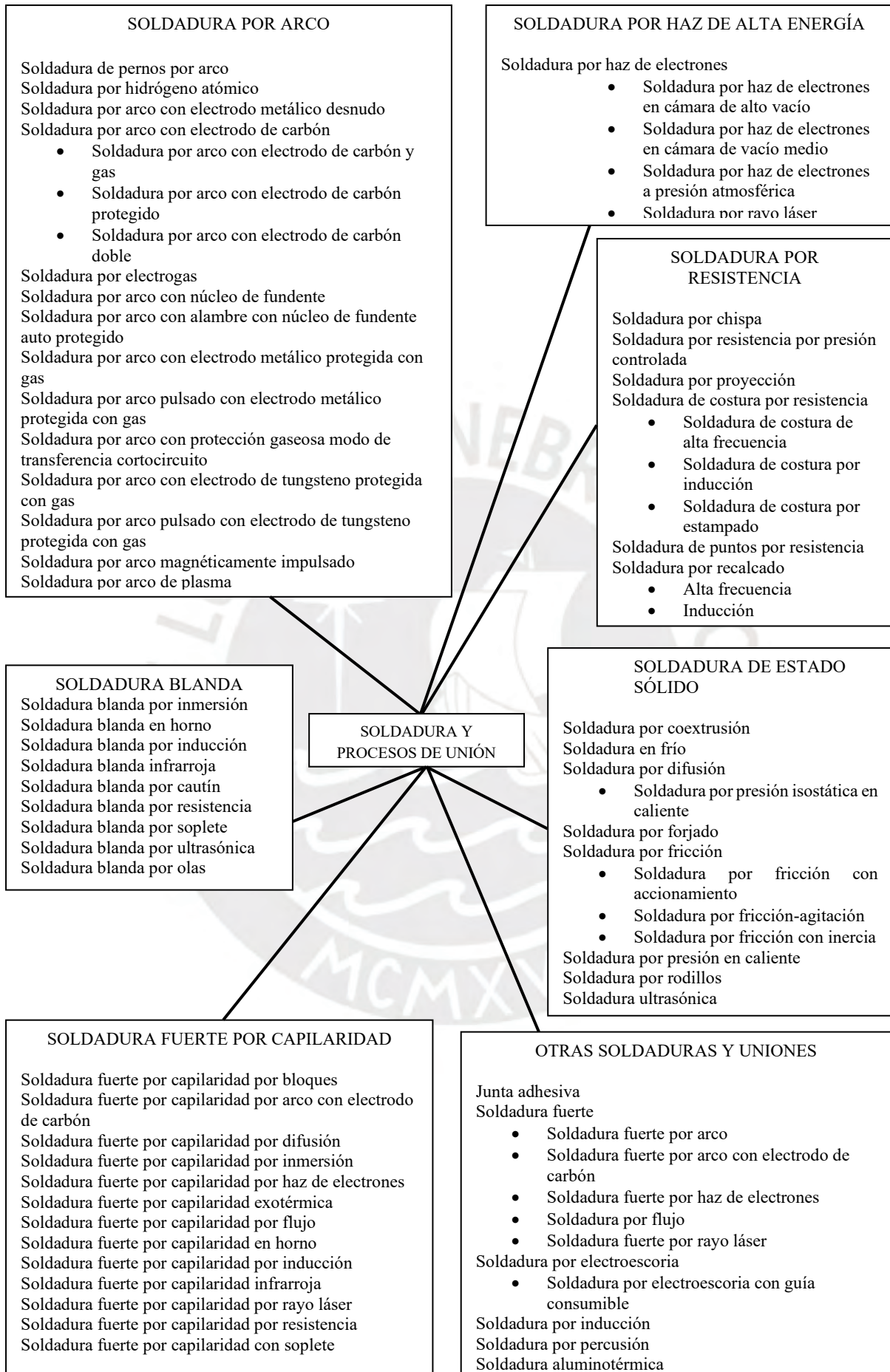
Figura 16. Soldadura en taller SOLDEXA  
Nota. Fuente propia

A manera de ejemplo, se muestra a continuación los cordones obtenidos a través de la soldadura en uno de los ensayos del presente estudio en el taller de SOLDEXA:



Figura 17. Cupones terminados  
Nota. Fuente propia

MCMXVIII



### 1.4.1.1. Soldadura tipo SMAW

El proceso de elaboración del cordón de soldadura puede ser fabricado a través de distintos tipos de unión soldada. Para esta investigación se considera utilizar la fusión de metales por el método SMAW (Shielded Metal Arc Welding) ya que, aparte de ser sugerido por la norma, su costo de elaboración no es muy elevado.

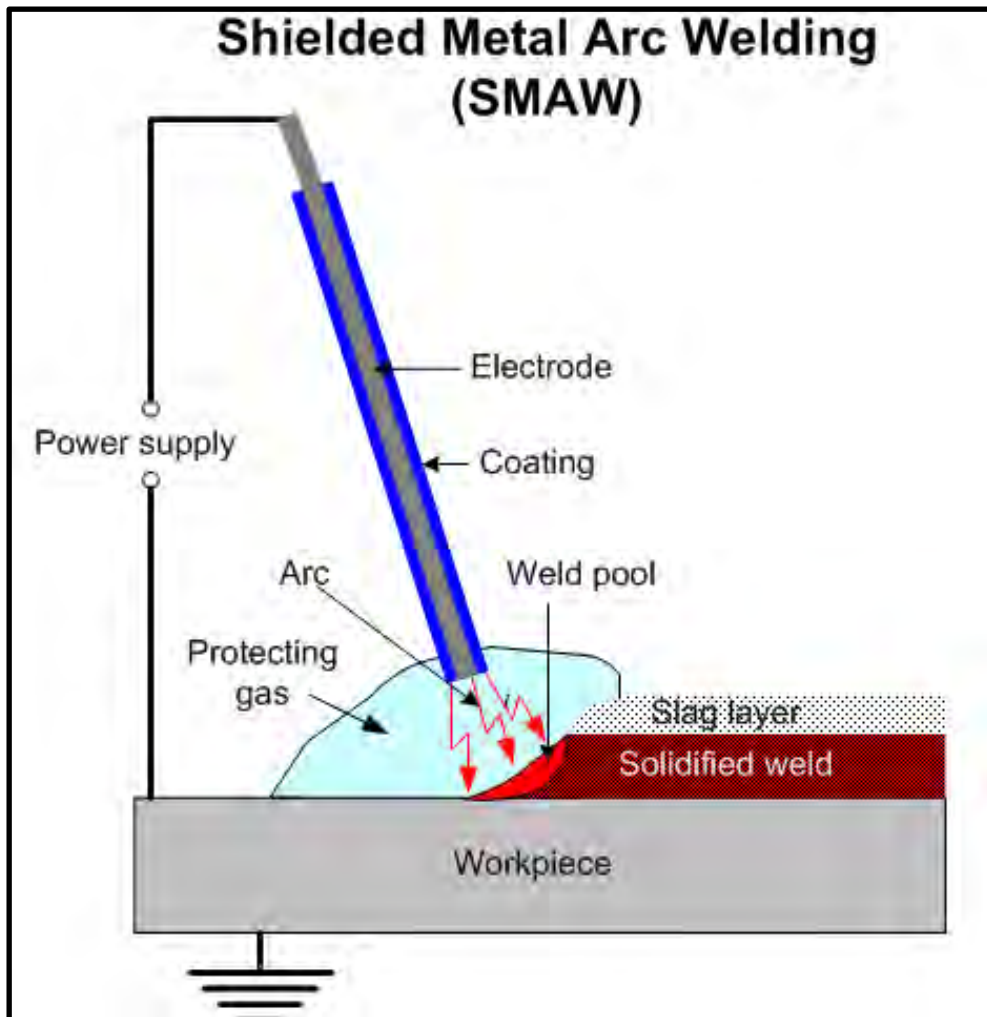


Figura 18. Soldadura tipo SMAW  
Nota. Tomado de "SubsTech", 2012.

Un flujo de electrones circula a través de un circuito cerrado. Cuando ocurre una pequeña apertura dentro de cualquier parte los electrones se mueven a gran velocidad y saltan a través del espacio abierto entre los dos extremos (1,5 – 3) mm produciendo una chispa eléctrica, con la suficiente presión o voltaje para que los electrones fluyan de forma continua. Es aquí donde se produce el arco eléctrico y donde se funde el metal a medida que se avanza.

Equipamiento:

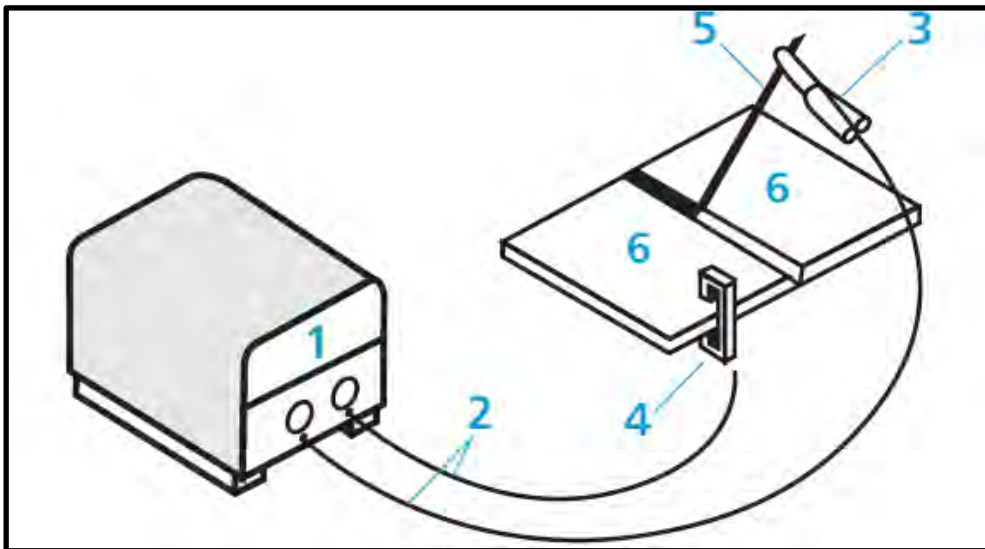


Figura 19. Equipamiento para soldadura SMAW  
Nota. Tomado de “Manual de soldadura SOLDEXA”, 2023.

- 1.-Generador de corriente (Fuente de poder)
- 2.-Cables de soldadura
- 3.-Porta-Electrodo
- 4.-Masa o tierra
- 5.-Electrodo
- 6.-Pieza de trabajo

En este tipo de soldadura se cumple la Ley de Ohm, lo cual indica que  $V=I \times R$ . Donde V: voltaje, I: intensidad de corriente y R: resistencia.

### 1.4.1.2. Soldadura tipo GMAW

Se forma por un arco eléctrico entre el metal y un electrodo de alambre, aplicando calor a las piezas de metal. Esta acción derrite y fusiona las partes para formar un vínculo permanente. Hay de varios tipos: circuito corto, spray, globular o spray pulsante.

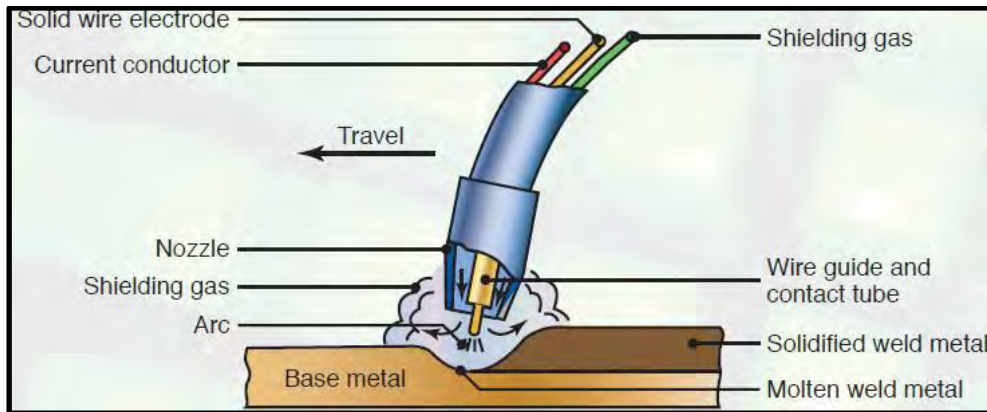


Figura 20. Soldadura tipo GMAW

Nota. Tomado de "MechanicalEngineering", 2022.

El equipo básico para una configuración semiautomática GMAW típica incluye una fuente de energía para soldar, alimentadores de alambre que aseguran velocidad y voltaje constantes, un suministro de alambre para electrodos, una pistola de soldar y un cilindro de gas protector.

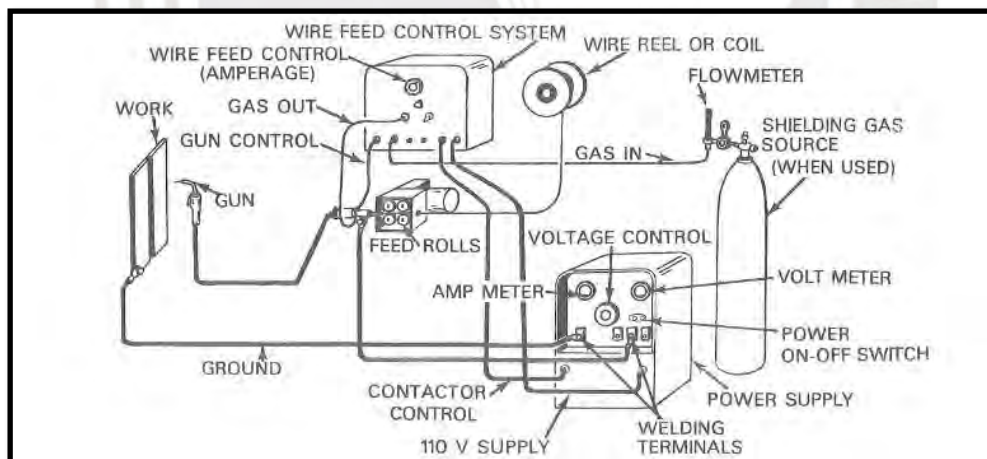


Figura 21. Equipamiento soldadura GMAW

Nota. Tomado de "Wiregrass", 2023.

Las variables principales en este proceso son: el amperaje, el voltaje, el flujo de gas y el diámetro del electrodo. Para ejecutar este tipo de soldadura será necesario emplear corriente continua.

### 1.4.1.3. Soldadura tipo GTAW

El proceso de soldadura GTAW también se conoce comúnmente como soldadura TIG o soldadura con gas inerte de tungsteno. Es un proceso de soldadura por arco que utiliza un electrodo no consumible (tungsteno) para producir soldaduras. Utiliza materiales de relleno, pero en algunos casos, puede que no sea necesario. En este proceso, el área de soldadura está protegida por la contaminación atmosférica del gas de protección inerte.

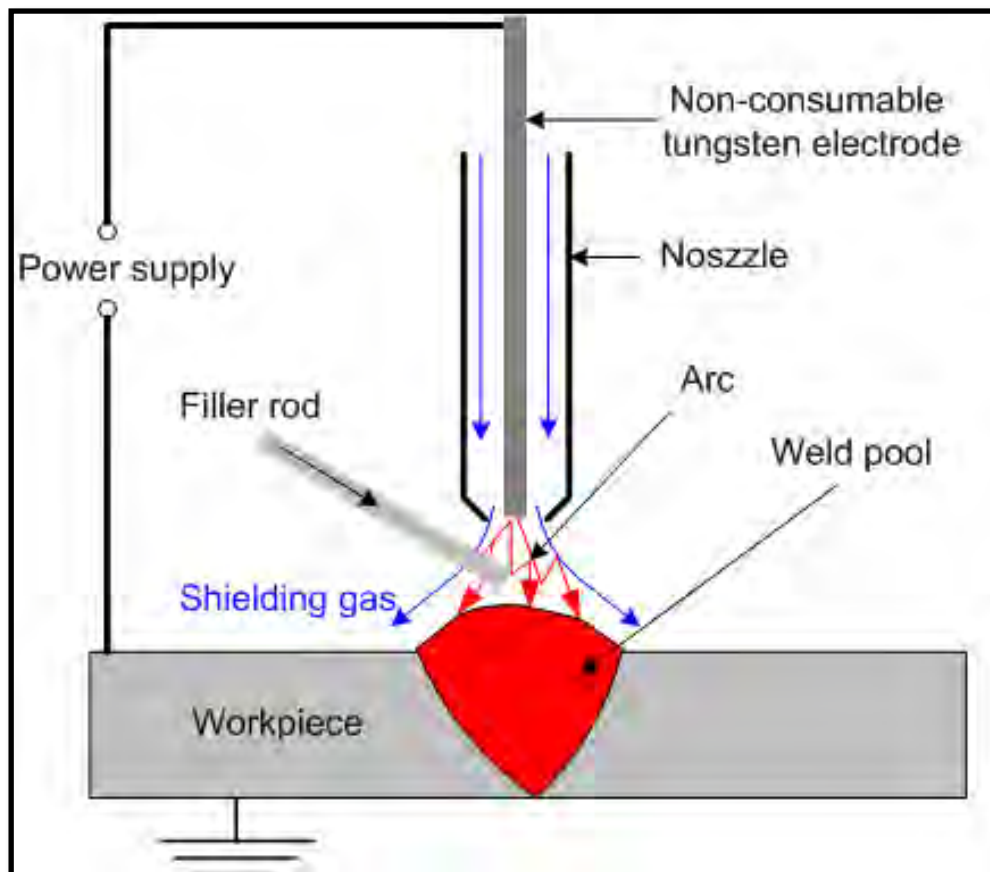


Figura 22. Soldadura tipo GTAW  
Nota. Tomado de "SubsTech", 2012.

A continuación, se muestra el equipamiento necesario para ejecutar este tipo de soldadura:

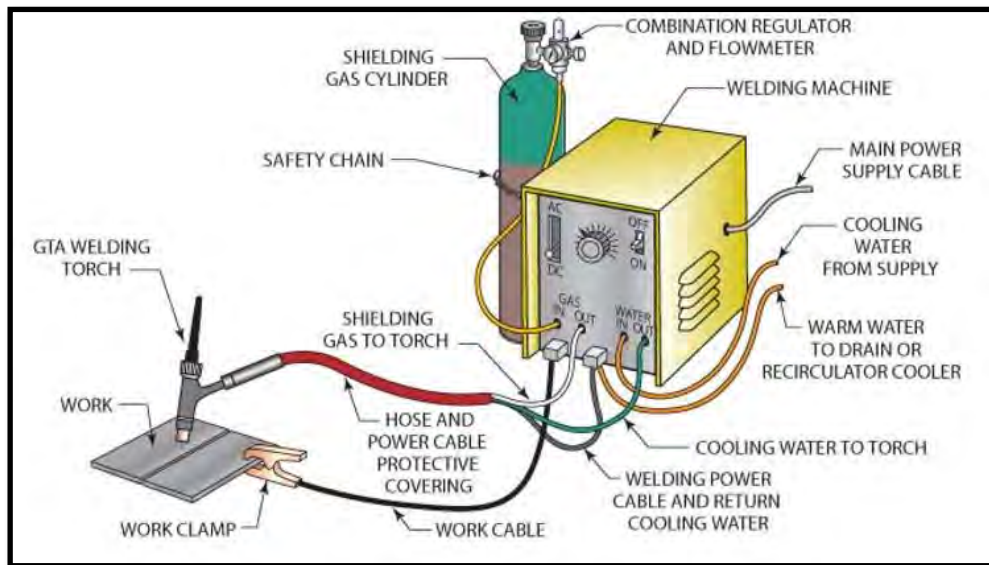


Figura 23. Equipamiento para soldadura GTAW  
 Nota. Tomado de "knowwelding",2023.

Las variables en este caso serán: el amperaje, el voltaje, el flujo de gas y el diámetro del electrodo seleccionado. Se deberá utilizar corriente continua para efectuar este proceso.

## 1.5. Código API 1104

Esta norma abarca las condiciones para la soldadura con gas y por arco de soldaduras a tope, ramificadas y de filete en tuberías acero al carbono y de baja aleación utilizados en la compresión, bombeo y transmisión de petróleo crudo, productos derivados del petróleo, gases combustibles, dióxido de carbono, nitrógeno y en los sistemas de distribución. Aquí se ubica el WPS (Welding Procedure Specification). En él se regulan condiciones y características para la realización de la unión soldada bajo los estándares de la norma API 1104, conocidas como las variables esenciales.

### 1.5.1. Variables esenciales

Dentro de la norma API 1104 se mencionan las variables esenciales a tener en cuenta para la elaboración del WPS:

- Procedimiento de soldadura: puede ser manual o automático.
- Material base: el espesor de la tubería sobre la cual se hará el cordón de soldadura.
- Diseño de la junta: la geometría de la unión soldada.
- Material de respaldo: material de sobre considerado para el pase de raíz.
- Posición: el posicionamiento para la ejecución del cordón de soldadura.
- Material de aporte: la composición química del material de aporte.
- Escudo de gas: la protección ante el oxígeno y vapor de agua del ambiente.
- Características eléctricas: la polaridad, amperaje y voltaje.
- Temperatura de precalentamiento: calentamiento previo a la soldadura para evitar microestructura frágil.
- Temperatura entre pases: es la temperatura del área soldada entre las pasadas de los cordones de soldadura. Importante para controlar defectos en la unión.
- Secuencia de pases: el orden en el que se irán depositando los cordones de soldadura.
- Enfriamiento: el método de la pérdida de calor influirá en la posibilidad de la aparición de microestructura frágil.
- Post calentamiento: el calentamiento al término influye en la difusión de hidrógeno.
- Tratamiento post soldadura: tratamientos como el temperado, recocido incluidos para disminuir la posibilidad de la aparición de microestructura frágil.

## 1.6. Calificación de WPS

Para poder determinar si un procedimiento de soldadura fue llevado a cabo correctamente, obteniendo los resultados esperados según la norma API 1104, se deberán realizar una serie de ensayos para comprobar la calidad de la unión soldada. A continuación, se mencionarán las pruebas necesarias según la norma en mención:

### 1.6.1. Ensayos de inspección visual

El ensayo de inspección visual es un método de ensayo no destructivo que permite la detección de discontinuidades que afectan a la superficie y que son visualmente visibles.



Figura 24. Inspección visual  
Nota. Tomado de “GAMAIN”, 2017.

### 1.6.2. Ensayos de radiografía industrial

La Radiografía industrial es un ensayo no destructivo que consiste en atravesar el componente a ensayar con un haz de radiación electromagnética ionizante (rayos gamma o rayos X). Esta radiación será más o menos absorbida por las discontinuidades internas de la pieza, llegando a la otra cara de la misma, con una intensidad de radiación distinta, e impresionando una película radiográfica, la cual, una vez revelada muestra la localización de dichas discontinuidades.

Asimismo, la norma API 1104 indica que será necesario un ensayo radiográfico siempre y cuando la empresa responsable del producto lo considere necesario. Esto aplicará solo para soldaduras a tope y se pueden clasificar en diversos tipos de errores entre los cuales están Penetración inadecuada sin alto-bajo, Penetración inadecuada debido a alto-bajo, Penetración cruzada inadecuada, entre otros.



Figura 25. Ensayo de radiografía industrial  
Nota. Tomado de "ICOTSAC", 2021.

### 1.6.3. Ensayos mecánicos

Acorde a la norma API 1104, para poder calificar la ejecución de un cordón de soldadura, será necesario también llevar a cabo una serie de ensayos destructivos los cuales son los ensayos de Tracción, Impacto y Dureza. Cada uno de estas pruebas deberán realizarse a acorde a las dimensiones de las probetas indicadas en la norma, así como otras condiciones para su correcta evaluación.

#### 1.6.3.1. Ensayo de tracción

La prueba de tracción es un proceso de prueba destructivo que proporciona información sobre la resistencia a la tracción, el límite elástico y la ductilidad del material metálico. Los resultados variarán dependiendo de la composición química del material ensayado.



Figura 26. Máquina de ensayo de tracción  
Nota. Fuente propia.

### 1.6.3.2. Ensayo de doblado

El ensayo de doblado es un método para evaluar la ductilidad, pero no puede considerarse como un medio cuantitativo para predecir rendimiento del servicio en todas las operaciones de doblado. La severidad de la prueba de flexión es principalmente una función del ángulo de flexión del diámetro interior al que se dobla la muestra, y de la sección transversal de la muestra. Estas condiciones son variadas según la ubicación y orientación de la muestra de ensayo y la composición química, propiedades de tracción, dureza, tipo, y calidad del acero especificado. Para mayor alcance revisar el apartado 12.6.3.3 de la norma API 1104.



Figura 27. Máquina de doblado  
Nota. Fuente propia.

### 1.6.3.3. Ensayo de Nick Break

Es un tipo de prueba destructiva que se utiliza para evaluar la calidad de una soldadura. Para realizar esta prueba, se prepara una muestra a partir del metal de soldadura. Luego se mecanizan los concentradores de tensión en la muestra. Luego se rompe la muestra y se observa la superficie de fractura al finalizar la prueba. Mayores alcances en el apartado 5.6.3.3 de la norma API 1104. En este caso se aprovechó la misma máquina que el ensayo de doblado ya que cumple con dicho propósito también.

### 1.6.3.4. Ensayo de impacto Charpy

Las pruebas de impacto se utilizan para estudiar la tenacidad del material. La tenacidad de un material es un factor de su capacidad para absorber energía durante la deformación plástica. Los materiales frágiles tienen baja tenacidad como resultado de la pequeña cantidad de deformación plástica que pueden soportar.



Figura 28. Máquina de ensayo de impacto Charpy  
Nota. Fuente propia.

### 1.6.3.5. Ensayo de dureza

Es una prueba para determinar la resistencia que exhibe un material a la deformación permanente por penetración de otro material más duro. Será de vital importancia comprobar los valores de dureza del material para saber qué tan frágil se convierte el material posterior a un proceso mediante el cual su microestructura puede haber cambiado debido a condiciones durante la soldadura.



Figura 29. Equipo de ensayo de dureza Vickers  
Nota. Fuente propia.

## Capítulo 2: Métodos experimentales

### 2.1. Caracterización del metal base

#### 2.1.1. Ensayo de composición química del acero

Las propiedades mecánicas de los materiales están regidas por la composición química y por ello será de vital importancia realizar un análisis de las cantidades de los elementos que están dentro de las probetas a ensayar para garantizar que los valores obtenidos serán confiables.

Para determinar las cantidades de los diferentes elementos presentes en el material base se utilizará el equipo para ensayo químico del espectrómetro de emisión óptica que se muestra a continuación:

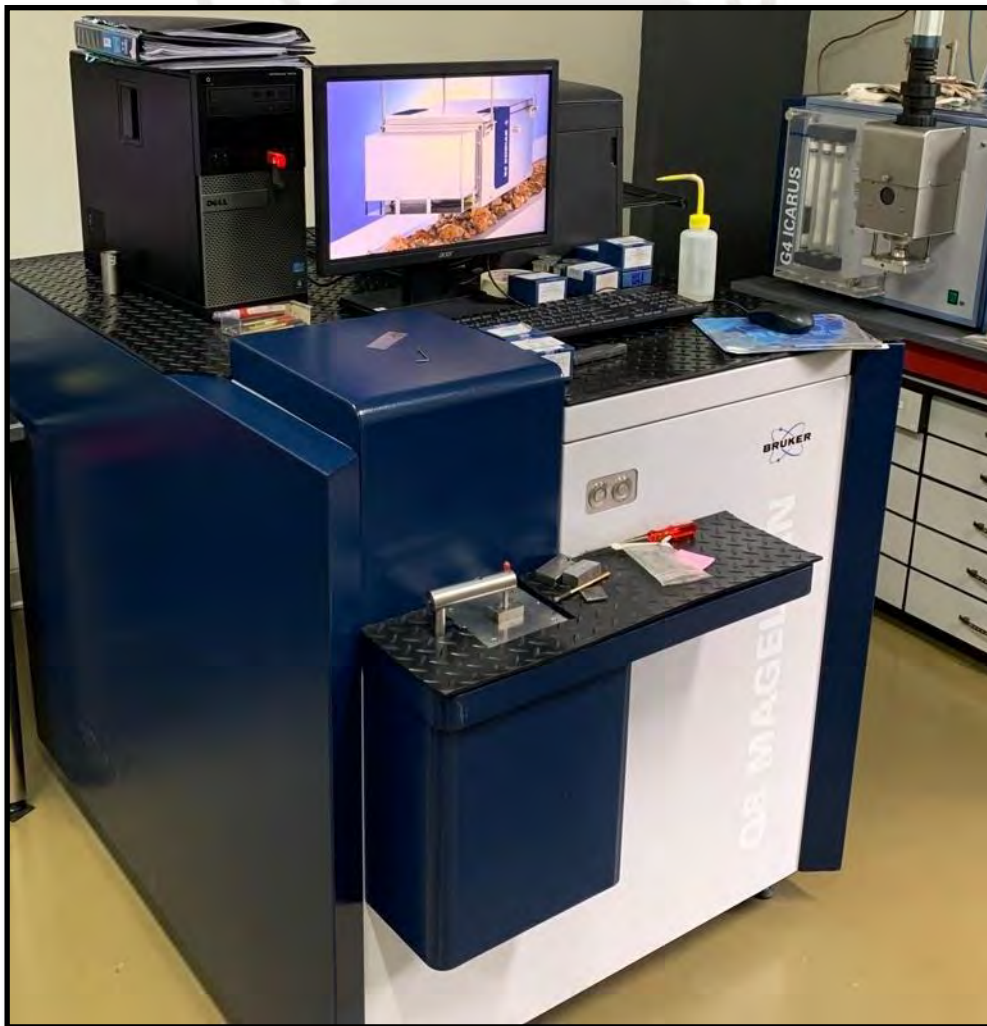


Figura 30. Máquina para ensayo químico Q8 MAGELLAN  
Nota. Fuente propia.

Las dimensiones de la probeta se obtuvieron mediante las buenas prácticas en los laboratorios de materiales PUCP. Asimismo, este ensayo sigue los lineamientos indicados en la norma A751 – 14a.

Se muestra a continuación la probeta utilizada en el presente estudio:



Figura 31. Probeta ensayo químico  
Nota. Fuente propia.

### **Criterio de aceptación:**

La muestra será aceptada siempre y cuando los elementos aleantes sean mayores o iguales a los indicados en la Tabla 1 del presente documento.

### **2.1.2. Ensayo metalográfico del acero**

Los objetivos de este ensayo serán visualizar la microestructura del material debido a que esta determinará las propiedades mecánicas de la misma y obtener el grado de inclusiones presentes. Para este ensayo será necesario acondicionar las muestras con ayuda de una briquetadora para encapsular los especímenes y luego pasar a la etapa de pulido.

Para esta prueba se considera la siguiente probeta según los lineamientos mencionados en la norma ASTM E3:

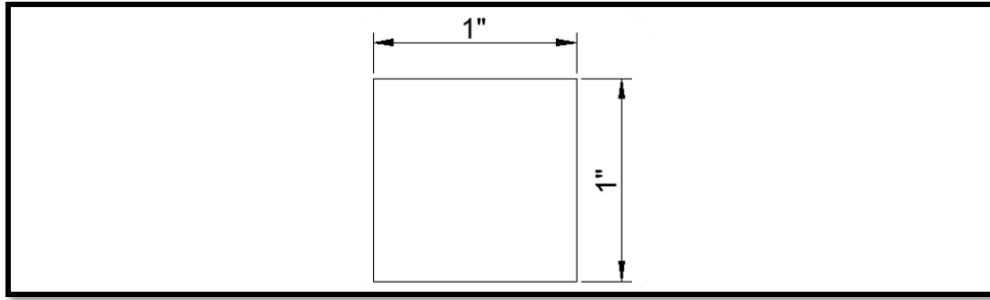


Figura 32. Dimensiones para ensayo metalográfico  
Nota. Fuente propia.

### **Criterio de aceptación:**

Se deberá verificar que no haya presencia de martensita sin revenir a través de toda la pared de la tubería.

### **2.1.3. Ensayo de tracción del acero**

Se deberá confirmar que la resistencia a la carga axial del material esté dentro de los límites establecidos por la especificación API 5L. Para este ensayo lo primero es preparar las muestras, luego acondicionarlas en los extremos de tal forma que la mordaza del equipo de tracción pueda sostener adecuadamente los especímenes y lograr de este modo obtener resultados confiables. Asimismo, en este análisis se utilizó la probeta de tracción con las dimensiones del espécimen número 4 según la norma ASTM A370:



Figura 33. Probeta de ensayo de tracción  
Nota. Fuente propia

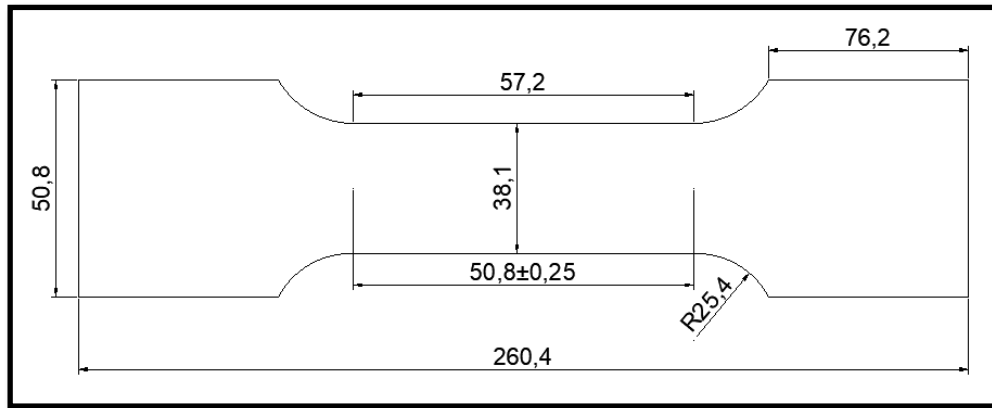


Figura 34. Dimensiones probeta tracción  
Nota. Tomado de “ASTM A370-18”, 2023.

### Criterio de aceptación:

Los valores de esfuerzo a la tracción obtenidos mediante este ensayo deberán ser mayores o iguales a los indicados en la Tabla 2 del presente documento.

### 2.1.4. Ensayo de impacto del acero

Otra de las propiedades que se debe confirmar esté dentro del rango esperado será la resistencia al impacto del material (capacidad de poder de absorber energía). Es por ello que se realiza la prueba de impacto Charpy, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E23 se deben ensayar al menos nueve muestras válidas para cada ubicación de muesca (metal de soldadura o HAZ) a la temperatura mínima de diseño o por debajo de ella. Para ello lo primero será elaborar los especímenes a ensayar según las medidas de la norma mencionada y luego efectuar en la máquina de ensayos de impacto Charpy.

Las muestras deberán contar con las siguientes características:

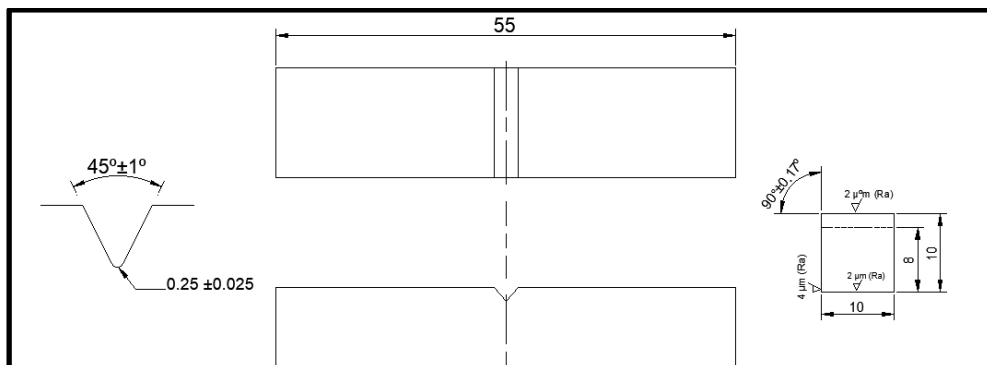


Figura 35. Dimensiones para ensayo de impacto Charpy  
Nota. Tomado de “ASTM E23-18”, 2023.

**Criterio de aceptación:**

Los valores obtenidos a través de este ensayo deberán ser igual o mayores a los mostrados en la Tabla 3.

**2.1.5. Ensayo de dureza del acero**

Será necesario verificar los valores de dureza del acero para culminar la verificación de las propiedades mecánicas del mismo. Para el ensayo de dureza se utilizaron retazos pequeños de la tubería la cual fue primero cortada en pequeños tramos como se puede observar a continuación:



Figura 36. Retazos de tubería API 5L PSL2 X70M  
Nota. Fuente propia

**Criterio de aceptación:**

La dureza para las tuberías de grado X65 hasta X80 deberán tener un valor no mayor o igual a 300HV10.

## 2.2. Welding Procedure Specification (WPS)

En primer lugar, se presenta el WPS teórico a partir del cual se partirá para luego realizar los ajustes según los datos experimentales que se obtendrán:

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Proceso/Método de aplicación:	Soldadura SMAW	WPS Número:	1				
Grado del material:	X70M			Esesor de pared:	13 mm		
Diámetro exterior:	365 mm (14.37")			Ángulo de biselado:	30°		
Tipo de junta:	A tope, junta en "V"			Rotado o fijo:	Fijo		
Tipo de raspado (si aplica):	Escobillado			Número de soldadores:	1		
Dirección de la soldadura:	Ascendente / D 3G/ 6G			Temperatura de interpase:	Mín. 120		
Temperatura de precalentamiento:	Desde 120 °C			Método de calentamiento:	Soplete	Máx. 250	
Material de aporte y flujo:	FOX CEL 85 8010-P1			Herramientas de limpieza y/ Cepillo			
Características de la flama:				Número mínimo de pases:	4		
Tipo y eliminación de abrazadera de alineación:							
Tiempo máximo entre pasada de raíz y el inicio de la segunda pasada:	Máximo 5 min.			Tiempo máximo entre la segunda pasada y el inicio de la tercera pasada:	5 minutos		
Método de enfriamiento:	Al ambiente			Procedimiento PWHT:	N/A		
DISEÑO DE LA JUNTA							
SECUENCIA DE LOS CORDONES							
PARÁMETROS DE SOLDADURA							
Pase	Proceso/ Características eléctricas	Material de aporte Grupo o clasificación	Tamaño del electrodo	Rango de voltaje	Rango de amperaje	Velocidad de las pasadas	Rango del calor de aporte
Primer pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	20-30 V	80-130 A	15-30 cm/min	106.67-130
Segundo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	20-30 V	80-130 A	15-30 cm/min	106.67-130
Tercer pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	20-30 V	80-130 A	15-30 cm/min	106.67-130
Cuarto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	20-30 V	80-130 A	15-30 cm/min	106.67-130
Note: Esta tabla no pretende limitar el número de cordones de soldadura y la tabla debe ajustarse para presentar todas las pasadas requeridas. Informe de soldadura de calificación de respaldo No(s):							
Aprobado por:							

## WPS para la temperatura ambiente (25°C):

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
				WPS Número:	1		
Proceso/Método de aplicación:	Soldadura SMAW						
Grado del material:	X70M						
Diámetro exterior:	365 mm (14.37")	Espesor de pared:		13 mm			
Tipo de junta:	A tope, junta en "V"		Ángulo de biselado:		30°		
Tipo de raspado (si aplica):	Escobillado		Rotado o fijo:		Fijo		
Dirección de la soldadura:	Ascendente / D 3G/ 6G		Número de soldadores:		2		
Temperatura de precalentamiento:	Temperatura ambiente		Temperatura de interpase:		Mín. 120		
Método de calentamiento:	Soplete				Máx. 250		
Material de aporte y flujo:	FOX CEL 85 8010-P1						
Características de la flama:			Herramientas de limpieza y/o esmerilado:		Cepillo		
Tipo y eliminación de abrazadera de alineación:			Número mínimo de pases:		4		
Tiempo máximo entre pasada de raíz y el inicio de la segunda pasada:	Máximo 5 min.		Tiempo máximo entre la segunda pasada y el inicio de la tercera pasada:		5 minutos		
Método de enfriamiento:	Al ambiente		Procedimiento PWHT:		N/A		
DISEÑO DE LA JUNTA							
SECUENCIA DE LOS CORDONES							
PARÁMETROS DE SOLDADURA							
Pase	Proceso/ Características eléctricas	Material de aporte Grupo o clasificación	Tamaño del electrodo	Rango de voltaje (V)	Rango de amperaje (A)	Velocidad de las pasadas (cm/min)	Rango del calor de aporte (W)
Primer pase	DC -	8010	Ø1/8" x 350 mm	25-32	120-135	32.43	3000-4320
Segundo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25-32	130-150	26.60	3250-4800
Tercer pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25-32	130-140	20.66	3250-4480
Cuarto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	26.4-32.8	130-140	16.48	3432-4592
Quinto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	28.8-35.4	120-130	19.12	3456-4602
Sexto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.9-32	110-120	21.53	2849-3840
Séptimo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.5-32.8	120-130	27.20	3060-4264
Nota: Esta tabla no pretende limitar el número de cordones de soldadura y la tabla debe ajustarse para presentar todas las pasadas requeridas.							
Informe de soldadura de calificación de respaldo No(s):							
Aprobado por:							

## WPS para la temperatura 60°C:

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Proceso/Método de aplicación: Soldadura SMAW		WPS Número:		2			
Grado del material:	X70M	Espesor de pared:		13 mm			
Diámetro exterior:	365 mm (14.37")	Ángulo de biselado:		30°			
Tipo de junta:	A tope, junta en "V"	Rotado o fijo:		Fijo			
Tipo de raspado (si aplica):	Escobillado	Número de soldadores:		2			
Dirección de la soldadura:	Ascendente / D 3G/ 6G	Temperatura de interfase:		Mín. 120			
Temperatura de precalentamiento:	60°C	Método de calentamiento:		Soplete			
Método de calentamiento:	Soplete	Material de aporte y flujo:		FOX CEL 85 8010-P1			
Material de aporte y flujo:	FOX CEL 85 8010-P1	Características de la flama:		Herramientas de limpieza y/o esmerilado:			
Características de la flama:		Número mínimo de pases:		4			
Tipo y eliminación de abrazadera de alineación:		Tiempo máximo entre pasada de raíz y el inicio de la segunda		Tiempo máximo entre la segunda pasada y el inicio de la tercera pasada:			
Tiempo máximo entre pasada de raíz y el inicio de la segunda	Máximo 5 min.			5 minutos			
Método de enfriamiento:	Al ambiente	Procedimiento PWHT:		N/A			
DISEÑO DE LA JUNTA							
SECUENCIA DE LOS CORDONES							
PARÁMETROS DE SOLDADURA							
Pase	Proceso/ Características eléctricas	Material de Grupo o clasificación	Tamaño del electrodo	Rango de voltaje (V)	Rango de amperaje (A)	Velocidad de las pasadas (cm/min)	Rango del calor de aporte (W)
Primer pase	DC -	8010	Ø1/8" x 350 mm	29.3--26.4	115-130	26.67	-3369.5--3432
Segundo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.5-32.7	130-140	25.09	3315-4578
Tercer pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	26.4-32	130-140	18.09	3432-4480
Cuarto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	26.5-31.6	130-140	19.87	3445-4424
Quinto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.5-32.5	130-140	21.29	3315-4550
Sexto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.2-33.4	130-140	22.42	3276-4676
Séptimo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25-32.3	130-140	26.66	3250-4522
Nota: Esta tabla no pretende limitar el número de cordones de soldadura y la tabla debe ajustarse para presentar todas las pasadas requeridas.							
Informe de soldadura de calificación de respaldo No(s):							
Aprobado por:							

## WPS para la temperatura 90°C:

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Proceso/Método de aplicación:		Soldadura SMAW		WPS Número:	3		
Grado del material:		X70M		Espesor de pared:	13 mm		
Diámetro exterior:		365 mm (14.37")		Ángulo de biselado:	30°		
Tipo de junta:		A tope, junta en "V"		Rotado o fijo:	Fijo		
Tipo de raspado (si aplica):		Escobillado		Número de soldadores:	2		
Dirección de la soldadura:		Ascendente / D 3G/ 6G		Temperatura de interpase:	Mín. 120		
Temperatura de precalentamiento:		90 °C			Máx. 250		
Método de calentamiento:		Soplete		Herramientas de limpieza y/ Cepillo			
Material de aporte y flujo:		FOX CEL 85 8010-P1		Número mínimo de pases:	4		
Características de la flama:							
Tipo y eliminación de abrazadera de alineación:							
Tiempo máximo entre pasada de raíz y el inicio de la segunda pasada:		Máximo 5 min.		Tiempo máximo entre la segunda pasada y el inicio de la tercera pasada: 5 minutos			
Método de enfriamiento:		Al ambiente		Procedimiento P/WHT:	N/A		
DISEÑO DE LA JUNTA							
SECUENCIA DE LOS CORDONES							
PARÁMETROS DE SOLDADURA							
Pase	Proceso/ Características eléctricas	Material de Grupo o clasificación	Tamaño del electrodo	Rango de voltaje (V)	Rango de amperaje (A)	Velocidad de las pasadas (cm/min)	Rango del calor de aporte (J)
Primer pase	DC -	8010	Ø1/8" x 350 mm	28.3--25.4	115-130	27.86	-3254.5--3302
Segundo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.5-32.7	130-140	24.49	3315-4578
Tercer pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	26.4-32	130-140	17.42	3432-4480
Cuarto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	26.5-31.6	130-140	19.54	3445-4424
Quinto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.5-32.5	130-140	20.78	3315-4550
Sexto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.2-33.4	120-130	20.88	3024-4342
Séptimo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25-32.3	120-130	21.77	3000-4199
Nota: Esta tabla no pretende limitar el número de cordones de soldadura y la tabla debe ajustarse para presentar todas las pasadas requeridas.							
Informe de soldadura de calificación de respaldo No(s):							
Aprobado por:							

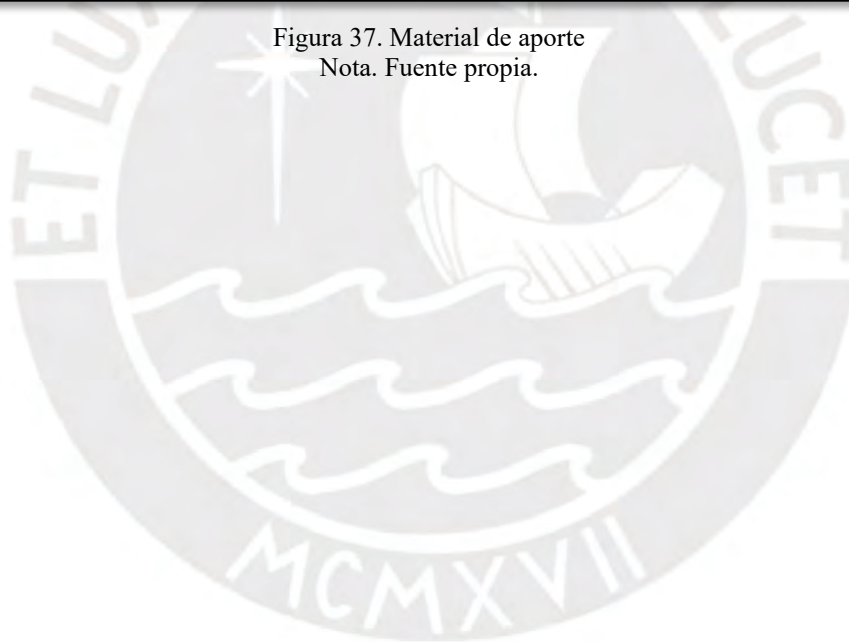
## WPS para la temperatura 120°C:

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Proceso/Método de aplicación: Soldadura SMAW				WPS Número: 4			
Grado del material: X70M				Espesor de pared: 13 mm			
Diámetro exterior: 365 mm (14.37")				Ángulo de biselado: 30°			
Tipo de junta: A tope, junta en "V"				Rotado o fijo: Fijo			
Tipo de raspado (si aplica): Escobillado				Número de soldadores: 2			
Dirección de la soldadura: Ascendente / D 3G/ 6G				Temperatura de interpase: Min. 120			
Temperatura de precalentar: 120 °C				Máx. 250			
Método de calentamiento: Soplete							
Material de aporte y flujo: FOX CEL 85 8010-P1				Herramientas de limpieza y/ Cepillo			
Características de la flama:				Número mínimo de pases: 4			
Tipo y eliminación de abrazadera de alineación:							
Tiempo máximo entre pasada de raíz y el inicio de la segunda pasada:		Máximo 5 min.		Tiempo máximo entre la segunda pasada y el inicio de la tercera pasada:		5 minutos	
Método de enfriamiento: Al ambiente				Procedimiento PwHT: N/A			
DISEÑO DE LA JUNTA							
SECUENCIA DE LOS CORDONES							
PARÁMETROS DE SOLDADURA							
Pase	Proceso/ Características eléctricas	Material de Grupo o clasificación	Tamaño del electrodo	Rango de voltaje (V)	Rango de amperaje (A)	Velocidad de las pasadas (cm/min)	Rango del calor de aporte (w)
Primer pase	DC -	8010	Ø1/8" x 350 mm	27-30	115-130	30.48	3105-3900
Segundo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.5-32	130-140	26.28	3315-4480
Tercer pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	26.4-32	130-140	18.79	3432-4480
Cuarto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	26.5-32	130-140	19.05	3445-4480
Quinto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25.5-33	130-140	20.17	3315-4620
Sexto pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25-32	120-130	20.88	3000-4160
Séptimo pase	DC +	8010	Ø1/8" x 350 mm	25-32	120-130	21.17	3000-4160
Nota: Esta tabla no pretende limitar el número de cordones de soldadura y la tabla debe ajustarse para presentar todas las pasadas requeridas.							
Informe de soldadura de calificación de respaldo No(s):							
Aprobado por:							

Según las guías de recomendación de SOLDEXA, se utilizó como material de aporte un electrodo E8010-G:



Figura 37. Material de aporte  
Nota. Fuente propia.



## 2.2. Calificación del WPS

Las soldaduras estarán regidas por el procedimiento establecido en la norma API 1104. Para poder corroborar que la unión se realizó exitosamente se deberán someter a diversas pruebas los especímenes elaborados. Según la norma API 1104, se deberán realizar probetas según el tipo de ensayo a realizar:

Tabla 4. Número de ensayos para el WPS

Diámetro exterior		Número de especímenes					
Pulg.	mm.	Tracción	Nick Break	Doblado de raíz	Doblado de cara	Doblado de lado	Total
Espesor de pared > 0.5 pulg. (12.7 mm)							
≤4.5	≤114.3	0	2 <sup>b</sup>	0	0	2	4
>4.5 <sup>a</sup> 12.7	>114.3 <sup>a</sup> 323.9	2	2 <sup>b</sup>	0	0	4	8
>12.750	>323.9	4	4	0	0	8	16

a. Para materiales con SMYS con grado mayores a X42, se requiere al menos 1 ensayo de tracción.  
 b. Un ensayo Nick Break y un ensayo de doblado de raíz serán tomados de 2 probetas soldadas, o para tuberías de diámetro menor o igual a 1.315 pulg. (33.4 mm), una sección entera será tomada como espécimen para el ensayo de tracción.

Nota. Tomado de API 1104.

Además, la ubicación, cantidad y tipos de ensayos serán determinados mediante la siguiente figura:

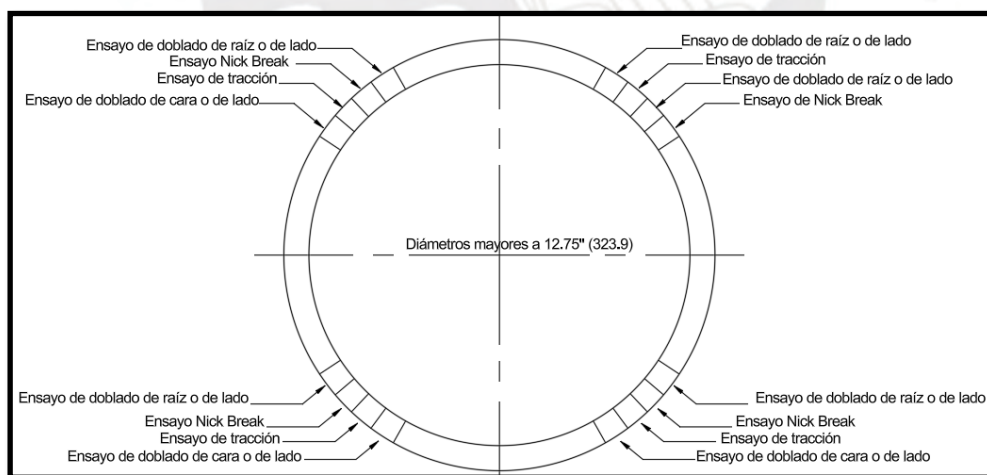


Figura 38. Ubicación de las probetas para ensayos del WPS

Nota. Tomado de “API 1104, 22nd edition”, 2023.

Para este estudio en particular se decidió reemplazar el ensayo de ultrasonido por el de Nick Break ya que está permitido por la norma API 1104 y debido a fallas técnicas durante el uso del equipo. Asimismo, se decidió examinar el comportamiento de las uniones soldadas a 4 distintas temperaturas de precalentamiento: ambiente, 60°C, 90°C y 120°C.

### 2.2.1. Cupón de prueba

Se realizó el mecanizado para preparar el material antes de la ejecución de las soldaduras según el apartado 9.12.5.2 de la norma API 1104 donde se indica que deberán ser biseladas con un ángulo de  $30^\circ \pm 5^\circ$  y dejar un ancho del pase de raíz de 1.6 mm.

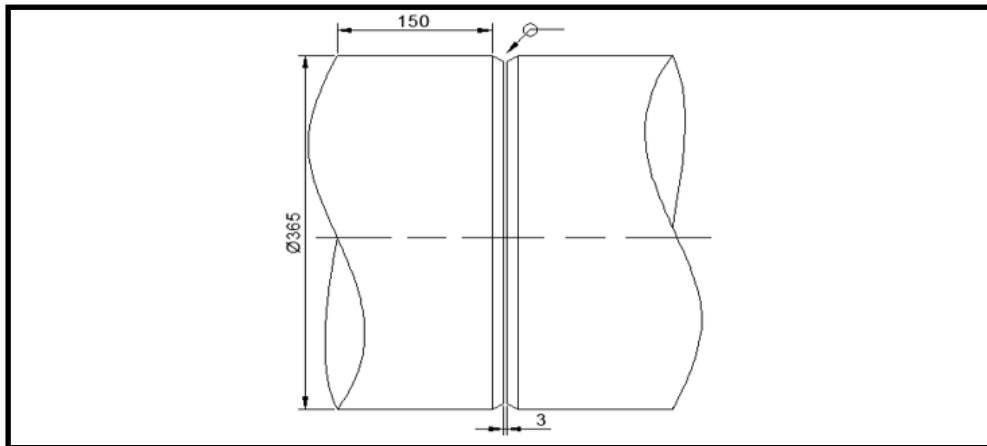


Figura 39. Cupón de soldadura  
Nota. Fuente propia.

### 2.2.2. Inspección visual

El objeto de esta evaluación es determinar la presencia de imperfecciones o daños en las soldaduras que puedan afectar las propiedades mecánicas de las mismas.



Figura 40. Inspección visual  
Nota. Fuente propia.

### Criterio de aceptación:

Según el apartado 6.4 de la norma API 1104, la soldadura será aceptada si está libre de fisuras, inadecuada penetración y deberá presentar una apariencia ordenada.

### 2.2.3. Tracción

El objeto de este será comprobar que los esfuerzos a la tracción de los cordones de soldadura sean igual o mayores al material base acorde a la indicado en el apartado 12.6.2.3 de la norma API 1104. Los planos de las probetas a examinar se muestran a continuación:

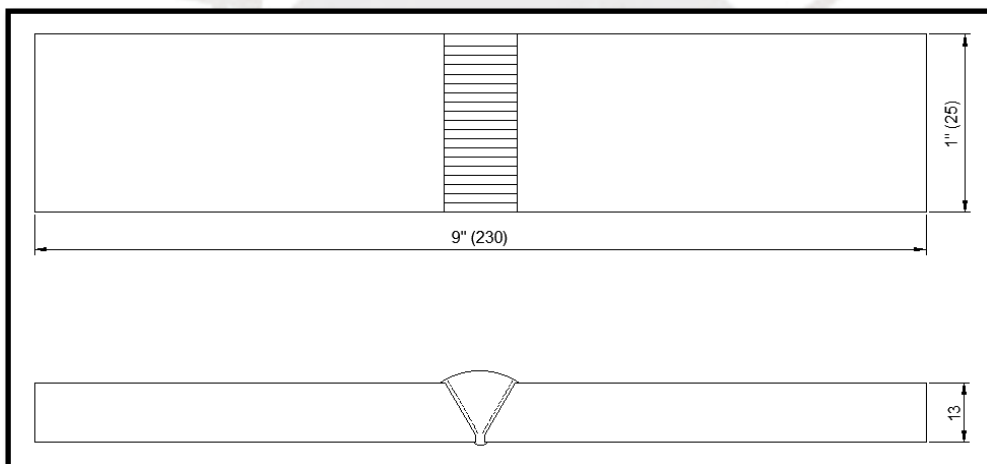


Figura 41. Probeta para ensayo a la tracción  
Nota. Tomado de “API 1104, 22nd edition”, 2023.

Se llevó a cabo el mecanizado de las tuberías, con lo cual se obtuvo el siguiente resultado para cada tipo de temperatura a ensayar:



Figura 42. Probetas de Tracción  
Nota. Fuente propia

Se pudo observar la presencia en los extremos de las probetas de material polimérico que servía para proteger en su momento a la tubería. Es por ello que se realiza previamente un limado como se muestra a continuación:

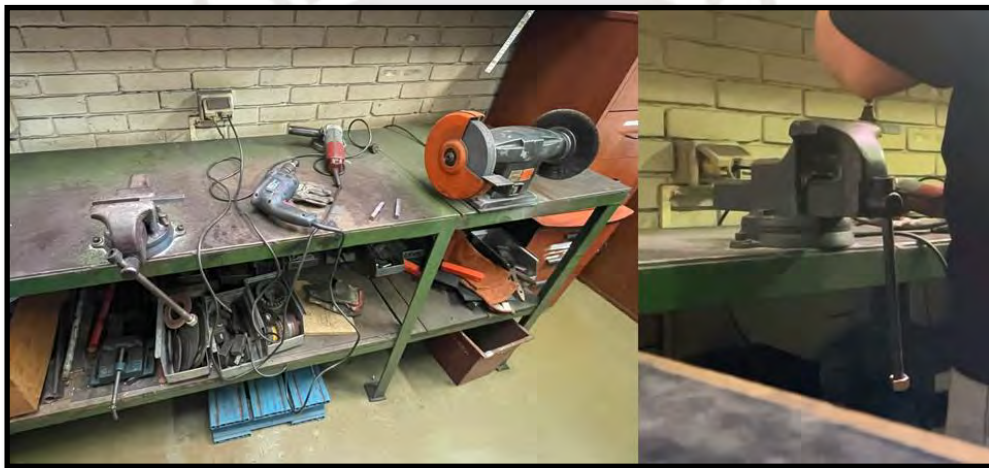


Figura 43. Preparación de probetas de Tracción  
Nota. Fuente propia

Luego, se pudo obtener un mejor acabado en los extremos que facilitó el agarre de las mordazas de la máquina:



Figura 44. Probetas de tracción acondicionadas  
Nota. Fuente propia

Según el apartado 12.6.2.3 de la norma API 1104, el esfuerzo a la tracción de la junta soldada deberá ser mayor o igual al del material base. Una vez se tuvo a disposición el material a ensayar, se procedió a realizar lo siguiente:

1. Selección de la muestra a ensayar.
2. Colocar la probeta entre las mordazas de la máquina para ensayos de tracción.
3. Calibrar mediante el software el equipo.
4. Observa el comportamiento de la gráfica en el monitor durante el ensayo.

#### **Criterios de aceptación:**

Según el apartado 5.6.2.3 de la norma API 1104, existen 2 casos a evaluar según la posición de rotura: rotura por fuera de la unión soldada y rotura en la soldadura. En el primer caso, el esfuerzo a la tracción no deberá ser menor que el 95% del mínimo indicado en la especificación del material ensayado (541.5 MPa). Por otro lado, para el segundo caso, el esfuerzo a la tracción resultante del ensayo deberá ser igual o mayor al indicado por la especificación del material base. Los resultados contra los que se van a comparar están mostrados en la Tabla 2 del presente documento (570 MPa).

#### **2.2.4. Doblado**

El objeto del ensayo de doblado será demostrar la capacidad de deformación de los cordones de soldadura a través de lo establecido en la norma API 1104 en la sección 5.6.5.

Para efectuar este análisis lo primero será mecanizar las muestras según lo indicado en la normativa y luego posicionar las piezas en el equipo para doblado para ir realizando el procedimiento tal cual se indica en el API 1104.

A continuación, se muestran las dimensiones para el mecanizado que deberán tener las probetas:

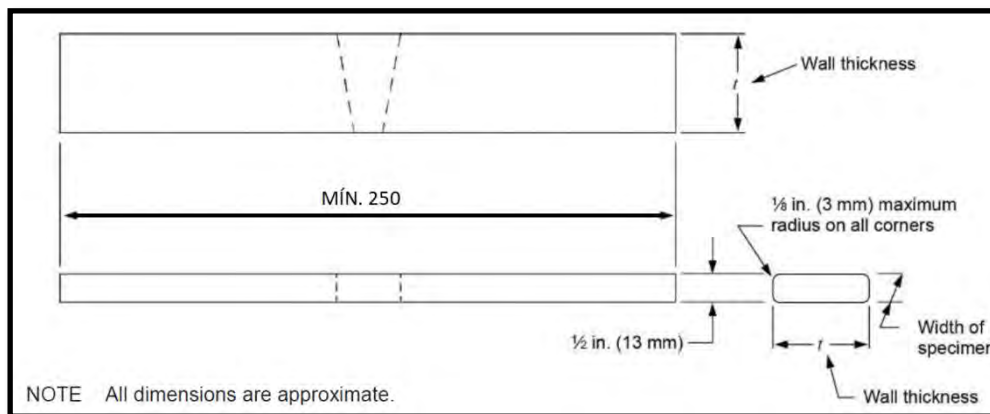


Figura 45. Plano para probeta de doblado  
Fuente. Norma API 1104.

Se colocaron las muestras en el equipo de doblado de la siguiente manera y se prosiguió acorde a lo indicado en la norma API 1104 en la sección 5.6.5.



Figura 46. Ensayos de doblado API 1104  
Nota. Fuente propia

Con el empleo del lente graduado se procede a medir la longitud de las fisuras:



Figura 47. Lente graduado  
Nota. Fuente propia.

Con la ayuda de este dispositivo se logra medir con gran exactitud la longitud fisurada:

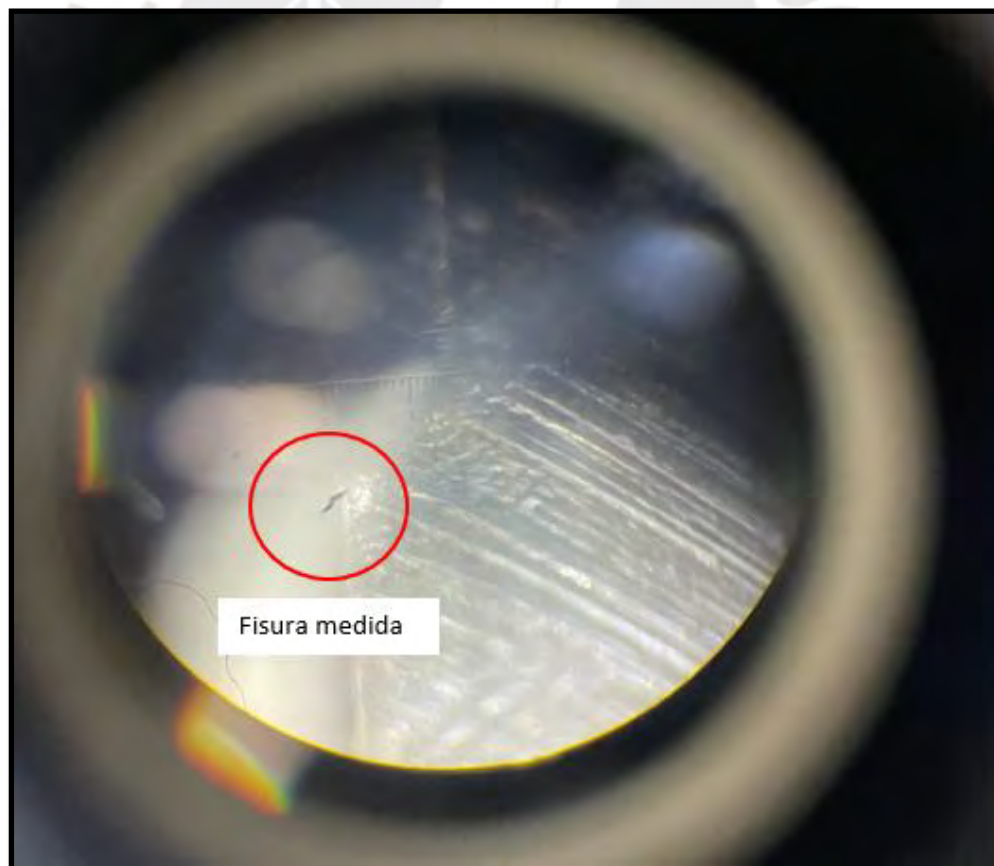


Figura 48. Fisura observada con lente graduado  
Nota. Fuente propia.

### Criterios de aceptación:

Según lo mencionado en el apartado 5.6.4.3 de la norma API 1104, las fisuras no deberán exceder los 6 mm de longitud medido en cualquier dirección. Además, para diámetros mayores a 12 3/4" si alguna probeta no cumple lo especificado anteriormente, se deberá solicitar adicionalmente otras 2 probetas de locaciones adyacentes. Finalmente, si aún estas últimas no cumplen, se considera como no aceptada la unión soldada.

### 2.2.5. Dureza

Este ensayo tiene por objetivo medir la ductilidad y resistencia al desgaste. La muestra de prueba se preparará de acuerdo con ASTM E92 o según lo indique la empresa. El número requerido de indentaciones se realizará utilizando el equipo de ensayos Vickers con una carga de 10 kg o menos. Las ubicaciones serán como se observa en la siguiente figura del apartado 10.3.6.5 de la norma API 1104 (o en ubicaciones especificadas por la empresa) como si se tratara de una reparación ya que de esta forma tendremos unas condiciones más exigentes para asegurar la calidad de los cordones:

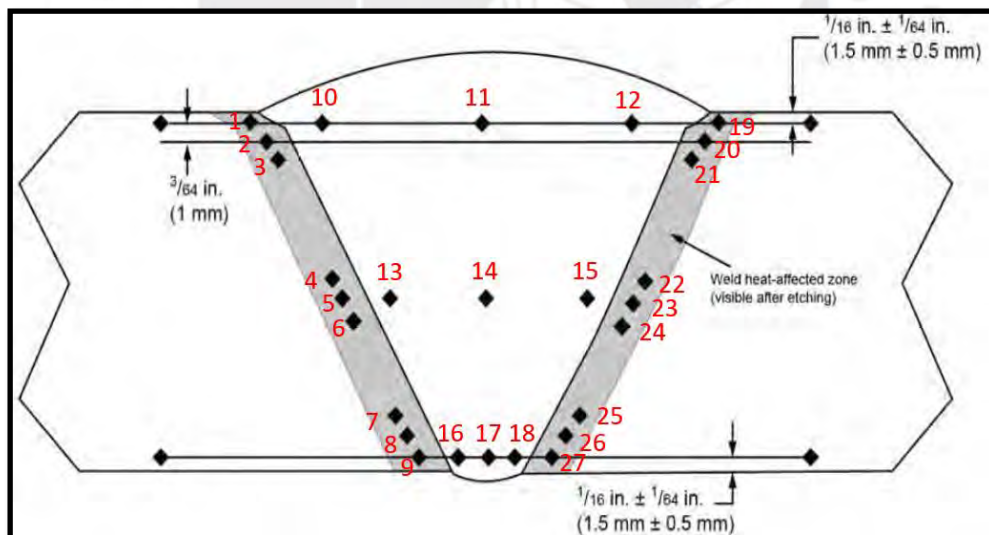


Figura 49. Locación de las indentaciones  
Nota. Tomado de "API 1104, 22nd edition", 2023.

Las indentaciones para la medición de la dureza en la HAZ deberán estar completamente dentro de esta y ubicadas lo más cerca posible del límite de fusión (entre el metal de soldadura y la HAZ). Según la norma ASTM E92, la distancia entre puntos de muestra será de 2.5 veces la diagonal del diamante.

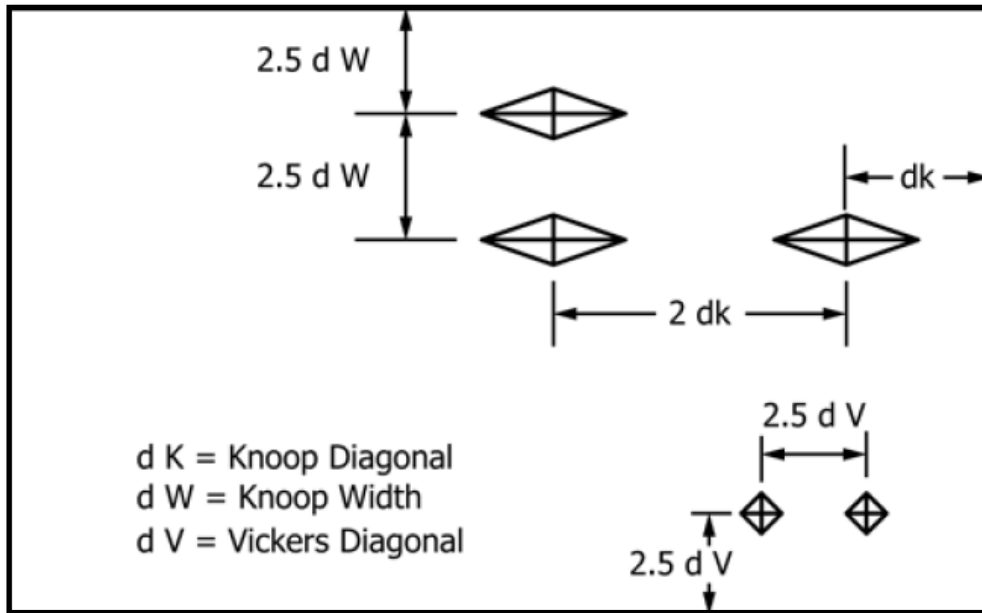


Figura 50. Distancia entre puntos de muestra  
 Nota. Tomado de "ASTM E92-17", 2023.

### Criterios de aceptación:

Según la norma API 1104, los valores máximos permitidos de dureza para una reparación de soldadura figuran en la tabla 12 de la norma. Esta expresa que para el material de aporte la dureza máxima deberá ser de 275 HV10 y de 350 HV10 para la zona afectada por el calor.

Se siguen los siguientes pasos para el ensayo:

1. Se selecciona la muestra a ensayar.
2. Se instala en la máquina de dureza Vickers.
3. Se analiza punto por punto desde el número 1 hasta el 27.

### 2.2.6. Impacto Charpy

Este ensayo tiene por finalidad corroborar la capacidad de absorción de la energía del material de aporte en las uniones soldadas. Las muestras de prueba de impacto Charpy con muesca en V se prepararán con sus longitudes paralelas al eje de la tubería. Se deben utilizar muestras de mayor tamaño permitido por el espesor de la pared de la tubería. La temperatura según las especificaciones del material a examinar indica 0°C para la ejecución del presente ensayo, sin embargo, se optó por ensayar a -20°C ya que fue es una condición más exigente. El espesor de las probetas pequeñas debe ser al menos del 80 % del espesor de la pared. Se extraerán seis muestras de cada una de las siguientes posiciones: 12, 6 y 3 o 9 horas, para un total de 18 probetas. Para cada una de estas posiciones, tres muestras deberán tener la muesca en V colocada en la línea central de la soldadura; y los otros tres tendrán la muesca en V colocada en la ZAT como se muestra en la siguiente figura:

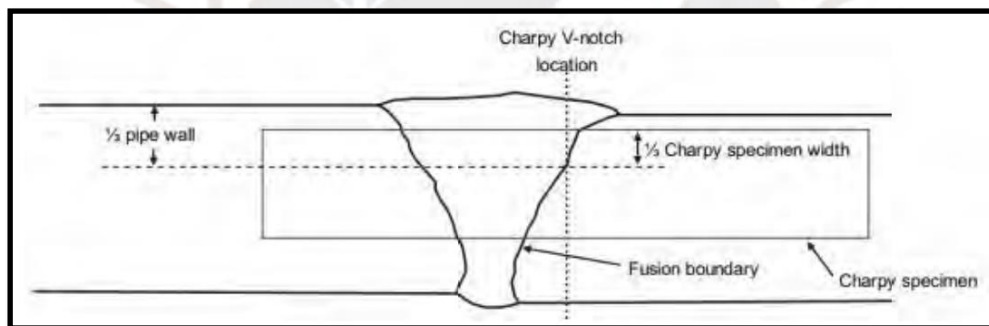


Figura 51. Ubicación para el ensayo de impacto Charpy  
Nota. Tomado de “API 1104, 22nd edition”,2023.

#### Criterios de aceptación:

La norma API 1104 especifica que se deberán cumplir 3 criterios para que se pueda aceptar el procedimiento de soldadura:

- El promedio de energía absorbida de 3 probetas deberá ser de al menos 40J.
- La energía mínima absorbida de manera individual de un conjunto de 3 muestras deberá ser igual o mayor a 30J.
- Cuando se utilicen probetas sub dimensionadas, se aplicarán los requisitos de energía, sin corrección o conversión, según lo establecido en los 2 puntos anteriores.

Acorde a lo especificado en la norma API 1104, se efectúan las marcas a las para luego realizar un mecanizado sobre estas líneas y obtener el largo final de las muestras según buenas prácticas y respetando la Figura A.2 del apartado A.3.4.2 de la norma API 1104:

Tabla 5. Probetas de impacto del WPS a ensayar

Temperatura	Probetas a ensayar
T amb	
T 60°C	
T 90°C	
T 120°C	

Nota. Fuente propia.

Luego, se realizan las entallas con el equipo CHARPY:



Figura 52. Equipo para entalle BLACKS CHARPY  
Nota. Fuente propia.

A manera de ejemplo, se muestran los entalles finales a temperaturas de 90°C y 120°C:



Figura 53. Probetas con entalla para ensayo de impacto  
Nota. Fuente propia

Luego se siguen los siguientes pasos:

1. Selección de un grupo de muestras.
2. Colocar estas en la máquina de ensayos Zwick/Roell
3. Esperar a que el tanque de Nitrógeno ayude a obtener una temperatura a  $-20^{\circ}\text{C}$ .
4. Programar el software del equipo.
5. Empezar a ensayar acorde a la norma API 1104.

### 2.2.7. Nick Break

El ensayo Nick Break se utiliza para determinar la calidad de una soldadura e implica revisar la soldadura longitudinalmente y luego inspeccionar visualmente en busca de imperfecciones internas, como falta de fusión de las paredes laterales, falta de fusión entre las pasadas y porosidad. Las muestras de prueba deben tener aproximadamente 9 pulg. (230 mm) de largo y aproximadamente 1 pulg. (25 mm) de ancho y pueden cortarse por cualquier medio. Deberán tener muescas en cada lado del centro del metal de soldadura, y cada muesca tendrá aproximadamente 1/8 de pulgada (3 mm) de profundidad y los bordes serán lisos y paralelos. A continuación, se muestran las dimensiones para el presente ensayo acorde al API 1104:

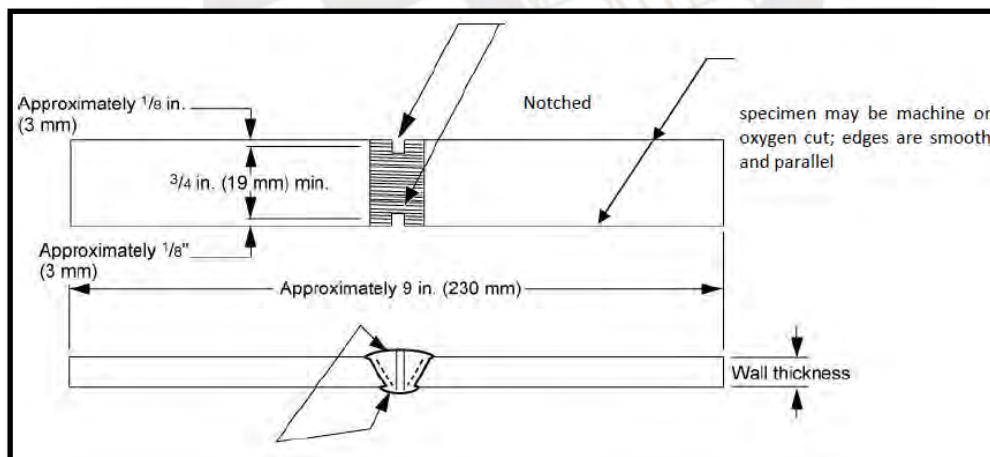


Figura 54. Plano de ensayo Nick Break  
Nota. Tomado de API 1104.

Se tiene que hacer un acondicionamiento previo de las probetas ya mecanizadas para que tengan las muescas de 3 mm en ambos lados acorde a la norma API 1104:



Figura 55. Preparación de probetas Nick Break  
Nota. Fuente propia.

Luego se siguen los siguientes pasos:

1. Selección de una muestra.
2. Colocar estas en la máquina de ensayos sobre los apoyos respectivos.
3. Encender el equipo y empezar a presionar la probeta por ambas muescas.



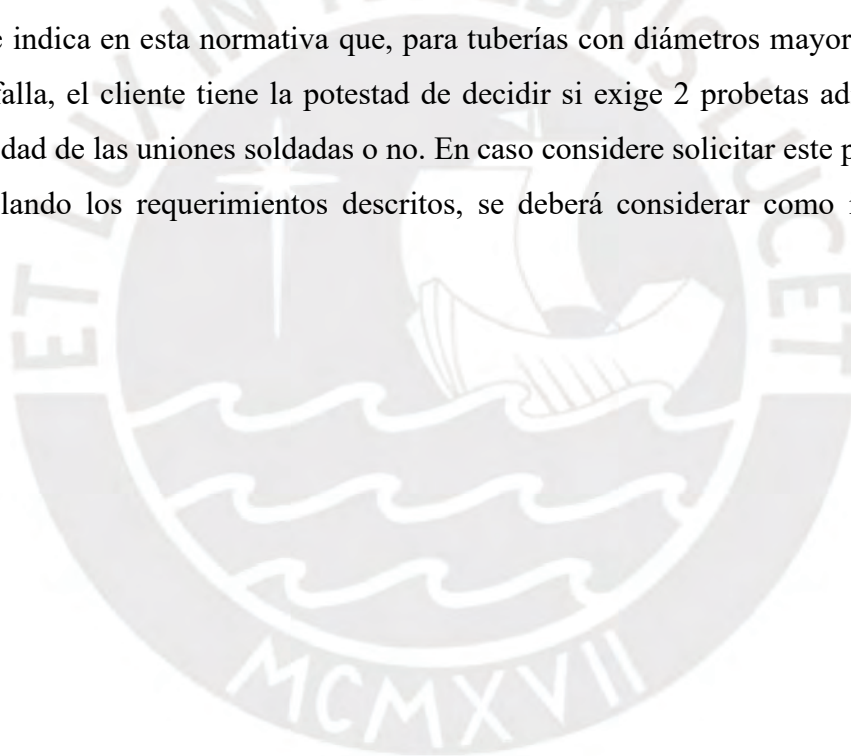
Figura 56. Ensayo Nick Break por API 1104  
Nota. Fuente propia.

**Criterios de aceptación:**

Según la norma API 1104, se deben cumplir los siguientes requisitos para que la soldadura pueda calificar como aceptable:

- Las áreas expuestas de la soldadura deben presentar completa penetración y fusión.
- La medida más grande de un bolsillo de ser como máximo de 1.6 mm.
- La suma de las áreas donde existe atrapamiento de gas no deberán exceder el 2% del área expuesta.
- Las inclusiones no deben ser mayores a 0.8 mm de profundidad y menores que 3 mm o 1 ½ veces el espesor de pared en longitud, cualquiera que sea menor.
- La aparición de ojos de pescado no es causa de rechazo de la soldadura.

Asimismo, se indica en esta normativa que, para tuberías con diámetros mayores a 12 ¾", si una probeta falla, el cliente tiene la potestad de decidir si exige 2 probetas adicionales para validar la calidad de las uniones soldadas o no. En caso considere solicitar este par adicional y continúen fallando los requerimientos descritos, se deberá considerar como inaceptable la soldadura.



### 2.2.8. Metalografía

Se realiza el análisis de la microestructura de los puntos reconocidos con la mayor dureza para observar las fases que están presentes en estos y de este modo poder interpretar los resultados obtenidos en los demás ensayos. Para este ensayo se analizarán las capturas a 100 aumentos de las zonas de interés (material base, material de aporte y ZAC) y a 500 aumentos para la zona de la ZAC ya que esta es de especial interés por ser donde se obtendrá la mayor dureza.

Para preparar las probetas primero se escogieron las muestras cuya dureza resultó la mayor de todas (una por temperatura). Luego, el siguiente paso fue realizar los cortes de la zona de interés con la ayuda de la cortadora metalográfica LECO SX-100M para cortar sin generar calor significativo que pueda alterar los especímenes.



Figura 57. Cortadora metalográfica LECO SX-100M  
Nota. Fuente propia.

Luego, con la ayuda de la briquetadora BUEHLER, se deposita la muestra del paso anterior y se rellena con resina para luego comprimirla. Al estar bajo presión la resina se unificará.



Figura 58. Briquetadora BUEHLER

Nota. Fuente propia.

Con la ayuda de este procedimiento se pueden obtener las siguientes muestras preparadas:



Figura 59. Muestra encapsuladas sin pulir

Nota. Fuente propia.

Ahora el siguiente paso es pulir con la máquina automatizada STRUERS:



Figura 60. Pulidora STRUERS  
Nota. Fuente propia.

A continuación, se muestra el acabado que se logra obtener previo a la examinación de la metalografía:

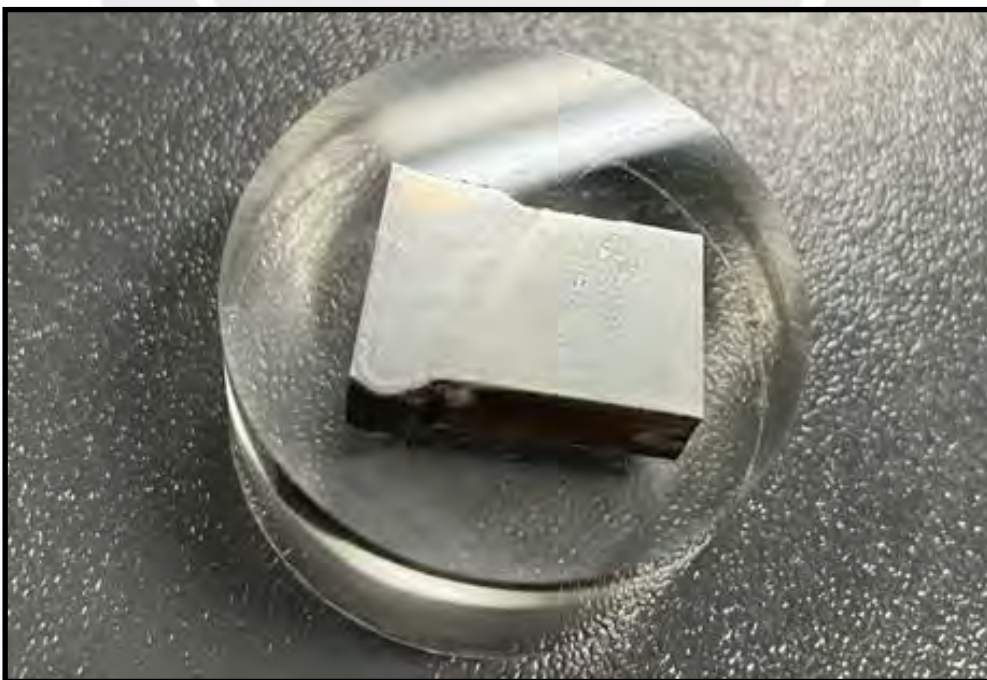
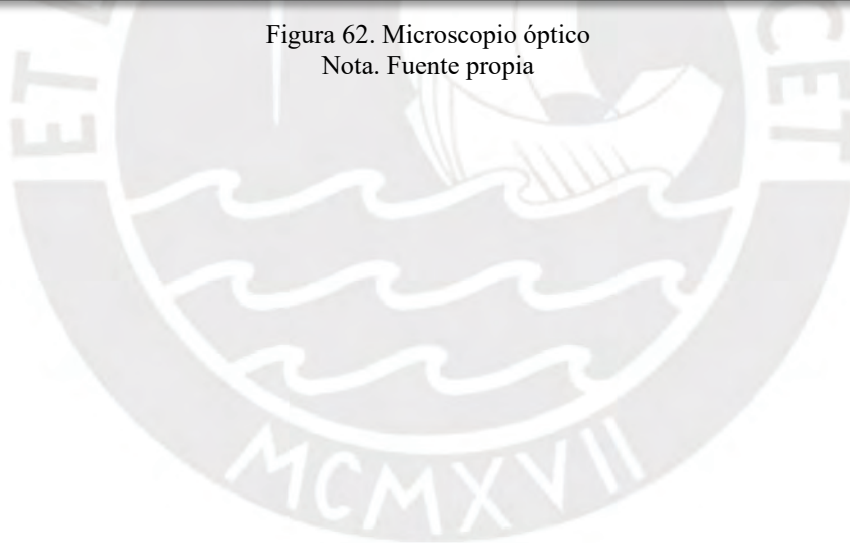


Figura 61. Muestra para metalografía pulida  
Nota. Fuente propia.

Para realizar los ensayos se utilizó el microscopio óptico de la marca Leica:



Figura 62. Microscopio óptico  
Nota. Fuente propia



## Capítulo 3: Evaluación y Discusión de resultados

### 3.1. Análisis de resultados de los ensayos de caracterización

#### 3.1.1. Ensayo de composición química del material base

Se recopilaron los valores obtenidos del ensayo de composición química y se muestran a través de la siguiente tabla:

Tabla 6. Resultados del ensayo químico

Composición química					
C%	Mn%	P%	S%	Si%	Cr%
0,117	1,199	0,012	0,0005	0,2805	0,069
Ni%	Mo%	Cu%	Nb%	Ti%	V%
0,106	0,104	0,104	0,024	0,005	0,065
Co%	Al%	W%	Sn%	Fe%	B%
0,0071	0,0331	<0,0015	0,0098	97,789	0,0006

Nota. Fuente propia.

- Por lo tanto, se demuestra que la composición química del material en estudio resultó ser la esperada debido a que los porcentajes de elementos aleados están dentro de lo indicado en la especificación API 5L.

#### 3.1.2. Ensayo de metalografía del material base

Según la tabla indicada en la norma ASTM E45, lo mostrado en la Figura 5 corresponde a una severidad de 1.5 tipo D óxido globular serie pesada.

Se observa en la Figura 6 la presencia de inclusiones (puntos negros) y una microestructura tipo ferrita con grano de esta esparcidos. Lo indicado se basa en una comparación con lo expuesto en el libro “Atlas of microstructures of industrial alloys”.

Como se puede apreciar en la Figura 7 la ferrita está presente en las áreas claras y la existencia de carbono en las oscuras.

### 3.1.3. Ensayo de Tracción del material base

Se obtiene mediante el ensayo de tracción la siguiente gráfica:

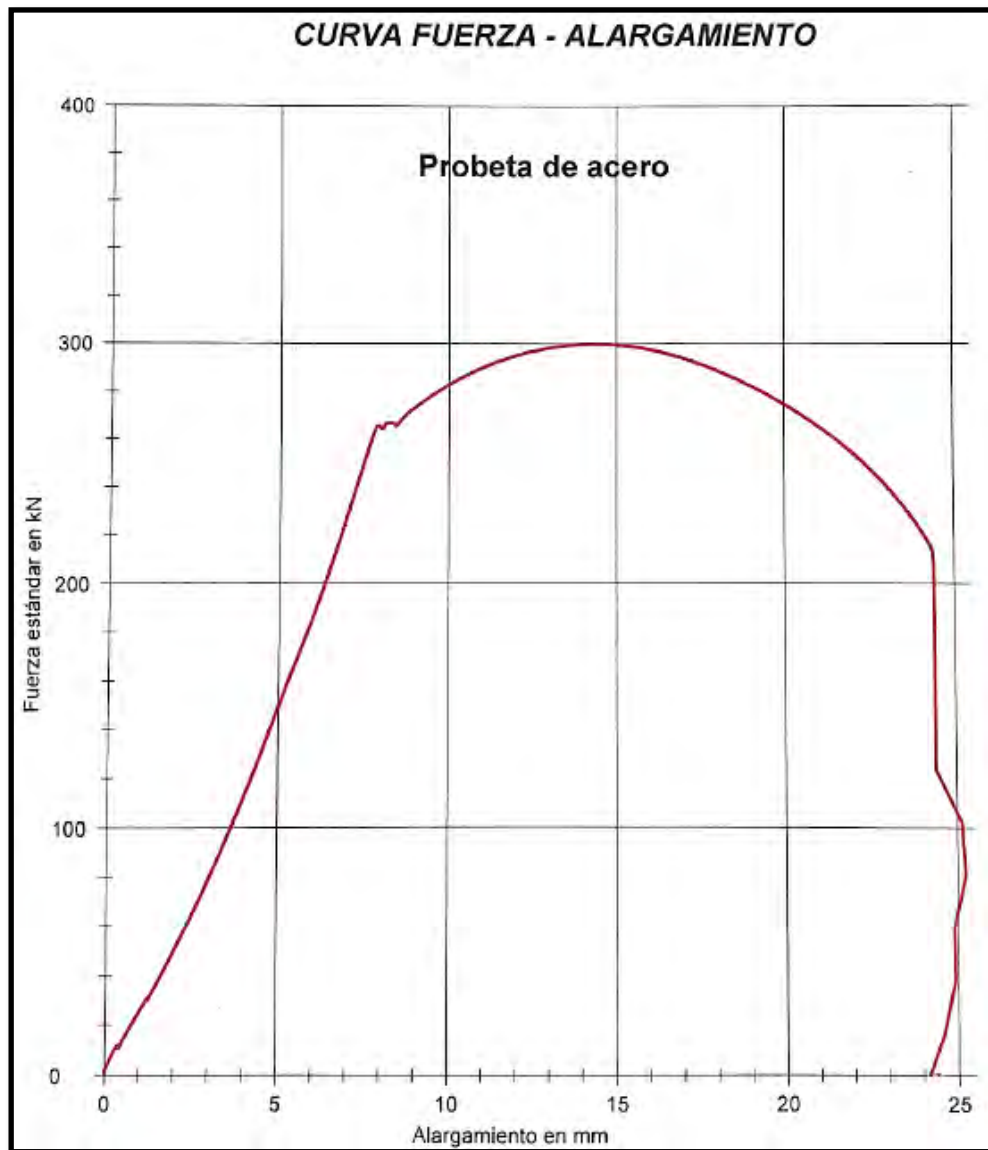


Figura 63. Curva de alargamiento  
Nota. Fuente propia

Analizando la geometría de la probeta en estudio se puede obtener la variación en las dimensiones antes y después de la rotura:

Tabla 7. Resultados ensayo de tracción del material base

Longitud entre marcas Lo (mm)	Sección transversal		Cargas (N)		Tensiones (MPa)		Longitud final entre marcas Lf (mm)	Alargamiento %
	Dimensiones (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima		
50.8	38.00 x 11.17	424.46	265600	299900	625.7362296	706.5447863	68.35	34.55%

Nota. Fuente propia

Acerca del ensayo de tracción se puede observar que tuvo un comportamiento dentro de los márgenes permitidos por la especificación del material base, con un esfuerzo a la tracción aproximadamente 93% del máximo permitido por la especificación.

Finalmente, comparando los resultados obtenidos contra la especificación API 5L de la tubería en estudio se puede concluir que el material del ensayo cumple con los requerimientos establecidos por la especificación mostrados en la Tabla 2.

### 3.1.4. Ensayo de impacto del material base

Se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 8. Resultados ensayo de impacto del material base

Probeta N°	Energía absorbida (J)	Promedio
1	232.2	235.7
2	231	
3	244	

Nota. Fuente propia.

Se logra observar que las capacidades de absorción al impacto del material durante la caracterización arrojaron valores dentro de lo permitido para un material API PSL2 X70M ya que el valor promedio de dureza obtenido está por encima de lo mínimo indicado en especificación del material base, aproximadamente 9 veces este último.

De la tabla 6 se obtiene el valor de 235.7 J, y por ende se puede concluir que el valor promedio obtenido en el ensayo cumple con los 27 J que exige como mínimo la especificación API 5L mostrados en la Tabla 3 del presente documento.

### 3.1.5. Ensayo de dureza del material base

Siguiendo las indicaciones de la norma ASTM E92, se efectúa el ensayo y se obtiene el siguiente cuadro resumen:

Tabla 9. Resultados análisis de dureza del material base

Ensayo de dureza	
HRB	HV
99.5	237
97	222
95.3	212
94.1	205.5
94.2	206

Nota. Fuente propia.

La conversión de HRB a HV se llevó a cabo interpolando los valores brindados por la norma ASTM E140-07 a una temperatura ambiente de  $T_{amb}=23^{\circ}\text{C}$ :

Tabla 10. Tabla de conversión para aceros no austeníticos

Dureza Rockwell B, 100 kg-f (HRB)	Dureza Vickers (HV)	Dureza Brinell 3000 kg-f (HBS)	Dureza Knoop 500 kg-f (HK)	Dureza Rockwell A 60 kg-f (HRA)	Dureza Rockwell F 60 kg-f (HRF)	Dureza superficial Rockwell			Dureza Rockwell B 100 kg-f (HRB)
						Escala 15-T 15 kg-f (HR 15-T)	Escala 30-T 30 kg-f (HR 30-T)	Escala 45-T 5 kg-f (HR 45-T)	
100	240	240	251	61.5	-	93.1	83.1	72.9	100
99	234	234	246	60.9	-	92.8	82.5	71.9	99
98	228	228	241	60.2	-	92.5	81.8	70.9	98
97	222	222	236	59.5	-	92.1	81.1	69.9	97
96	216	216	231	58.9	-	91.8	80.4	68.9	96
95	210	210	226	58.3	-	91.5	79.8	67.9	95
94	205	205	221	57.6	-	91.2	79.1	66.9	94

Nota. Tomado de “ASTM E140-07”, 2023.

Luego, se tiene de la especificación API 5L, que la tubería en estudio deberá cumplir con el siguiente requerimiento para calificar como tal:

Las tuberías de grado X65 hasta X80 deberán tener una dureza no mayor o igual a 300HV10.

De los valores obtenidos en el ensayo, se usarán los que estén más cercanos entre sí para no afectar el promedio estadístico:

$$\text{Promedio} = \frac{99.5+97+95.3+94.2}{4} = 96.5 \text{ HRB}$$

De la tabla 8, se obtiene una conversión equivalente a **219 HV**. Por lo tanto, la dureza cumple con los valores indicados en la especificación del material API 5L por ser no mayor a 300HV10.

- La dureza del material base está por debajo del máximo permitido por la especificación. Es por ello que se puede concluir que se cumple con el valor de dureza permitido para

este acero. Este material alcanzó un 73% del tope que podría haber alcanzado para este tipo de acero.

### **3.1.6. Inspección visual del material base**

- Se aprecia que en los ensayos de inspección visual no se detectaron fisuras o imperfecciones que superen a lo indicado por la norma API 1104, apartado 6.4.
- Los defectos encontrados pueden tener origen en la calidad del pulso del soldador, factores del sitio como la humedad o incluso la posible variación en la corriente, voltaje o la velocidad del calor de aporte durante la ejecución de la soldadura.
- Se concluye que las uniones soldadas poseen una apariencia profesional por el acabado que poseen según lo indicado en la norma API 1104.

## **3.2. Análisis de resultados de los ensayos de WPS**





### **3.2.1. Inspección Visual**

Se procedió a examinar las uniones para poder detectar alguna imperfección relevante, dentro de las cuales se pudo notar la presencia de resaltes los cuales fueron indicados con flechas. Además, se indicó al interior con una línea longitudinal las zonas que presentan socavaciones.

Para el presente estudio las tuberías fueron soldadas por dos soldadores homologados ya que los nipples a soldar fueron de 14". Motivo por el cual la probabilidad que las calidades en las soldaduras puedan diferir en algunas pasadas puede ser mayor.

A continuación, se presenta los escenarios observados para la inspección visual:

Tabla 11. Ensayos de inspección visual del WPS

Temperatura	Imágenes
T amb	
T 60°C	
T 90°C	
T 120°C	

Nota. Fuente propia.

Tomando como referencia la teoría del AWS B.11, se puede indicar que las soldaduras presentan socavaciones. Esto puede ser ocasionado debido a parámetros operativos como la variación de la corriente, variación del voltaje o el cambio en la velocidad del calor de aporte.

Además, se observó que los cordones poseen completa penetración interna como externamente. Asimismo, existe la presencia de inclusiones no significativas en la parte interior de las uniones soldadas.

Finalmente, se puede evidenciar que los defectos expuestos respetan los criterios de aceptación del API 1104 (la penetración fue la adecuada y presentó una apariencia profesional según lo estipulado por la norma).

### 3.2.2. Metalografía de la soldadura

A continuación, se presentan las imágenes obtenidas para los ensayos para las temperatura ambiente, 60°C, 90°C y 120°C:



Figura 64. Microestructura a Tamb con aumento 100X  
Nota. Fuente propia.

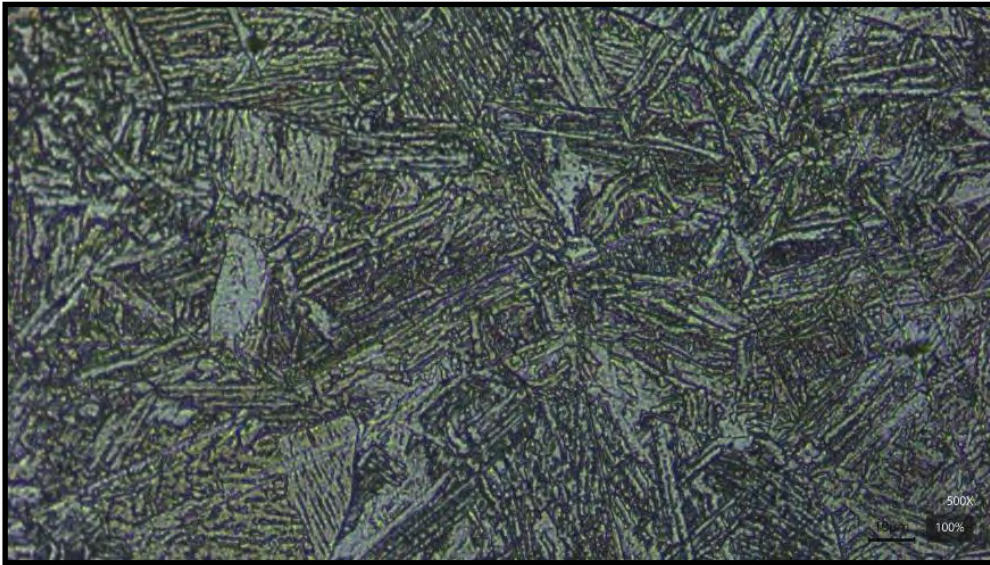


Figura 65. Microestructura a Tamb con aumento 500X  
Nota. Fuente propia.

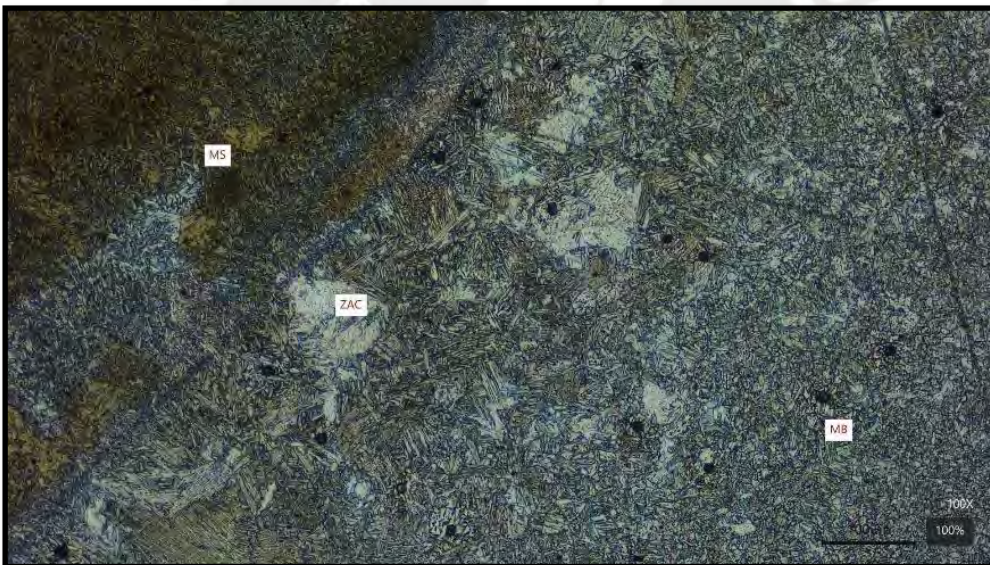


Figura 66. Microestructura a 60°C con aumento 100X  
Nota. Fuente propia.

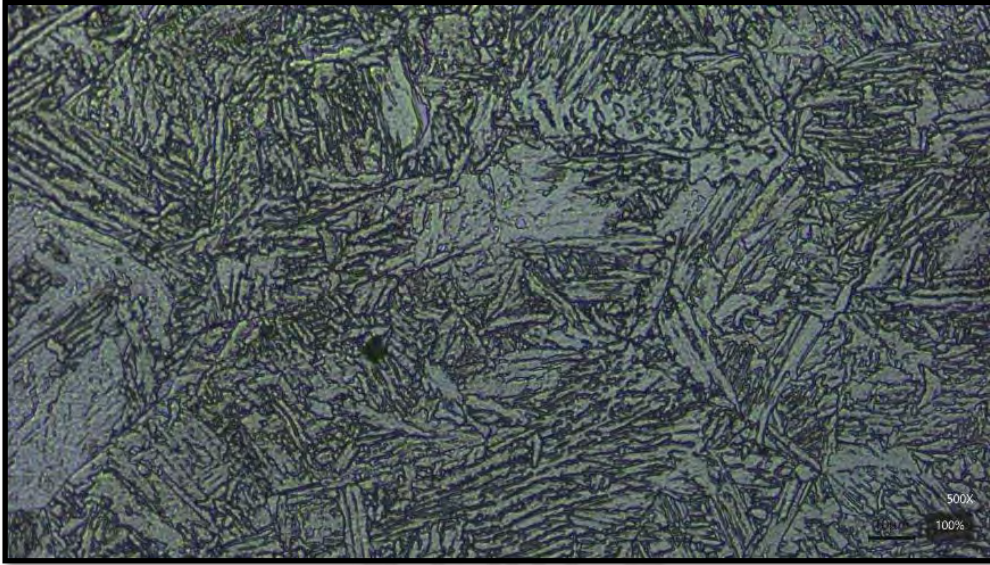


Figura 67. Microestructura a 60°C con aumento 500X  
Nota. Fuente propia.

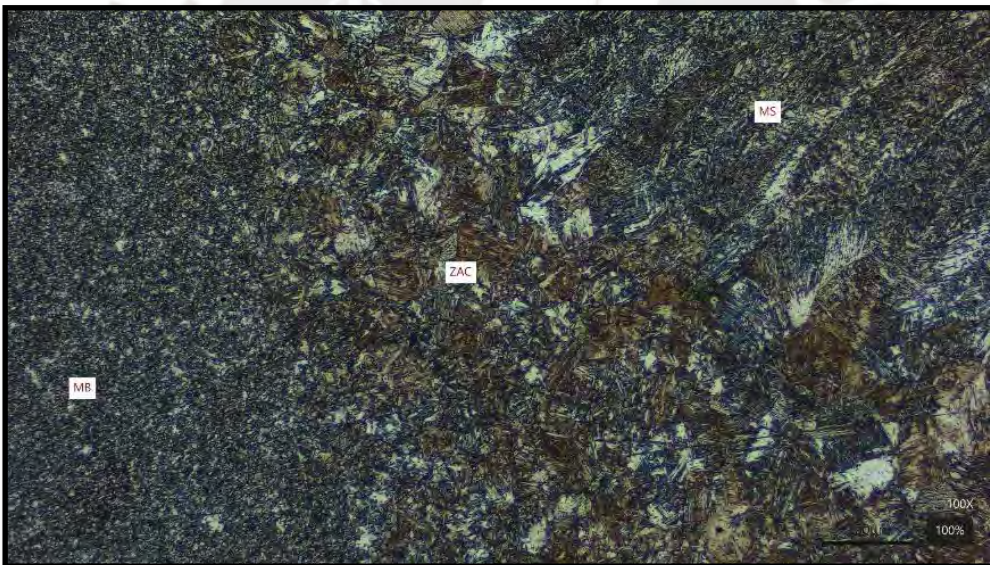


Figura 68. Microestructura a 90°C con aumento 100X  
Nota. Fuente propia.

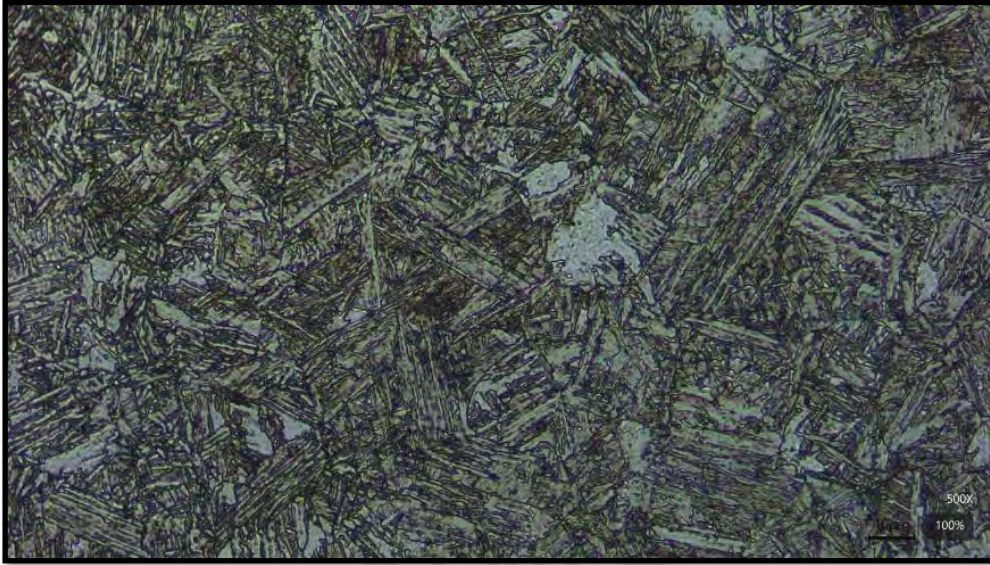


Figura 69. Microestructura a 90°C con aumento 500X  
Nota. Fuente propia.

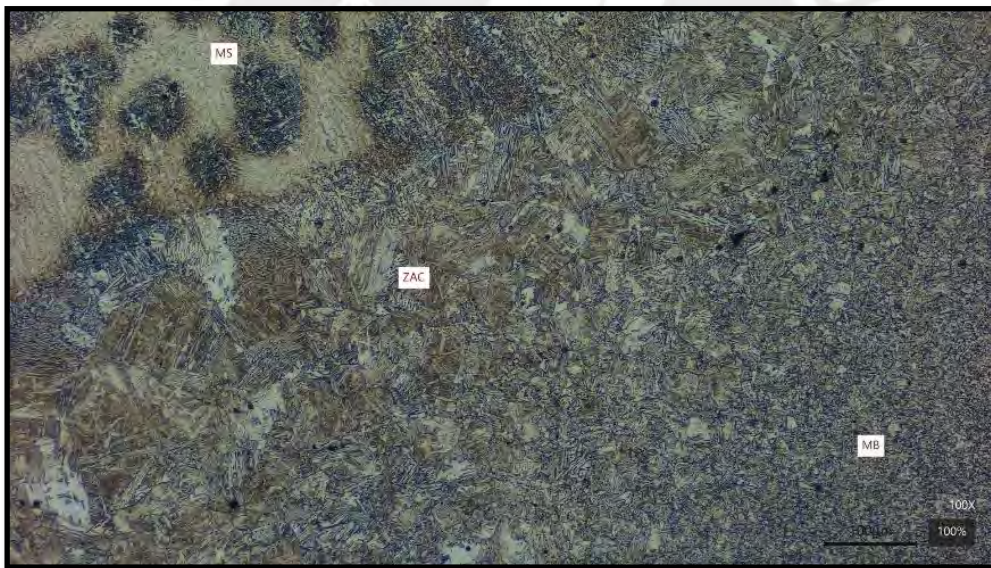


Figura 70. Microestructura a 120°C con aumento 100X  
Nota. Fuente propia.

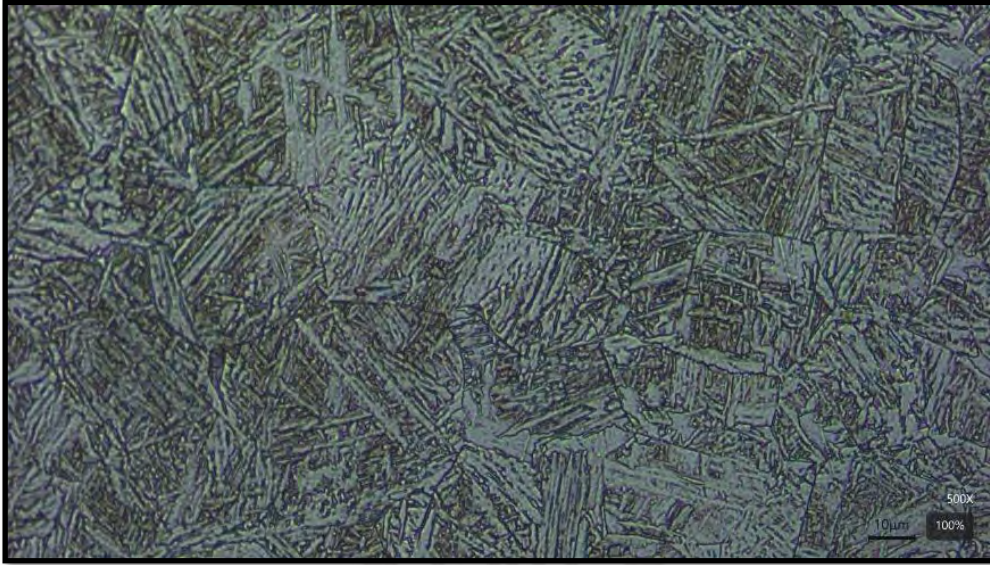
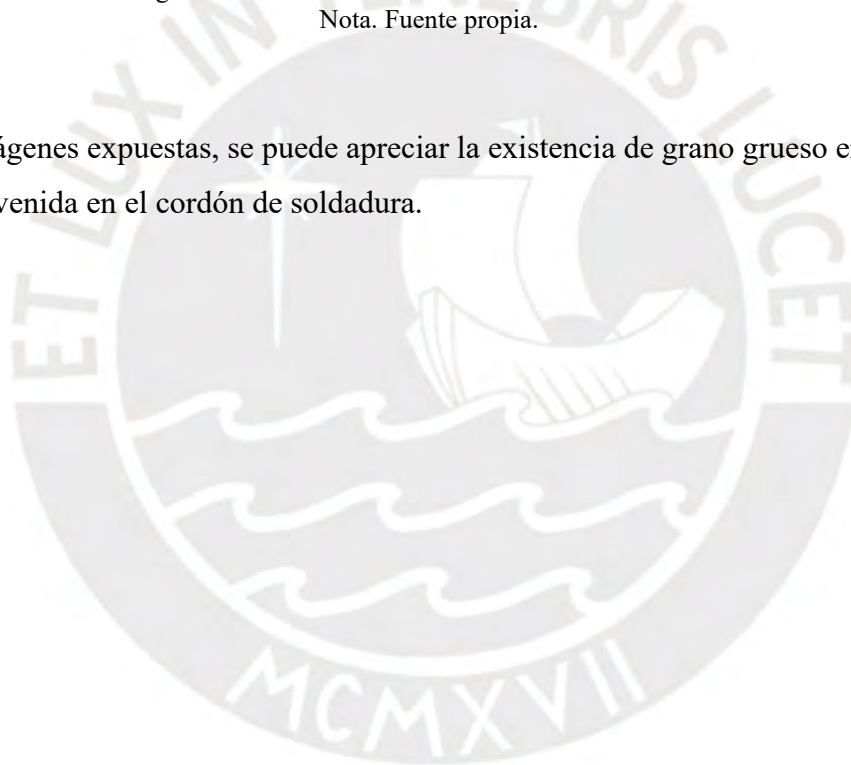


Figura 71. Microestructura a 120°C con aumento 500X  
Nota. Fuente propia.

Según las imágenes expuestas, se puede apreciar la existencia de grano grueso en la ZAC y de martensita revenida en el cordón de soldadura.



### 3.2.3. Tracción

Se realizaron los ensayos de tracción utilizando los lineamientos indicados en el API 1104 y se logró obtener los siguientes resultados:

Tabla 12. Resultados del ensayo de tracción del WPS

Temperatura	Muestra	Sección Transversal		Área (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kN)	Esfuerzo máximo a la tracción (Mpa)	Zona de Rotura
		Ancho (mm)	Espesor (mm)				
Ambiente	T1	24.42	10.9	266.178	183.5	689.39	MB
	T2	24.92	11.23	279.8516	184.4	658.92	MB
	T3	24.8	11.61	287.928	186	645.99	MB
	T4	24.85	11.78	292.733	181.5	620.02	MB
60°C	T1	25.18	11.37	286.2966	184.4	644.09	MB
	T2	25.45	12.14	308.963	186.5	603.63	MB
	T3	25.05	11.64	291.582	179.3	614.92	Se rompe en MA, se analiza por NB.
	T4	25.46	11.37	289.4802	183.9	635.28	MB
90°C	T1	26.12	11	287.32	189.8	660.59	MB
	T2	25.52	10.75	274.34	183	667.06	MB
	T3	25.78	10.93	281.7754	173.7	616.45	MB
	T4	25.65	10.68	273.942	188.5	688.10	MB
120°C	T1	25.61	10.96	280.6856	193.6	689.74	MA
	T2	25.62	11.01	282.0762	191.5	678.89	MA
	T3	25.76	10.64	274.0864	188.8	688.83	MA
	T4	25.66	10.43	267.6338	198.7	742.43	MA

Nota. Fuente propia.

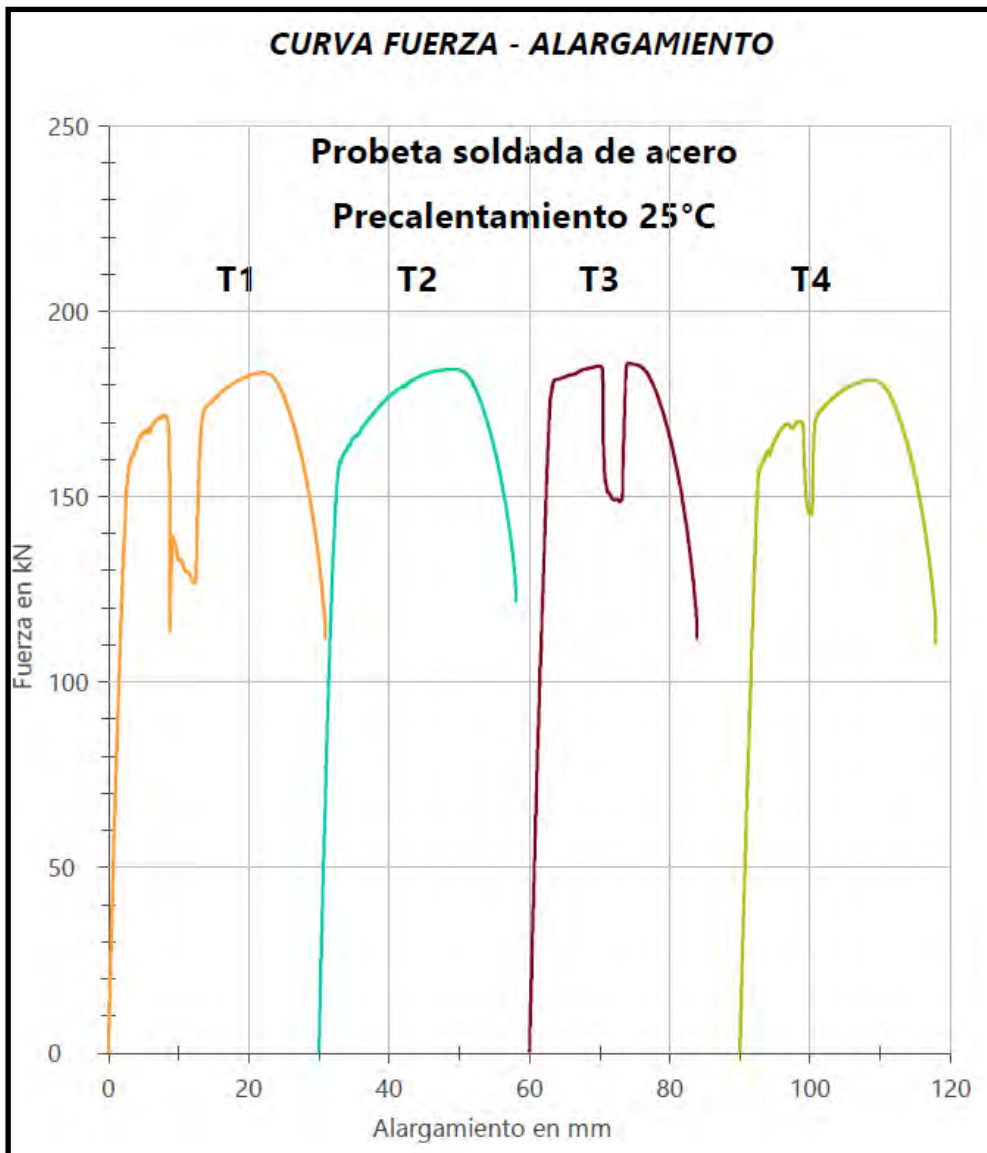


Figura 72. Resultados ensayos de Tracción a Tamb  
Nota. Fuente propia

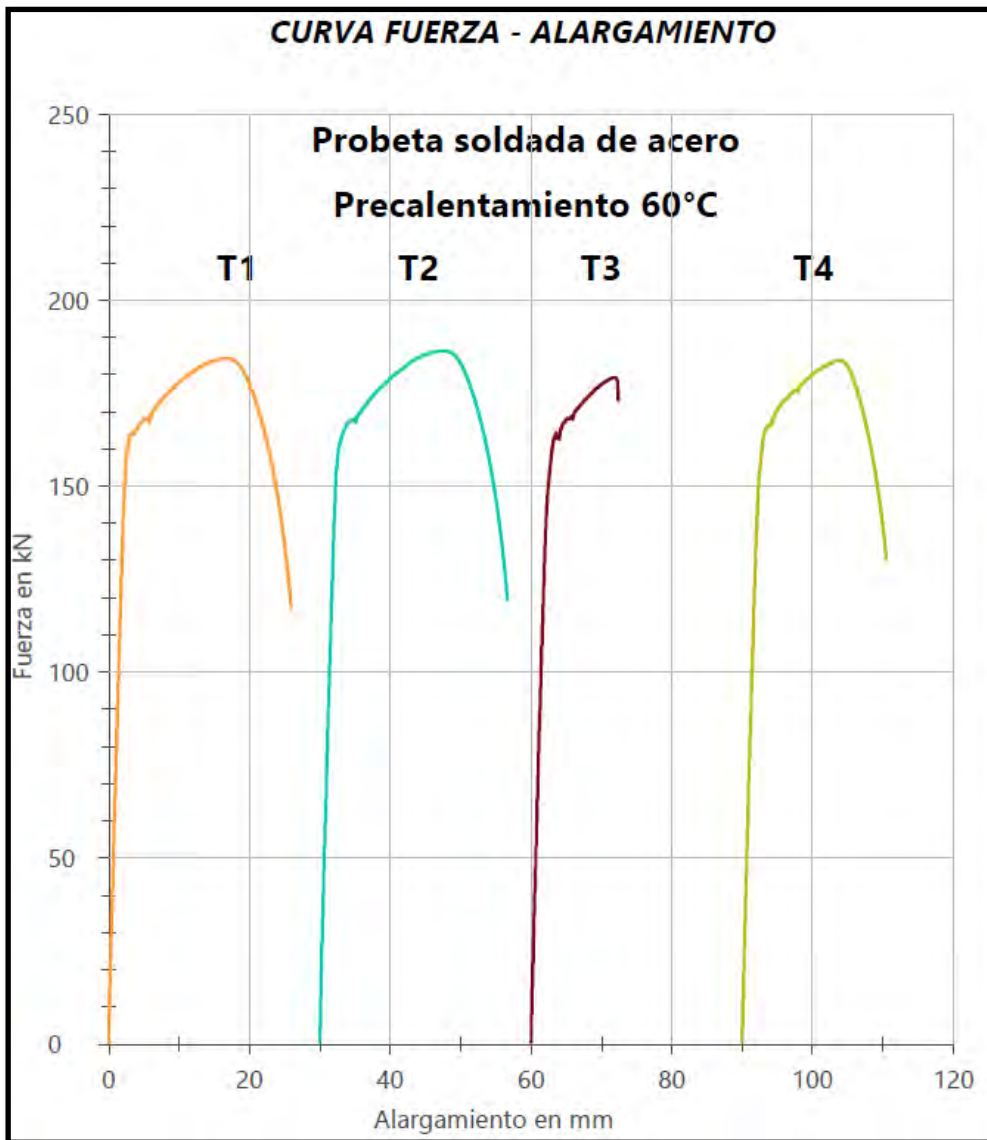


Figura 73. Resultados ensayos de Tracción a 60°C  
Nota. Fuente propia

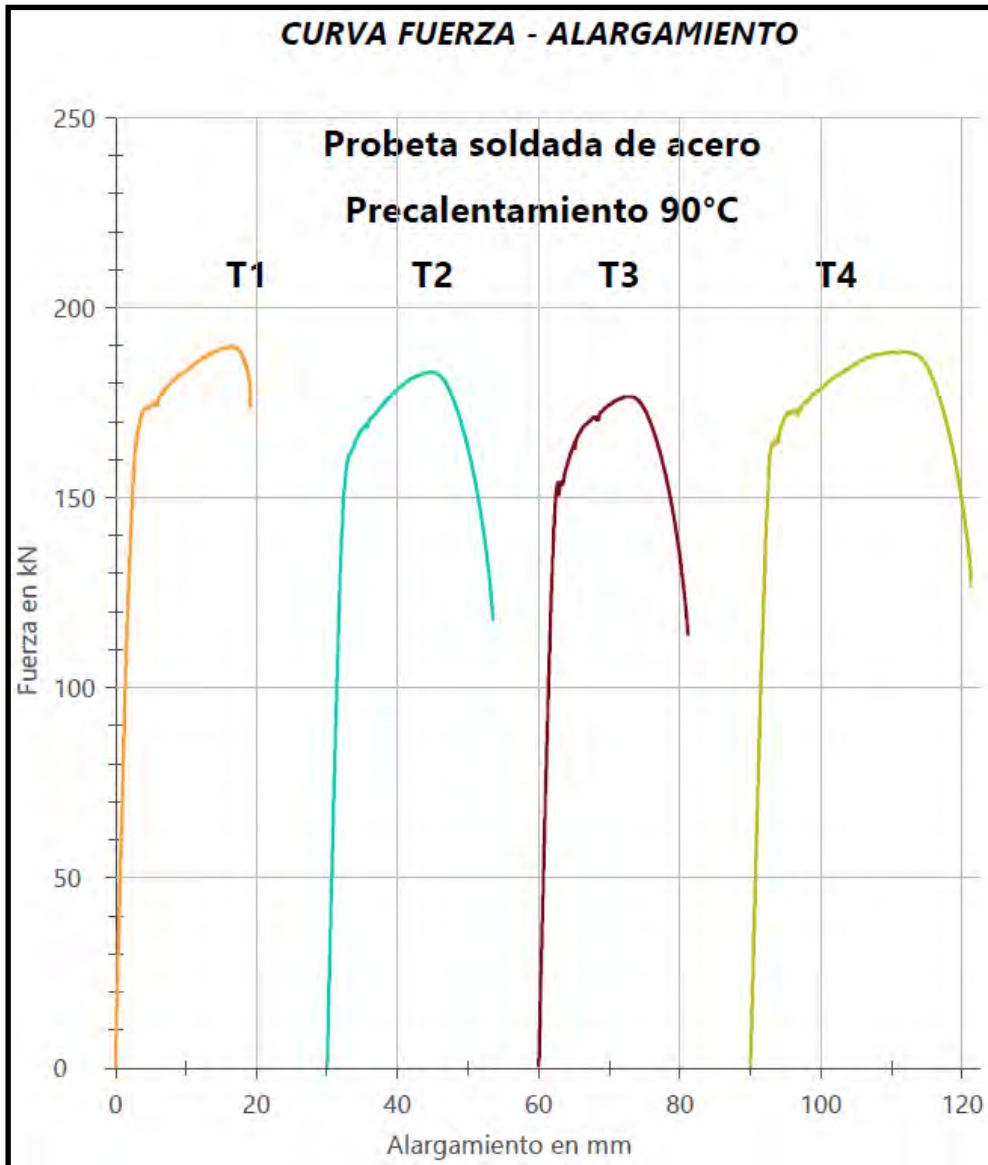


Figura 74. Resultados ensayos de Tracción a 90°C  
Nota. Fuente propia

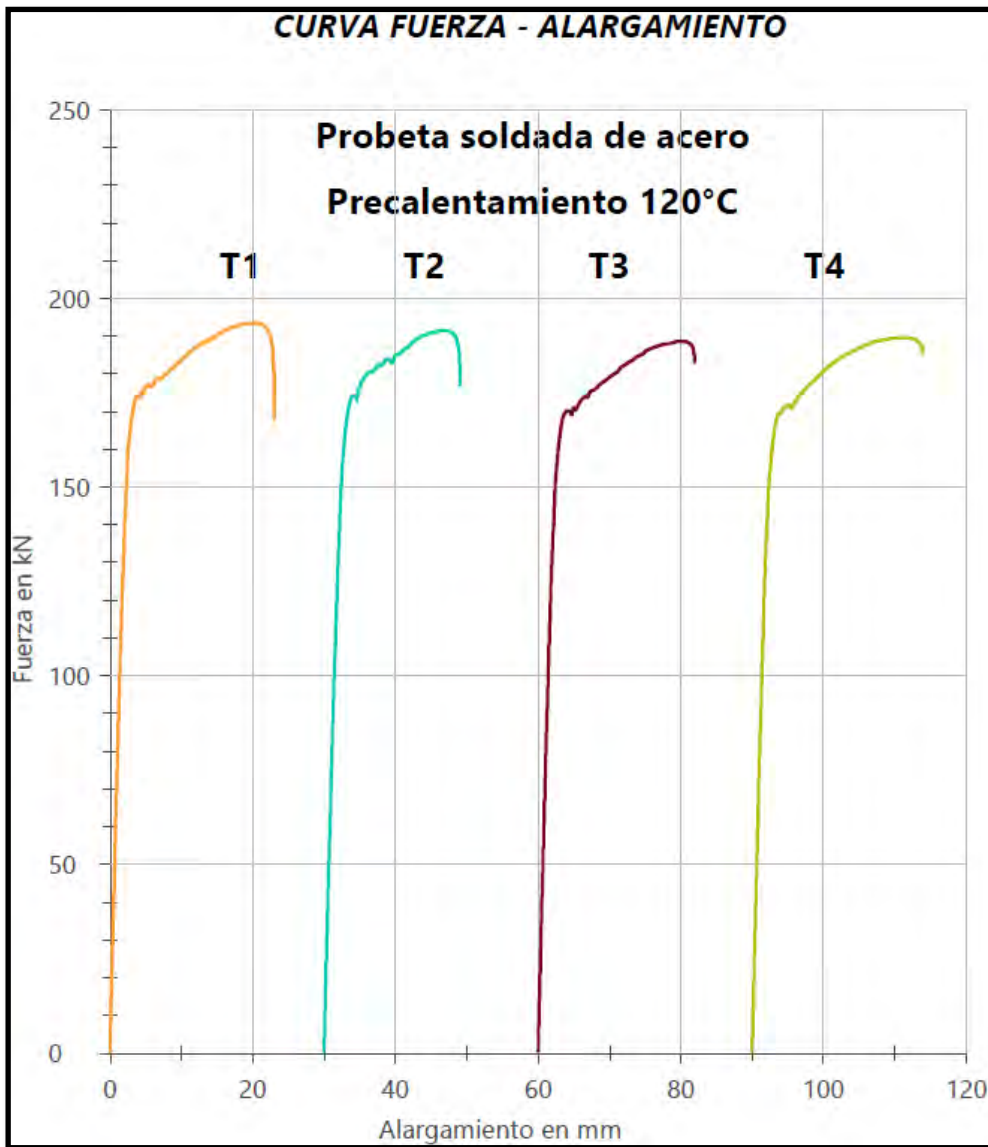






Figura 75. Resultados ensayos de Tracción a 120°C  
Nota. Fuente propia

Tabla 13. Probetas de tracción ensayadas del WPS

Temperatura	Muestra	Esfuerzo máximo a la tracción (Mpa )	Imagen
Ambiente	T1	689.39	
	T2	658.92	
	T3	645.99	
	T4	620.02	
60°C	T1	644.09	
	T2	603.63	
	T3	614.92	
	T4	635.28	
90°C	T1	660.59	
	T2	667.06	
	T3	616.45	
	T4	688.10	
120°C	T1	689.74	
	T2	678.89	
	T3	688.83	
	T4	742.43	

Nota. Fuente propia.

Según lo establecido por la norma API 1104, para que el ensayo a la tracción satisfaga el requerimiento será necesario que el esfuerzo a la tracción del material de aporte sea mayor o igual al del material base. Con base en esto, se tienen los siguientes análisis:

- Se puede apreciar que el comportamiento de la soldadura a una temperatura de 25°C en las probetas T1, T3 y T4, presenta una disminución repentina de la fuerza en la zona plástica. Esto puede deberse en parte al acabado con el que se ensayaron los extremos de las muestras ya que, como se comentó previamente, se tuvo que realizar un esmerilado para preparar las probetas y que las mordazas de la máquina puedan sostener con la suficiente fuerza la muestra sin que haya deslizamiento entre estas. Además, se puede afirmar que el esfuerzo del cordón de soldadura está por encima del mínimo requerido para el material base (ver tabla 2). Para esta temperatura de ensayo se observó que la rotura ocurre en el material base en los 4 casos en aproximadamente 413 Mpa en la zona del material base.
- Para el caso de la temperatura de 60°C, el comportamiento de las curvas Fuerza vs. Alargamiento corresponde según lo indicado por la teoría de los aceros. Asimismo, en las muestras T1, T2 y T4 se observa que la ruptura ocurre en el material base a un esfuerzo de aproximadamente 450 Mpa. Sin embargo, en el caso de la probeta T3 la rotura ocurre en la zona del material de aporte y es por ello que según el API 1104 para este caso se debe analizar la zona de interés bajo los criterios de aceptación del ensayo Nick Break. Luego de la evaluación correspondiente se pudo concluir que la muestra T3 cumple también con los criterios establecidos por la norma.
- Respecto al ensayo a la temperatura de 90°C, se puede comentar que en la probeta T1 se presentó una ruptura más cercana al cordón de soldadura. Sin embargo, el valor de 660.59 Mpa de esfuerzo a la tracción sigue dentro de lo esperado (mayor o igual a 570 Mpa). Asimismo, se pudo apreciar que el comportamiento de la gráfica para la muestra T3 a esta temperatura presentó un esfuerzo a la rotura de aproximadamente 423 Mpa (en la zona del material base), distinto al de las demás probetas ensayadas a 90°C posiblemente debido al acabado superficial de los extremos de la muestra y a las pequeñas discontinuidades que se observaron en el ensayo de inspección visual.
- Para la temperatura de 120 °C, se aprecia que las cuatro probetas presentaron una ruptura cercana a la línea de fusión. Los valores de esfuerzos a la tracción cumplen al estar por encima del mínimo especificado por la norma API 1104. Respecto al comportamiento de las gráficas se puede observar que en las muestras T2, T3 y T4

presentaron una tendencia similar en los valores de esfuerzo a la ruptura cercanos a los 640 Mpa, pero para la muestra T1 la rotura ocurrió a los 600 Mpa aproximadamente.





Por todo lo expuesto, respecto al ensayo de tracción se puede concluir que la soldadura cumple con los requisitos del mínimo valor de esfuerzo a la tracción indicado en la normativa API 1104.



### 3.2.4. Doblado

Se realizaron los ensayos de las tuberías soldadas luego de lo cual se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 14. Probetas de doblado ensayadas del WPS

Temperatura	Imágenes
T amb	
T 60°C	
T 90°C	
T 120°C	

Nota. Fuente propia.

Se logró observar que las probetas DL-2.1 a temperatura ambiente y DL-2.2 a temperatura de 60°C presentaron signos de fisuración como se muestra a continuación:

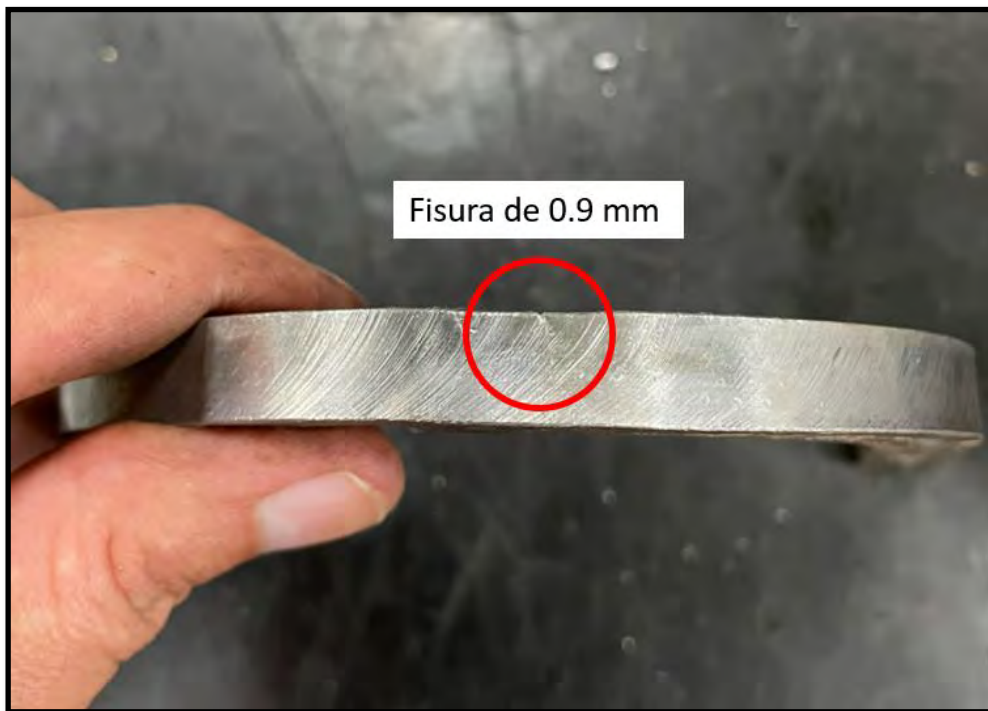


Figura 76. Fisuración probeta DL-2.1 a temperatura ambiente  
Nota. Fuente propia

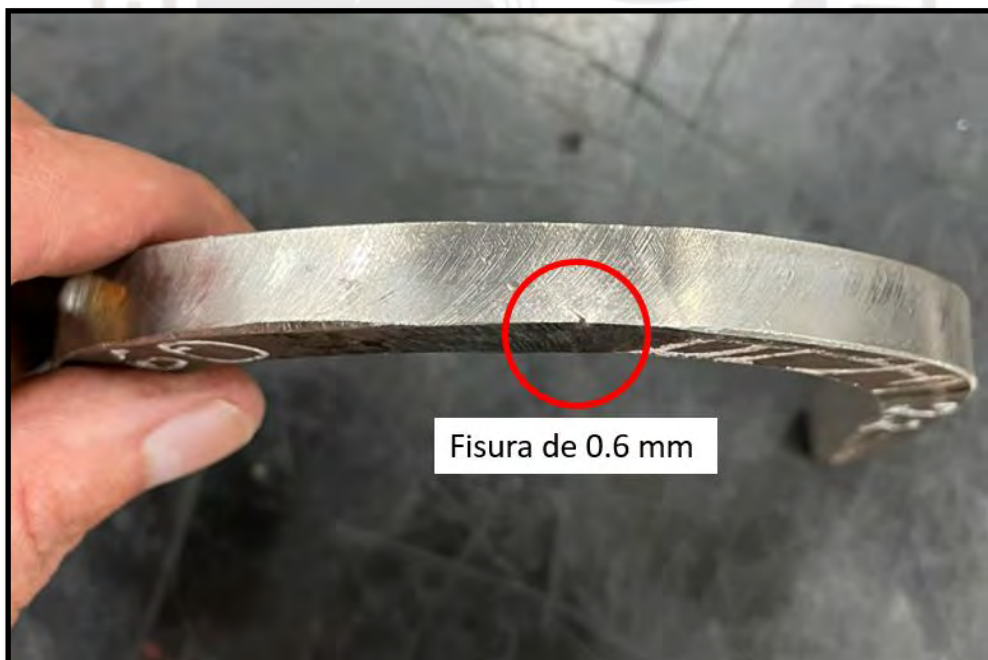
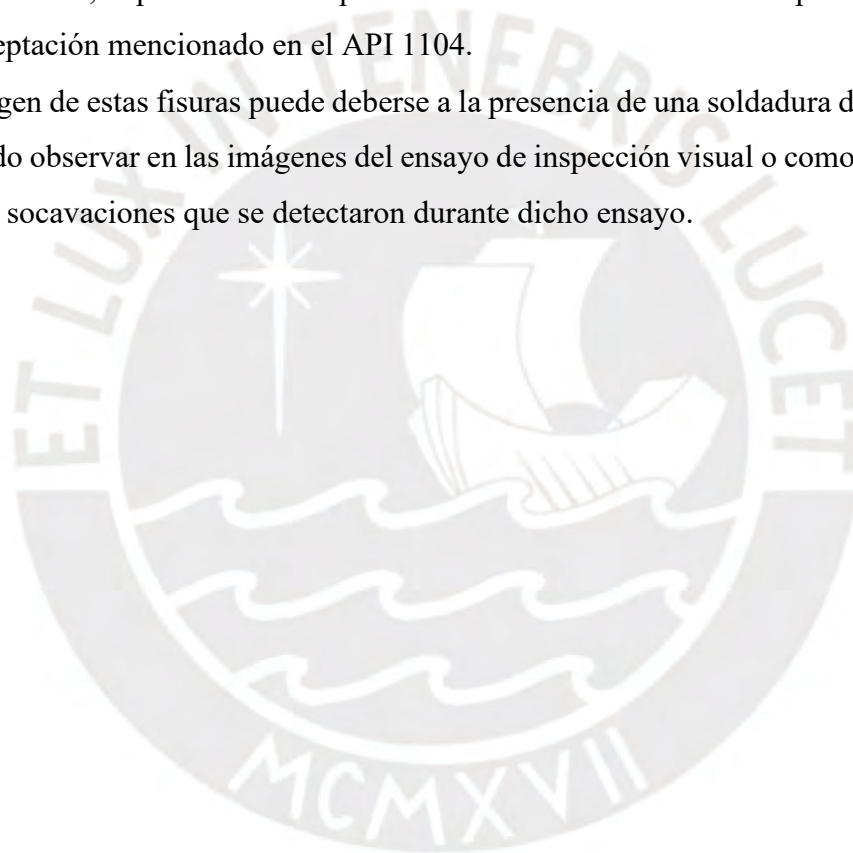


Figura 77. Fisuración de probeta DL-2.2 a temperatura 60°C  
Nota. Fuente propia

Se puede observar que ambas muestras ensayadas presentaron signos de fisuración. Sin embargo, el valor de su longitud sigue cumpliendo con el valor máximo estipulados en la norma API 1104.

Según el API 1104, en caso existan fisuras en los bordes, estas no deberán sobrepasar los 6 mm de longitud en cualquier dirección. En base a esto, se puede comentar lo siguiente:

- Del grupo de muestras ensayadas se presentaron 2 con fisuras: la probeta DL-2.1 a temperatura ambiente y la probeta DL-2.2 a temperatura de 60°C. En la primera se observa una fisura de 0.9 mm mientras que en la segunda la longitud fisurada es de 0.6 mm. Por ello, se puede concluir que ambas muestras observadas cumplen con el criterio de aceptación mencionado en el API 1104.
- El origen de estas fisuras puede deberse a la presencia de una soldadura dispereja como se pudo observar en las imágenes del ensayo de inspección visual o como consecuencia de las socavaciones que se detectaron durante dicho ensayo.



### 3.2.5. Dureza

Al realizar los ensayos de dureza se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 15. Resultados de dureza para el WPS M1 (temperatura ambiente y 60°C)

Dureza Tamb M1			Dureza T=60°C M1				
Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10	Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10
	d1	d2			d1	d2	
1	297.7	292.2	213	1	291.2	295.9	215
2	282	294	224	2	293.1	295.9	214
3	288.5	292.2	220	3	297.7	303.2	205
4	303.2	300.5	204	4	297.7	300.5	207
5	305.1	301.4	202	5	292.2	288.5	220
6	303.2	289.4	211	6	287.6	298.6	216
7	292.2	286.6	221	7	289.4	288.5	222
8	297.7	283.9	219	8	286.6	282	229
9	288.5	276.5	232	9	283.9	284.8	229
10	282.9	277.4	236	10	289.4	283.9	226
11	286.6	277.4	233	11	286.6	281.1	230
12	271	276.5	247	12	282.9	279.3	235
13	282	297.7	221	13	298.6	294.9	211
14	293.1	294.9	215	14	294	294	215
15	293.9	282.9	231	15	290.3	294	217
16	288.5	287.6	224	16	291.2	284.8	224
17	301.4	289.4	213	17	298.6	298.6	208
18	291.2	282.9	225	18	290.3	286.6	223
19	285.7	276.5	235	19	279.3	284.8	233
20	285.7	281.1	231	20	279.3	279.3	238
21	279.3	289.4	229	21	296.8	292.2	214
22	304.1	293.1	208	22	300.5	296.8	208
23	309.7	294.9	203	23	292.2	292.2	217
24	298.6	295.9	210	24	291.2	297.7	214
25	281.1	280.2	235	25	282.9	282	232
26	284.8	281.1	232	26	294	292.2	216
27	292.2	288.5	220	27	288.5	291.2	221

Nota. Fuente propia.

Tabla 16. Resultados de dureza para el WPS M1 (temperatura 90°C y 120°C)

Dureza T=90°C M1				Dureza T=120°C M1			
Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10	Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10
	d1	d2			d1	d2	
1	291.2	294	217	1	276.5	277.4	242
2	289.4	292.2	219	2	288.5	289.4	222
3	294	289.4	218	3	291.2	294	217
4	299.5	295.9	209	4	302.3	295.9	207
5	301.4	302.3	204	5	295.9	294.9	206
6	296.8	297.7	210	6	293.1	298.6	212
7	303.2	300.5	204	7	295.9	292.2	215
8	304.1	306.9	199	8	297.7	299.5	208
9	311.5	305.1	195	9	304.1	302.3	202
10	308.8	296.8	202	10	286.6	286.6	226
11	300.5	297.7	207	11	292.2	292.2	217
12	289.4	288.5	222	12	280.2	283.9	233
13	302.3	300.5	204	13	302.3	294.9	208
14	289.4	292.2	219	14	289.4	291.2	220
15	287.6	286.6	225	15	290.3	293.1	218
16	295.9	294.9	213	16	282	280.2	235
17	295.9	293.1	214	17	284.8	278.3	234
18	291.2	291.2	219	18	281.1	280.2	235
19	306	300.5	202	19	294.9	295.9	213
20	302.3	305.1	201	20	293.1	294.9	215
21	295.9	301.4	208	21	292.2	297.7	213
22	293.1	294	215	22	294.9	300.5	209
23	286.6	288.5	224	23	292.2	292.2	217
24	290.3	286.6	233	24	285.7	288.5	225
25	290.3	284.8	224	25	280.2	278.3	238
26	284.8	282	231	26	277.4	280.2	239
27	282	278.3	236	27	273.7	273.7	247

Nota. Fuente propia.

Tabla 17. Resultados de dureza para el WPS M2 (temperatura ambiente y 60°C)

Dureza Tamb M2				Dureza T=60°C M2			
Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10	Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10
	d1	d2			d1	d2	
1	260.8	261.8	272	1	277.4	281.1	238
2	272.8	271.9	250	2	277.4	282	237
3	280.2	274.7	241	3	283.9	280.2	233
4	276.5	278.3	241	4	281.1	282	234
5	280.2	287.6	230	5	269.1	268.2	257
6	282	287.6	229	6	287.6	284.8	226
7	294.9	298.6	211	7	282	282	233
8	295.9	299.5	209	8	279.3	278.3	239
9	295.9	300.5	209	9	274.4	277.4	241
10	275.6	278.3	242	10	275.6	276.5	243
11	269.1	271	254	11	280.2	282.9	234
12	269.1	268.2	257	12	285.7	284.8	228
13	289.4	293.1	219	13	280.2	274.7	241
14	290.3	294	217	14	287.6	286.6	225
15	283.9	284.8	229	15	287.6	298.6	216
16	298.6	294.9	211	16	282.9	285.7	229
17	302.3	296.8	207	17	287.6	286.6	225
18	296.8	297.7	210	18	282	276.5	238
19	282	279.3	235	19	276.5	272.8	246
20	282	280.2	235	20	274.7	283.9	238
21	275.6	278.3	242	21	279.3	280.2	237
22	294	292.2	216	22	286.6	285.7	226
23	293.1	299.5	211	23	284.8	285.7	228
24	292.2	296.8	214	24	275.6	278.3	242
25	292.2	296.8	214	25	281.1	276.5	239
26	293.1	292.2	217	26	279.3	279.3	238
27	292.2	291.2	218	27	282	280.2	235

Nota. Fuente propia.

Tabla 18. Resultados de dureza para el WPS M2 (temperatura 90°C y 120°C)

Dureza T=90°C M2				Dureza T=120°C M2			
Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10	Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10
	d1	d2			d1	d2	
1	284.8	284.8	229	1	276.5	281.1	239
2	287.6	296.8	217	2	286.6	286.6	226
3	294	289.4	218	3	286.6	281.1	230
4	288.5	295.9	217	4	287.6	287.6	224
5	290.3	292.2	219	5	284.8	282	231
6	274.7	276.5	244	6	288.5	292.2	220
7	281.1	281.1	235	7	296.8	298.6	209
8	284.8	282	231	8	300.5	307.8	200
9	287.6	287.6	224	9	294.9	304.1	207
10	281.1	280.2	235	10	289.4	288.5	222
11	282.9	285.7	229	11	294.9	297.7	211
12	282	286.6	229	12	288.5	289.4	222
13	299.5	296.8	209	13	292.2	290.3	219
14	293.1	302.3	209	14	295.9	295.9	212
15	301.4	301.4	204	15	288.5	286.6	224
16	294	291.2	217	16	301.4	298.6	206
17	290.3	288.5	221	17	302.3	301.4	204
18	292.2	285.7	222	18	296.8	293.1	213
19	279.3	278.3	239	19	286.6	294.9	219
20	274.7	280.2	241	20	304.1	304.1	200
21	277.4	282	237	21	289.4	290.3	221
22	271.9	282.9	241	22	288.5	294	219
23	284.8	289.4	225	23	275.6	280.2	240
24	284.8	289.4	225	24	268.2	267.3	259
25	279.3	279.3	238	25	283.9	285.7	229
26	275.6	276.5	243	26	285.7	285.7	227
27	276.5	277.4	242	27	285.7	283.9	229

Nota. Fuente propia.

Tabla 19. Resultados de dureza para el WPS M3 (temperatura ambiente y 60°C)

Dureza Tamb M3				Dureza T=60°C M3			
Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10	Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10
	d1	d2			d1	d2	
1	247	247.9	303	1	271.9	272.8	250
2	274.7	273.7	247	2	272.8	273.7	248
3	279.3	274.7	242	3	278.3	271.9	245
4	284.8	283.9	229	4	282.9	282.9	232
5	282	282	233	5	280.2	280.2	236
6	284.8	291.2	224	6	271	271	253
7	289.4	295.9	217	7	281.1	287.6	229
8	301.4	296.8	207	8	291.2	290.3	219
9	297.7	299.5	208	9	293.1	292.2	217
10	280.2	279.3	237	10	275.6	284.8	236
11	282	282	233	11	279.3	290.3	229
12	277.4	278.3	240	12	279.3	282	235
13	292.2	290.3	219	13	298.6	295.9	210
14	287.6	292.2	221	14	294	287.6	219
15	285.7	293.1	221	15	288.5	287.6	224
16	295.9	294.9	213	16	286.6	288.5	224
17	290.3	285.7	224	17	292.2	299.5	212
18	290.3	292.2	219	18	290.3	293.1	218
19	252.5	259.9	282	19	278.3	275.6	242
20	260.8	262.7	271	20	272.8	277.4	245
21	275.6	276.5	243	21	281.1	278.3	237
22	285.7	283.9	229	22	287.6	291.2	221
23	284.8	288.5	226	23	288.5	292.2	220
24	283.9	286.6	228	24	282	284.8	231
25	276.5	273.7	245	25	272.8	271.9	250
26	274.7	274.7	246	26	275.6	276.5	243
27	281.1	276.5	239	27	273.7	273.7	247

Nota. Fuente propia.

Tabla 20. Resultados de dureza para el WPS M3 (temperatura 90°C y 120°C)

Dureza T=90°C M3				Dureza T=120°C M3			
Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10	Punto	Dimensiones de la huella (µm)		Dureza HV10
	d1	d2			d1	d2	
1	271.9	271	252	1	271.9	258.1	264
2	273.7	271.9	249	2	265.4	271	258
3	283.9	285.7	229	3	283.9	281.1	232
4	306.9	303.2	199	4	280.2	279.3	237
5	303.2	295.9	207	5	291.2	295.9	215
6	294	294.9	214	6	281.1	283.9	232
7	280.2	281.1	235	7	287.6	284.8	226
8	280.2	282.9	234	8	289.4	283.9	226
9	274.7	271.9	248	9	288.5	287.6	224
10	291.2	290.3	219	10	280.2	284.8	232
11	282	284.8	231	11	284.8	287.6	226
12	269.1	265.4	260	12	293.1	294	215
13	303.2	298.6	205	13	294	294	215
14	298.6	299.5	207	14	291.2	301.4	211
15	297.7	294.9	211	15	291.2	291.2	219
16	291.2	287.6	221	16	294	291.2	217
17	284.8	279.3	233	17	294.9	290.3	217
18	280.2	279.3	237	18	301.4	296.8	207
19	264.5	266.4	263	19	271	272.8	251
20	269.1	268.2	257	20	269.1	267.3	258
21	269.1	271	254	21	280.2	285.7	232
22	277.4	277.4	241	22	273.7	276.5	245
23	289.4	284.8	225	23	281.1	288.6	230
24	294	293.1	215	24	285.7	286.6	226
25	289.4	290.3	221	25	274.7	265.4	254
26	294.9	291.2	216	26	278.3	280.2	238
27	294.9	289.4	217	27	292.2	289.4	219

Nota. Fuente propia.

Según el API 1104, los valores máximos de dureza para el material de aporte serán de 275HV10 y en el caso de la zona afectada por el calor un valor máximo de 350HV10. Partiendo de este criterio se procede a realizar los gráficos obtenidos a partir de los datos mostrados:

### 3.2.5.1. Dureza muestras M1

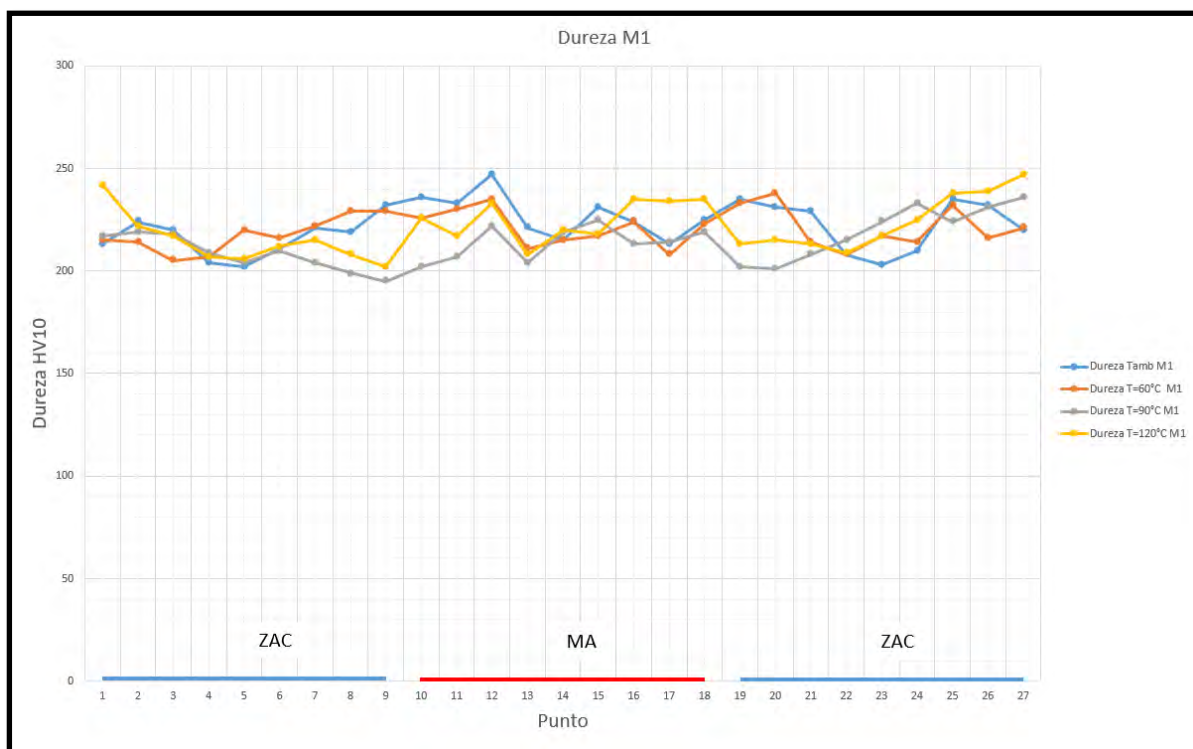
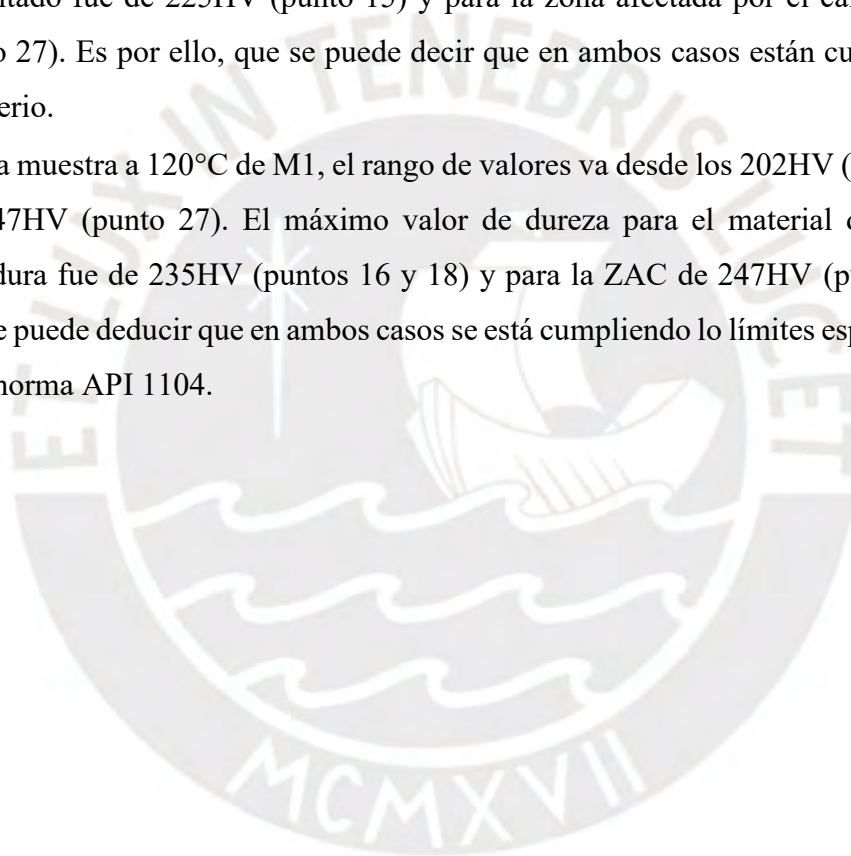


Figura 78. Gráficas de dureza M1 a distintas temperaturas  
Nota. Fuente propia

De los gráficos expuestos anteriormente y comparándolos con los criterios de aceptación mencionados líneas arriba, se puede apreciar que los valores de dureza del material en análisis están dentro del límite permitido por la norma API 1104.

- Para la muestra a temperatura ambiente M1 se puede observar que la dureza tiene un rango de valores aproximados que van desde los 200HV10 (puntos 5,6 y 24 de la zona afectada por el calor) hasta los 250HV10(punto 12). El material de aporte (puntos del 15 hasta el 18) cumple ya que el valor máximo para este es de 225HV10. Asimismo, en el caso de la zona afectada por el calor (puntos 1 al 9 más los puntos del 19 al 27), cumple con el criterio de aceptación ya que la dureza máxima del cordón de soldadura es de 235HV10.

- A la temperatura de 60°C en M1, se pudo apreciar un rango de valor de durezas que van desde los 203HV10(punto 3) hasta los 238HV10(punto 20). Se puede deducir que los valores obtenidos de dureza para el material de aporte están dentro del límite especificado por la norma ya que su valor más alto fue de 235HV10 (punto 12). Además, en el caso de la zona afectada por el calor (puntos del 10 al 18), se tuvo un valor máximo de 235HV10 por lo que se concluye que también está cumpliendo con el criterio de aceptación.
- En la temperatura de ensayo a 90°C para M1, tuvo un rango de valor desde los 195HV10 (punto 9), hasta los 236HV10 (punto 27). El valor máximo para el material depositado fue de 225HV (punto 15) y para la zona afectada por el calor de 236HV (punto 27). Es por ello, que se puede decir que en ambos casos están cumpliendo con el criterio.
- Para la muestra a 120°C de M1, el rango de valores va desde los 202HV (punto 9) hasta los 247HV (punto 27). El máximo valor de dureza para el material del cordón de soldadura fue de 235HV (puntos 16 y 18) y para la ZAC de 247HV (punto 27). Con esto se puede deducir que en ambos casos se está cumpliendo lo límites especificaciones en la norma API 1104.



### 3.2.5.2. Dureza muestras M2

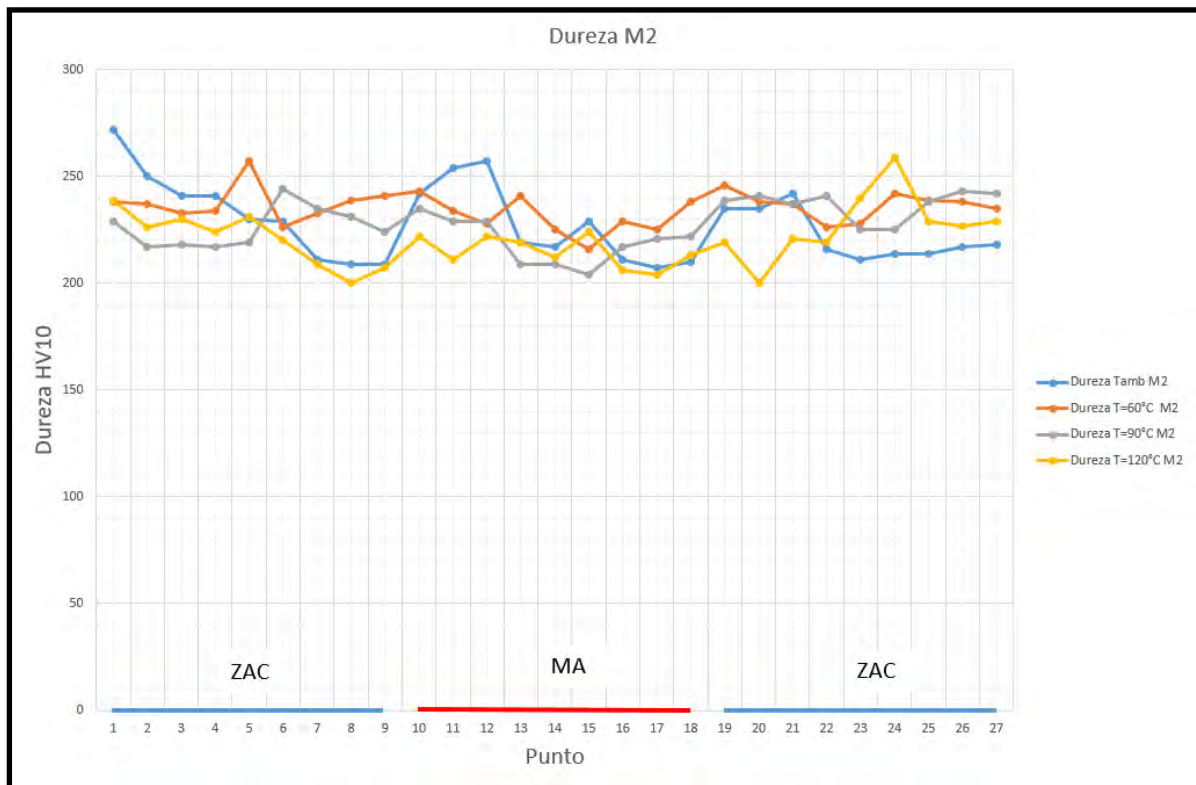


Figura 79. Gráficas de dureza M2 a distintas temperaturas  
Nota. Fuente propia

- A temperatura ambiente la muestra M2 presentó un rango de valores que van desde los 207HV10 (punto 17) hasta los 272HV10 (punto 1). En el caso del material de aporte se obtuvo un valor máximo de 257HV (punto 12) y para la ZAC de 272HV10 (punto 1). Con estos resultados se puede decir que sigue cumpliendo con los criterios de aceptación.
- Para la temperatura de 60°C, la muestra M2 tuvo un rango de valores que están entre los 216HV10 (punto 15) hasta los 257HV (punto 5). El cordón de soldadura presenta una dureza máxima de 243HV10 (punto 10) y la ZAC un valor tope de 257HV10 (punto 5). Se puede concluir que ambas zonas están respetando los máximos permitidos por la normativa.
- En el caso ensayado a 90°C para M2, se tiene un valor mínimo de 204HV (punto 15) y un máximo de 244 HV (punto 6). La soldadura alcanza su máximo valor en 235 HV

(punto 10) y la ZAC a los 244 HV (punto 6). Por ello, se puede decir que está cumpliendo con los lineamientos indicados en la norma.

- A 120°C en la muestra M2, el mínimo valor alcanzado fue de 200 HV (puntos 8 y 20) y el máximo fue de 259 HV (punto 24). El valor máximo en el material de aporte fue de 224 HV (punto 15) mientras que en la ZAC el mayor alcanzado resultó en 259 HV (punto 24). Con esto se puede deducir que en ambos casos se está cumpliendo lo límites especificaciones en la norma API 1104.



### 3.2.5.3. Dureza muestras M3

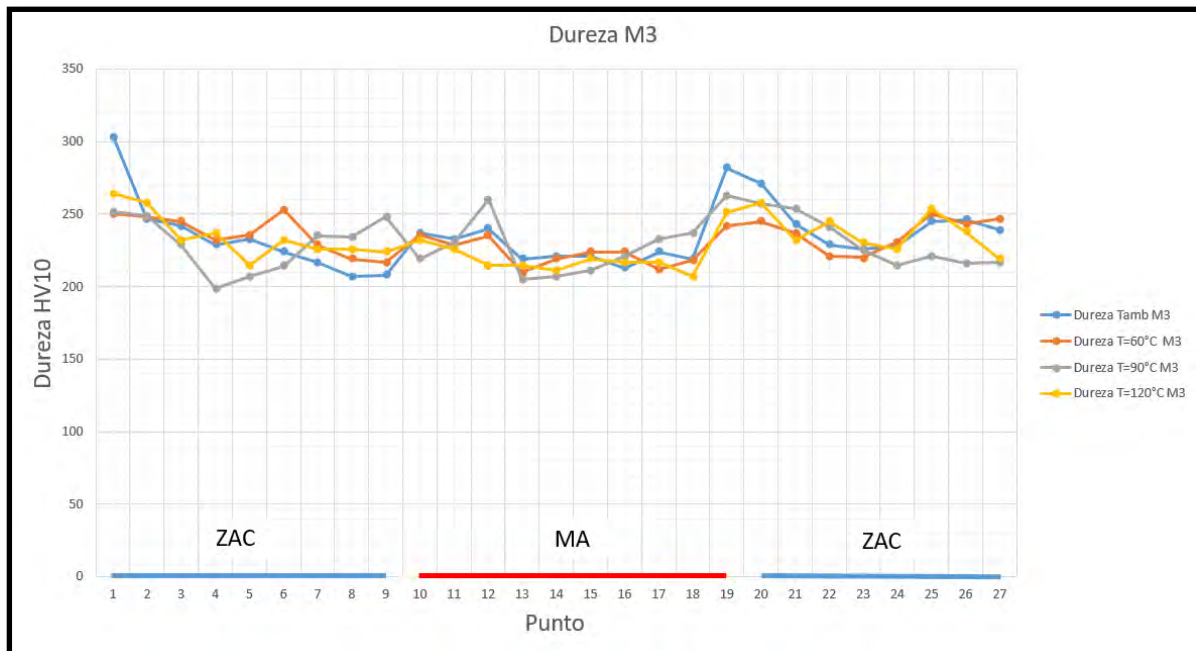


Figura 80. Gráficas de dureza M3 a distintas temperaturas  
Nota. Fuente propia

- A temperatura ambiente la muestra M3 presenta un rango de durezas que van desde los 207 HV (punto 8) hasta los 303 HV (punto 1). En el caso del material de aporte, este alcanza su valor máximo en 240 HV (punto 12) mientras que para la ZAC el mayor obtenido fue de 303 HV (punto 1). Es por ello, que se puede decir que en ambos casos están cumpliendo con el criterio.
- Para el ensayo a los 60°C de M3, el rango de durezas obtenidos fue desde los 210 HV (punto 13) hasta los 253 HV (punto 6). El máximo para el material de aporte registrado es de 236 HV (punto 10) mientras que para la ZAC fue de 253 HV (punto 6). Se puede deducir con estos resultados que cumplen con el criterio de aceptación.
- En el caso de la temperatura a 90°C para M3, el mínimo obtenido fue de 199 HV (punto 4) y el máximo en 263 HV (punto 19). Para el cordón de soldadura el mayor alcanzado fue de 260 HV (punto 12) y para la ZAC un máximo valor de 263 HV (punto 19). Es por ello, que se puede decir que en ambos casos están cumpliendo con el criterio.
- Para la temperatura en 120°C de M3, se registró un mínimo de 207 HV (punto 18) y un máximo de 264 HV (punto 1). El material de aporte obtuvo un tope de dureza de 232 HV (punto 10) mientras que para la ZAC un máximo de 264 HV (punto 1). Con estos

resultados, se evidencia que las muestras ensayadas poseen valores de dureza que respetan los límites de la normativa.

Asimismo, existen expresiones matemáticas para el cálculo de la dureza en función del tiempo de enfriamiento:

Fórmula propuesta por Düren

$$HV = 2019 [C (1 - 0,5 \log t_{8/5}) + 0,3 (CEB-C)] + 66 (1 - 0,8 \log t_{8/5}) \dots (12)$$

Fórmula propuesta por Suzuki

$$HV = H + K / [1 + \exp (a (\log t_{8/5} - Y_5))] \dots (13)$$

Para este estudio en particular se realizaron varios precalentamientos a los tubos. Al incrementar la temperatura de precalentamiento se tendrá posteriormente una menor velocidad de enfriamiento entre la zona pre calentada del material base y la ZAC, esto ocasionará que el tiempo  $t_{8/5}$  sea cada vez mayor. En consecuencia, se debería de tener un menor valor de dureza a medida que el valor de la temperatura de precalentamiento incremente según las expresiones de Düren y Suzuki.

Sin embargo, estos métodos matemáticos no contemplan factores externos y/o de operatividad durante la ejecución de las soldaduras como la velocidad de soldeo, la variación del voltaje y la variación de la corriente. Como se puede apreciar en el estudio “Effect of welding variables on mechanical properties of low carbon steelwelded joint”, se demuestra que al incrementar el valor de la velocidad de soldeo el valor de la dureza irá aumentando.

Finalmente, se concluye que los valores de dureza están respetando los mínimos requeridos por la norma API 1104 y que su comportamiento de aumento al ir subiendo las temperaturas de precalentamiento se debe a factores operativos.

### 3.2.6. Impacto

Se muestran a continuación los resultados de los ensayos de impacto:

Tabla 21. Resultados de impacto para el WPS (temperatura ambiente y 60°C)

Impacto Tamb			Impacto T=60°C		
Muestra	Temperatura de ensayo (°C)	Energía absorbida (J)	Muestra	Temperatura de ensayo (°C)	Energía absorbida (J)
ZAC-1	-20	141.82	ZAC-1	-20	147.95
ZAC-2	-20	91.96	ZAC-2	-20	100.63
ZAC-3	-20	103.89	ZAC-3	-20	69.74
MA-1	-20	37.19	MA-1	-20	52.99
MA-2	-20	34.31	MA-2	-20	27.29
MA-3	-20	130.28	MA-3	-20	37.83

Nota. Fuente propia

Tabla 22. Resultados de impacto para el WPS (temperatura 90°C y 120°C)

Impacto T=90°C			Impacto T=120°C		
Muestra	Temperatura de ensayo (°C)	Energía absorbida (J)	Muestra	Temperatura de ensayo (°C)	Energía absorbida (J)
ZAC-1	-20	108.53	ZAC-1	-20	55.67
ZAC-2	-20	130.14	ZAC-2	-20	88.41
ZAC-3	-20	242.67	ZAC-3	-20	102.12
MA-1	-20	49.76	MA-1	-20	52.76
MA-2	-20	47.35	MA-2	-20	58.77
MA-3	-20	26.18	MA-3	-20	48.04

Nota. Fuente propia

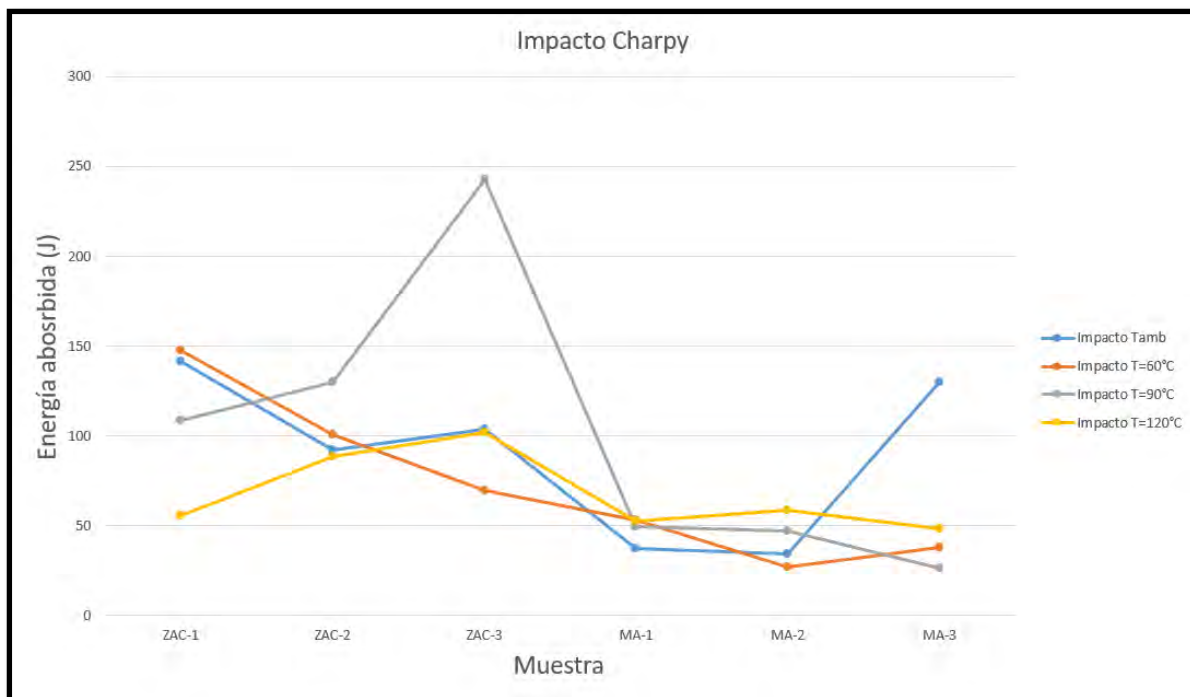


Figura 81. Gráficas de impacto Charpy a distintas temperaturas  
Nota. Fuente propia.

Según el análisis e interpretación de los datos obtenidos, se puede comentar lo siguiente:

- Para la temperatura ambiente, en el caso de las 3 muestras en la zona de la ZAC se obtuvo 91.96 J como el menor de los valores. En el caso de las probetas que pertenecen al material de aporte se observa que el menor de los valores obtenidos fue de 34.31 J. Es por ello que se puede concluir que las muestras para esta temperatura cumplen con los criterios estipulados por la normativa.
- En el caso de ensayos a temperatura de 60°C, para la ZAC se observa una absorción mínima de 69.74 J mientras que para el material de aporte presente un valor mínimo de 53 J. Con estos resultados se puede decir que para esta temperatura de ensayo se están respetando los criterios de aceptación.
- A la temperatura de 90°C, la ZAC presenta una energía mínima absorbida de 108.53 J y un valor de 26.18 J en el material de aporte. En el primer caso está cumpliendo los requisitos del criterio de aceptación mientras que en el segundo escenario está por debajo de los 30 J exigidos. Esta pequeña diferencia puede justificarse debido a que la temperatura que se escogió para este ensayo (-20°C) es más exigente que la indicada en la norma. Asimismo, esta pequeña desviación del valor mínimo requerido puede

deberse a una desviación en la toma de puntos durante las marcas a las muestras previas al ensayo de impacto.

- Para las probetas ensayadas a temperatura de 120°C, se aprecian unas energías mínimas absorbidas debido al impacto de 55.67 J en la zona de la ZAC y de 48.04 J para el material de aporte. Con estos resultados expuestos, se puede concluir que a esta temperatura ensayada las muestras cumplen con los criterios de aceptación indicados líneas arriba.

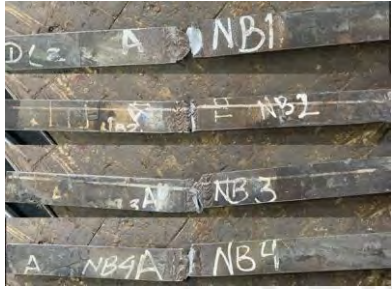
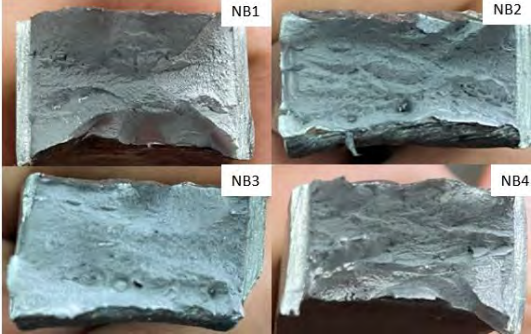

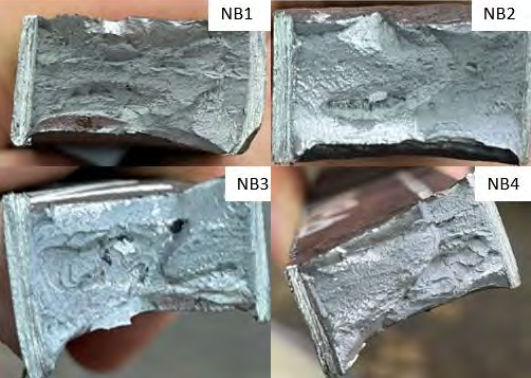

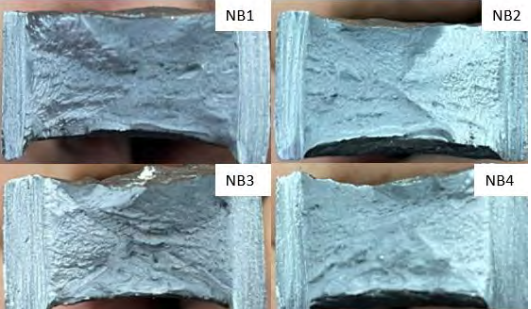

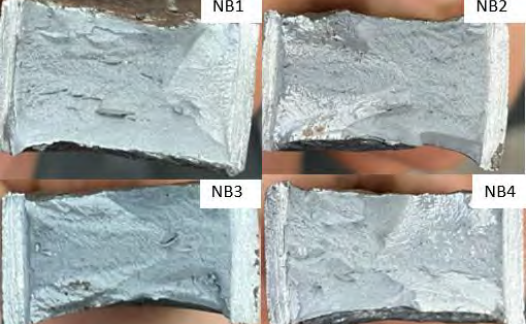
Finalmente, se puede concluir que las muestras soldadas del presente estudio poseen valores por encima del mínimo requerido por la norma API 1104.



### 3.2.7. Nick Break

Se muestran los registros de las probetas ensayadas:

Tabla 23. Resultados del ensayo a la rotura del WPS

Temperatura	Probetas ensayadas	Imágenes de la rotura
T amb		
T 60°C		
T 90°C		
T 120°C		

Nota. Fuente propia.

De los resultados expuestos anteriormente, se puede comentar lo siguiente:

- Para la temperatura ambiente las probetas presentaron completa penetración. Asimismo, las inclusiones no superan los 3 mm como se puede apreciar en las imágenes del ensayo y para este conjunto de muestras no se presentaron ojos de pescado.
- A temperatura de 60°C, se pudo apreciar que la probeta NB3 presentó ojo de pescado sin embargo no es motivo para descartar la muestra según lo indicado en el criterio de la normativa. Además, se evidencia completa penetración y fusión en los 4 casos (NB1, NB2, NB3 y NB4).
- En el caso de la temperatura a 90°C, se observa que la zona donde ocurre la rotura presenta una superficie más pareja en comparación a las temperaturas anteriores. Esto tiene relación con el nivel de dureza que fue alcanzando las probetas mientras se incrementaba la temperatura de precalentamiento que generó la presencia de martensita revenida en la microestructura (más frágil).
- A 120°C de temperatura de ensayo, las muestras presentaron la superficie de rotura más pareja de todos los casos. No se evidencia presencia de ojos de pescado, de inclusiones considerables ni de bolsillos.

Finalmente, gracias al análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que el cordón de soldadura está cumpliendo correctamente los requisitos expuestos por la norma API 1104.

## CONCLUSIONES

1. De acuerdo a los ensayos de caracterización, se puede afirmar que el acero es compatible con el API 5L PSL2 X70M, pues cumple con todos los requisitos de propiedades mecánicas y químicas exigidos por la especificación API 5L.
2. Para el estudio que presenta un ultra bajo carbono se puede concluir que no es necesario el precalentamiento puesto que no existen variaciones significativas en las propiedades mecánicas luego del soldado.
3. Se puede concluir que, según lo mostrado en las Figuras 78, 79 y 80, la dureza en términos generales irá disminuyendo a medida que la temperatura de precalentamiento se incremente. Asimismo, la resistencia al impacto, medida con el ensayo Charpy con entalla en V, muestra una ligera disminución a medida que la temperatura de precalentamiento sea cada vez mayor.
4. En los ensayos metalográficos se encontró cien por ciento de martensita en la ZAC, la misma que presentaba una baja dureza debido al bajo contenido de carbono del material de la tubería. Lo cual nos permite concluir que en una aplicación real de soldadura en líneas de tubería los valores de dureza, para este tipo de acero de ultra bajo carbono, no se verán afectados significativamente debido a la mayor velocidad de extracción de calor en tuberías de gran diámetro.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda ejecutar los cordones de soldadura a temperatura ambiente del sitio para así reducir tiempos y costos del proyecto. Adicionalmente, comentar que el alcance del presente estudio está limitado a un rango de temperaturas que van desde la temperatura ambiente de 25°C aproximadamente hasta los 120 °C para un porcentaje de carbono en particular. Es por ello que, en caso se quisiera soldar en lugares con una temperatura ambiente, pero para un material con mayor contenido de carbono, se deberá validar antes con un nuevo estudio como el demostrado en este documento.
2. Por otro lado, se sugiere controlar con bastante cuidado la velocidad entre pasadas al soldar ya que, como se ha podido demostrar, afecta notablemente los valores de dureza tanto de las juntas soldadas como de la ZAC. Esto es principalmente debido a que al soldar tuberías de gran diámetro se suelen necesitar el empleo de dos soldadores calificados que por factores humanos no tendrán la misma velocidad en las pasadas durante la unión de los cordones. Es por ello, que se sugiere tener bastante cuidado con la selección del personal para la ejecución de estos trabajos.
3. Las conclusiones de este estudio son aplicables únicamente a tuberías API PSL2 X70M que tienen una composición química donde el porcentaje de carbono es menor o igual a 0.12 % que se obtuvo en la caracterización del material de estudio. Para porcentajes de carbono mayores a 0.12% se recomienda rehacer el estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

### ABTERSTEEL

- 2023 Tubería API 5L. Consulta: 17 de setiembre de 2023.  
<https://www.abtersteel.com/es/news/products-news/api-5l-pipeline-psl1-vs-psl2-pipe-differences-summary/>

### AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

- 2020 Norma API 1104 vigésimo segunda edición.  
 2018 Especificación API 5L, edición 46.

### AMERICAN WELDING SOCIETY

- 2011 Manual novena edición volumen 2, Materiales y aplicaciones parte 1.  
 2011 Manual novena edición volumen 9, Materiales y aplicaciones parte 1.  
 2020 Standard Welding Terms and definitions  
 2015 AWS B1.11M/B1.11-Guide for de Visual Examination of Welds

### AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIAL

- 2018 ASTM A370-Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products  
 2018 ASTM E45-Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel  
 2017 ASTM E92-Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials

### AMERICAN SOCIETY FOR METALS

- 1970 Atlas of Microstructures of Industrial alloys

### AURORA

- 2024 Nick Break Fracture Test. Consulta: 05 de febrero de 2024.

<https://www.auroraservices.in/service/details/nick-break-fracture-test#:~:text=The%20Nick%20Break%20Test%20or,inter%2Drun%20fusion%20and%20porosity.>

## CORROSIONPEDIA

2023 Hot Cracking. Consulta: 06 de noviembre de 2023.

<https://www.corrosionpedia.com/definition/634/hot-cracking>

2023 Cold Cracking. Consulta: 06 de noviembre de 2023.

<https://www.corrosionpedia.com/definition/291/cold-cracking>

## CWBGROUP

2023 WHAT CAUSES WELD HOT AND COLD CRACKING AND HOW TO AVOID IT? Consulta: 06 de noviembre de 2023.

<https://www.cwbgroup.org/association/how-it-works/what-causes-weld-hot-and-cold-cracking-and-how-avoid-it>

## FOSCA PASTOR, Carlos Abraham

2007 Introducción a la Metalurgia de la Soldadura. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

## GAS ALBERTA INC.

2023 Transporte industrial. Consulta: 18 de julio de 2023.

<https://www.gasalberta.com/our-business/industrial-transportation>

## IKASTAROAK

2023 Colada, enfriamiento y solidificación. Consulta: 12 de agosto de 2023.

[https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DMMF/DMMF01/es\\_DFM\\_DMMF01\\_Contenidos/website\\_122\\_colada\\_enfriamiento\\_y\\_solidificacin.html#](https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DMMF/DMMF01/es_DFM_DMMF01_Contenidos/website_122_colada_enfriamiento_y_solidificacin.html#)

## INSPECCIONES Y CONTROLES TÉCNICOS

2016 Servicios. Consulta: 18 de julio de 2023.

<https://icotsac.com/servicios/>

## IPUNTO

2023            Ensayo de inspección visual. Consulta: 12 de agosto de 2023.  
<https://ipend.es/ensayos-no-destructivos/inspeccion-visual-vt>.

## JUNXIANG ZHOU

s/a            Revisión de literatura sobre carbono equivalente y sobre carbono eutéctico en Hierro fundido gris.

## KLOECKNERMETALS

2023            Planchas de aceros HSLA. Consulta: 25 de julio de 2023.  
<https://www.kloecknermetals.com/products/steel-plate/hsla-steel-plate/>

## KNOWWELDING

2023            GAS TUNGSTEN ARC WELDING. Consulta: 7 de noviembre de 2023.  
<http://knowwelding.weebly.com/gtaw.html>

## MMTUBERÍAS

2022            Tuberías de acero al carbono y transporte de gas. Consulta: 30 de julio de 2023.  
<https://en.mmtuberia.com/blog/las-tuberias-de-acero-al-carbono-y-la-transportacion-de-gas>

## METAL INSPEC LABS

2020            ¿Qué es un ensayo de dureza? Consulta: 12 de agosto de 2023.  
<https://www.metalinspeclabs.com/post/what-is-hardness-testing>

## ONE STOP NDT

2023            Electrodo para soldar y requisitos para precalentamiento. Consulta: 12 de agosto de 2023.

[https://www.onestopndt.com/ndt-articles/welding-electrodes-and-preheat-requirements#:~:text=For%20thicknesses%20over%203%2F4,%C2%B0C\)%20is%20not%20permitted.](https://www.onestopndt.com/ndt-articles/welding-electrodes-and-preheat-requirements#:~:text=For%20thicknesses%20over%203%2F4,%C2%B0C)%20is%20not%20permitted.)

#### SCIENCEDIRECT

2023 Hydrogen-assisted cracking of GMA welded 960 MPa grade high-strength steels. Consulta: 6 de noviembre de 2023.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920318577>

#### SCIELO

2015 Agrietamiento en caliente de la unión soldada de un acero inoxidable ferrítico AISI 430. Consulta: 12 de agosto de 2023.

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-73812015000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-73812015000200005)

#### SCRIB

2019 Métodos de fundición o colada. Consulta: 12 de agosto de 2023.

<https://es.scribd.com/document/435637172/Coladas#>

#### SOLDEXA SA

s/a Manual de Soldadura & Catálogo de productos. Séptima Edición, Lima, Perú, p. 208.

s/a Manual de Soldadura & Catálogo de productos. Séptima Edición, Lima, Perú, p. 20.

#### SUBSTANCES AND TECHNOLOGIES

2012 Soldadura por arco revestido. Consulta: 18 de julio de 2023.

[https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shilded\\_metal\\_arc\\_welding\\_smaw](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shilded_metal_arc_welding_smaw)

- 2012 Soldadura por arco con gas inerte de tungsteno. Consulta: 18 de julio de 2023.  
[https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tungsten\\_inert\\_gas\\_arc\\_welding\\_tig\\_gtaw](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tungsten_inert_gas_arc_welding_tig_gtaw)

#### SCI CONTROL E INSPECCIÓN

- 2023 Ensayos por radiografía industrial. Consulta: 18 de julio de 2023.  
<https://scisa.es/ensayos-no-destructivos-y-laboratorio-metalurgico/ensayo-no-destructivos/ensayos-por-radiografia-industrial/>

#### SCIENCEDIRECT

- 2022 Ensayo de tracción. Consulta: 18 de julio de 2023.  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/tensile-testing>
- 2023 Hydrogen-assisted cracking of GMA welded 960 MPa grade high-strength steels. Consulta: 07 de noviembre de 2023.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920318577>

#### THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

- 1980 Soldabilidad.

#### STRUERS

- 2024 Metalografía y materialografía explicadas. Consulta: 05 de febrero de 2024.  
<https://www.struers.com/en/Knowledge/Articles/What-is-metallography>

#### RESEARCHGATE

- 2014 Effect of welding variables on mechanical properties of low carbon steel welded joint.

#### TWI GLOBAL

- 2023 ¿Qué es soldadura? Consulta: 05 de febrero de 2024.

<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-welding>

¿Qué es la metalografía? Consulta: 05 de febrero de 2024.

2024 <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-metallography>

#### THE PIPING MART

2023 Advantages and Disadvantages of HSLA Steel. Consulta: 05 de febrero de 2024.

<https://blog.thepipingmart.com/metals/advantages-and-disadvantages-of-hsla-steel/#:~:text=Excellent%20Strength%20and%20Toughness,%2C%20bridges%2C%20and%20transportation%20infrastructure.>

#### UNIVERSAL TECHNICAL INSTITUTE

2019 ¿Qué es la soldadura GMAW y cómo funciona? Consulta: 18 de julio de 2023.

[https://www.uti.edu/blog/welding/gmaw-mig-welding/#:~:text=Gas%20metal%20arc%20welding%20\(GMAW,to%20form%20a%20permanent%20bond](https://www.uti.edu/blog/welding/gmaw-mig-welding/#:~:text=Gas%20metal%20arc%20welding%20(GMAW,to%20form%20a%20permanent%20bond)

#### WELDERDESTINY

2016 Soldadura sin agrietamiento en frío. Consulta: 18 de julio de 2023.

<https://www.welderdestiny.com/cold-cracking.html>

#### WESLEY WANG

2015 Las grandes mentes del carbono equivalente.

#### WELDING ANSWERS

2023 5 Methods to Determine Preheat Temperature. Consulta: 6 de noviembre de 2023.

<https://weldinganswers.com/5-methods-to-determine-preheat-temperature/>

## WELDING INFO

- 2023 Una revisión a la soldadura GTAW. Consulta: 18 de julio de 2023.  
<https://www.weldinginfo.org/welding-processes/gtaw-welding-tig-overview/>

## WIREGRASS

- 2023 Welding & Joining Technology: Gas Metal Arc Welding. Consulta: 6 de noviembre de 2023.  
<https://wiregrass.libguides.com/c.php?g=1050218&p=7623369#:~:text=The%20basic%20equipment%20for%20a,and%20a%20shielding%20gas%20cylinder>

## WEST MORE LAND

- s/a Ensayo de impacto. Consulta: 18 de julio de 2023.  
<https://www.wmtr.com/en.impact-testing.html>

