

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE LA SOLDADURA DEL
ACERO EN 10025-6 S690QL EMPLEANDO LOS PROCESOS DE
SOLDADURA FCAW Y FCAW-HYPERFILL**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

OSCAR JESUS CARRERA ESCAJADILLO

ASESOR:

Mg. Ing. RAÚL CARLOS HURTADO

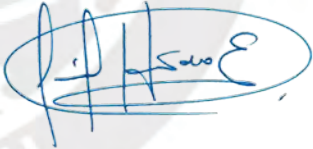
Lima, 2025

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: **ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO EN 10025-6 S690QL SOLDADO CON LOS PROCESOS DE SOLDADURA FCAW Y FCAW-HYPERFILL**, del autor **OSCAR JESUS CARRERA ESCAJADILLO**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **12%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **03/12/2025**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, 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 03 de diciembre de 2025.

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

Resumen

La presente tesis busca definir una metodología que permita poder comparar dos procesos de soldadura FCAW-G y FCAW-G Hyperfill cuando son aplicados a un acero estructural de alta resistencia EN 10025-6 S690QL para uniones a tope en posición vertical ascendente sin backing. Como objetivo principal, se busca calificar ambos procesos de soldadura bajo la norma AWS B2.1:2014.

La metodología aplicada se divide en 3 capítulos principales: 1) Estado del Arte 2) Procedimiento experimental y 3) Resultados experimentales y su análisis correspondiente. Durante el primer capítulo se define el estado del arte de los aceros estructurales de alta resistencia, conceptos de soldadura y fórmulas a aplicar para el estudio del material, códigos de soldadura aplicables para el estudio del caso, ensayos destructivos y no destructivos que se requieran tanto para la caracterización del material base así como para la calificación de ambos procesos de soldadura. Durante el segundo capítulo, se establece la metodología para poder ejecutar la caracterización del material base así como para la calificación del procedimiento de soldadura: se identifican equipos, instrumentos, códigos y normas a utilizar y criterios de aceptación para cada uno de los ensayos. En el tercer capítulo se plasman los resultados del presente estudio obtenidos mediante ensayos y cálculos elaborados con la información experimental.

Como conclusión del estudio, se pudo calificar el proceso FCAW-G, mas no el proceso FCAW-G Hyperfill para el acero seleccionado puesto que no se alcanzan los criterios de aceptación especificados en la norma AWS B2. No obstante, se pudo comprobar que el proceso FCAW-G Hyperfill puede conseguir una mejoría de tiempos para la ejecución de ciertos pases de soldadura a diferencia del proceso FCAW-G. Por último, se cierra el estudio de tesis con las

recomendaciones correspondientes en caso se busque replicar los resultados obtenidos o poder extrapolar la metodología aplicada para la evaluación técnico económica de otros aceros.

Índice

Resumen.....	i
Índice	ii
Índice de Tablas	vii
Índice de figuras.....	ix
Introducción	1
Objetivo general.....	2
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE.....	3
1.1. Material base EN 10025-6 S690QL.....	3
1.1.1. Clasificación de Aceros según EN 10027-1	3
1.1.2. Aceros estructurales Templados y Revenidos	4
1.1.3. Material base – EN 10025-6 S690QL.....	5
1.2. Soldabilidad de un material base	6
1.2.1. Zona Afectada Térmicamente por el Calor (ZAC).....	8
1.2.2. Temperatura de precalentamiento e interpase.....	9
1.2.3. Aporte térmico o Heat Input.	10
1.2.4. Fisuración en frío	11
1.2.5. Fisuración en caliente	13

1.3.	Procesos de soldadura	15
1.3.1.	Proceso FCAW.	15
1.3.2.	Proceso FCAW/GMAW con tecnología Hyperfill.	18
1.3.3.	Gas de protección más usados para proceso GMAW, FCAW y FCAW-HYPERFILL.....	21
1.4.	Códigos de soldadura para calificación de procedimientos y calificación de soldadores.....	24
1.4.1.	Identificación y selección de variables esenciales para proceso FCAW según AWS B2.1:2014.....	26
1.5.	Cálculos de costos de soldadura	27
1.6.	Ensayos no destructivos (END).....	30
1.6.1.	Inspección Visual.....	31
1.6.2.	Tintes penetrantes	31
1.6.3.	Partículas magnéticas.....	32
1.6.4.	Radiografía industrial.....	33
1.7.	Ensayos destructivos.....	34
1.7.1.	Ensayo de tracción	34
1.7.2.	Ensayo de impacto Charpy-V	36
1.7.3.	Ensayo de doblado	37
1.7.4.	Ensayo de dureza	38
CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL		42
2.1.	Metodología para caracterización de material base	42

2.1.1.	Análisis químico	42
2.1.2.	Macrografía.....	43
2.1.3.	Ensayo de tracción	44
2.1.4.	Ensayo de dureza	46
2.1.5.	Ensayo de impacto	47
2.2.	Metodología para la elaboración de registro de calificación de procedimiento de soldadura (PQR) según AWS B2.1	49
2.2.1.	Cantidad de cupones de prueba a realizar para el pWPS.....	50
2.1.1.	Definición de posición de soldadura para ambos procesos de soldadura	50
2.1.2.	Diseño de junta	50
2.1.3.	Selección de material de aporte para el pWPS	51
2.1.4.	Selección de gas de protección para el pWPS	52
2.1.5.	Selección de temperatura de precalentamiento para el pWPS.....	52
2.1.6.	Selección de parámetros eléctricos para el pWPS	61
2.1.7.	Selección de equipo de soldadura para todas las pruebas.....	61
2.1.8.	pWPS para el proceso FCAW-G Hyperfill.....	62
2.1.9.	pWPS para el proceso FCAW-G	65
2.2.	Metodología para la elaboración de WPS según AWS B2.1.....	67
2.2.1.	Cantidad de ensayos a realizar por cupón para cada pWPS	67
2.2.2.	Criterios de aceptación de elaboración de WPS – Inspección visual	68
2.2.3.	Criterios de aceptación de elaboración de WPS – Ensayo de tracción.....	68
2.2.4.	Criterios de aceptación de elaboración de WPS – Ensayo de doblado.....	69

2.2.5.	Criterios de aceptación de elaboración de WPS – Ensayo de impacto.....	69
2.2.6.	Espesores límites para calificación	69
2.2.7.	Inspección visual antes del soldeo de planchas	69
2.2.8.	Inspección visual después del soldeo de planchas.....	70
2.2.9.	Tintes penetrantes	71
2.2.10.	Partículas magnéticas.....	72
2.2.11.	Inspección por radiografía industrial	73
2.3.	Metodología para la ejecución de ensayos destructivos	75
2.3.1.	Ensayo de tracción	75
2.3.2.	Ensayo de doblado – doblado de cara y doblado de raíz	77
2.3.3.	Ensayo de dureza	81
2.3.4.	Ensayo de impacto Charpy-V	82
2.3.5.	Ensayo de macrografía.....	84
CAPÍTULO 3. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		85
3.1.	Caracterización de material base	85
3.2.	Control de Calidad de ejecución de pruebas de soldadura	91
3.3.	Registro de tiempos de soldeo para ambos cupones soldados.....	93
3.4.	Control de Calidad por ensayos no destructivos PT MT y RT	96
3.5.	Resultados de ensayos de doblado guiados	99
3.6.	Resultados de ensayos de tracción.....	102
3.7.	Resultados de ensayos de impacto.....	104

3.8.	Resultados de ensayos de macroataque	106
3.9.	Resultados de ensayos de barrido de durezas	107
3.10.	PQR proceso de soldadura FCAW-HYPERFILL.....	108
3.11.	PQR proceso de soldadura FCAW	112
3.12.	Emisión de WPS aprobados – proceso FCAW-G.....	114
3.13.	Discusión de resultados – proceso FCAW-G Hyperfill.....	117
3.14.	Análisis económico de los procesos de soldadura	118
CONCLUSIONES		125
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....		126
BIBLIOGRAFÍA		128
Anexo 1.	Certificado de Calidad de alambre ULTRACORE 111K3M-H PLUS.....	133
Anexo 2.	Ficha técnica acero S690QL	135

Índice de Tablas

Tabla 1 Designación de un acero estructural genérico, según EN 10027-1	4
Tabla 2 Límites elásticos para aceros Templados y Revenidos.....	4
Tabla 3 Designación del acero EN10025-6 S690QL, según EN 10027-1.....	5
Tabla 4 Composición química nominal del acero EN 10025-6 S690 QL, según EN 10027-1	5
Tabla 5 Propiedades Mecánicas del acero EN 10025-6 S690 QL, según EN 10027-1	6
Tabla 6 Soldabilidad de aceros al carbono	7
Tabla 7 Valores de eficiencia térmica por proceso de soldadura.....	11
Tabla 8 Tabla de posiciones de soldadura para soldadura de ranura.....	23
Tabla 9 Área de soldadura en mm ² para una junta a tope con bisel en V sin talón	30
Tabla 10 Condiciones de ensayo para ensayo de dureza Rockwell.....	39
Tabla 11 Cantidad de ensayos para caracterización de material base	42
Tabla 12 Propiedades mecánicas del alambre UltraCore 111K3M-H Plus c/ lote 19158078	51
Tabla 13 Composición química del alambre UltraCore 111K3M-H Plus c/ lote 19158078 (peso %)	52
Tabla 14 Composición química del material S690QL adquirido	54
Tabla 15 Cálculo de parámetro PCM.....	55
Tabla 16 Ensayos no destructivos a realizar por cupón de soldadura.....	67
Tabla 17 Ensayos destructivos a realizar por cupón de soldadura.....	68
Tabla 18 Diámetros admisibles de los diámetros del rodillo fijo según AWS B2.1/2.1M:2014	80
Tabla 19 Dimensiones de diámetro de rodillo fijo.....	81
Tabla 20 Valores de dureza superficial del material base.....	85
Tabla 21 Composición química del material base analizado	86

Tabla 22 Comparativo de las propiedades mecánicas de material S690QL según EN 10025-6 vs. Valores experimentales encontrados como resultados de ensayos	87
Tabla 23 Valores de energía de impacto absorbida a -60 °C, -20 °C y 20 °C	87
Tabla 24 Comparativo de tiempos de soldeo de cada proceso de soldadura	94
Tabla 25 Resultados de ensayo de doblado de soldadura FCAW-G Hyperfill.....	100
Tabla 26 Resultados de ensayo de doblado de Soldadura FCAW-G.....	101
Tabla 27 Resultados de ensayo de doblado de probeta extra - Soldadura FCAW-G	102
Tabla 28 Resultados de ensayo de tracción – Soldadura FCAW-G	103
Tabla 29 Resultados de ensayos de tracción - Soldadura FCAW-G Hyperfill.....	103
Tabla 30 Resultados de ensayo de impacto – Soldadura FCAW-G Hyperfill.....	105
Tabla 31 Resultados de ensayo de impacto - Soldadura FCAW-G	106
Tabla 32 Resultados de macroataque tanto para FCAW-G Hyperfill como para FCAW-G 107	
Tabla 33 Memoria de cálculo de tasa de deposición D (kg/h).....	119
Tabla 34 Memoria de cálculo costo de gas por unidad de peso de metal depositado C _{gas} (\$/kg)	120
Tabla 35 Memoria de cálculo costo de energía por unidad de peso de metal depositado C _{power} (\$/kg).....	120
Tabla 36 Memoria de cálculo costo de material de aporte por unidad de peso de metal depositado C _{material} (\$/kg).....	121
Tabla 37 Memoria de cálculo costos generales por unidad de peso de metal depositado C _{oh} (\$/kg).....	121
Tabla 38 Memoria de cálculo costo de mano de obra por unidad de peso de metal depositado C _{labor} (\$/Kg).....	123
Tabla 39 Memoria de cálculo costos totales de soldadura por unidad de peso de metal depositado (\$/kg)	124

Índice de figuras

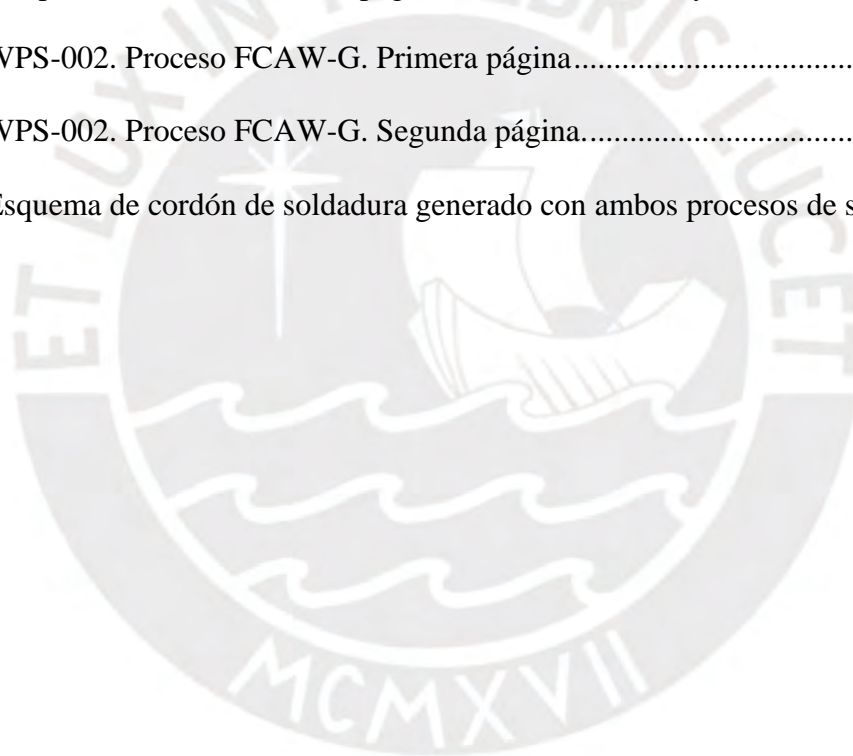
Figura 1. Diagrama de Graville para la identificación de la soldabilidad de un acero según su porcentaje de carbono equivalente y contenido de carbono	8
Figura 2. Esquema simplificado de la zona ZAC	9
Figura 3. Unión soldada con fisuración iniciada en la zona ZAC.	11
Figura 4. Fisuración en caliente para una junta a tope.....	14
Figura 5. Master chart de los procesos de soldadura y unión de materiales.....	16
Figura 6. Esquema del Proceso FCAW-S y FCAW-G.....	17
Figura 7. Equipos empleados para soldadura FCAW: alimentador con motor, fuente de poder, gases de aporte, antorcha.	18
Figura 8. Ciclo de soldadura en el proceso Hyperfill – etapas de transferencia de la gota al baño de fusión.....	20
Figura 9. Máquina de soldar POWER WAVE con tecnología HyperFill	21
Figura 10. Tipos de juntas en soldadura	22
Figura 11. Posición relativa de los cordones de soldadura para soldadura de ranura.....	23
Figura 12. Posición de prueba de soldadura 3G	24
Figura 13. Junta a tope con bisel en V sin talón	30
Figura 14. Brida con grietas detectadas por tintes penetrantes	32
Figura 15. Esquema de partículas magnéticas.	32
Figura 16. Placas radiográficas de cordones de soldadura, cada una con indicaciones.....	34
Figura 17. Curva de esfuerzo vs deformación de algunos aceros.....	36
Figura 18. Esquema de ensayo de impacto Charpy-V y disposición espacial de la entalla de la probeta de impacto.....	37
Figura 19. Doblado de probeta de soldadura mediante punzón y guía con rodillos.....	38
Figura 20. Esquema de ensayo de dureza Rockwell C	40

Figura 21. Esquema de ensayo de dureza Vickers.....	41
Figura 22. Espectrómetro Magellan Q8.....	43
Figura 23. Esteroscopio Leica S6D	44
Figura 24. Máquina de tracción universal ZWICK ROELL Z250	45
Figura 25 Probeta de ensayo de tracción en sección reducida.....	46
Figura 26. Durómetro Wilson Instruments serie RB2000 modelo 2002T.....	47
Figura 27. Probeta para ensayo de dureza	47
Figura 28. Máquina Zwick Roell RKP 450.	48
Figura 29. Probeta para ensayo de impacto Charpy-V	49
Figura 30. Diseño de junta en V simple para WPS.....	51
Figura 31. Selección de grupo según índice de susceptibilidad según nivel de hidrógeno y parámetro PCM.....	55
Figura 32. Temperaturas de precalentamiento a aplicar para espesores de ¾” y 1” con un grado de restricción medio.....	56
Figura 33. Fuente de poder Power Wave® S500 + módulo de refrigeración Cool Arc® 50..	62
Figura 34. WPS preliminar para el proceso FCAW-G Hyperfill. Primera página.	63
Figura 35. WPS preliminar para el proceso FCAW-G Hyperfill. Segunda página.	64
Figura 36. WPS preliminar para el proceso FCAW-G. Primera página.....	65
Figura 37. WPS preliminar para el proceso FCAW-G. Segunda página.....	66
Figura 38. Bridge Cam gauge	70
Figura 39. V-WAC gauge	70
Figura 40. Kit de tintes penetrantes marca MAGNAFLUX. Imagen referencial.....	71
Figura 41. Yugo magnético Y-7.	73
Figura 42. Lámpara EV5000.....	73
Figura 43. Partículas magnéticas fluorescentes MR 76F.....	73

Figura 44. Tubo generador de rayos X Balteau NDT Ceram 35	74
Figura 45. Ubicación de límites de zonas a radiografiar	75
Figura 46. Probeta de ensayo de tracción en sección reducida.....	76
Figura 47. Matriz y punzón de doblado a utilizar para las pruebas.	77
Figura 48. Esquema de matriz de doblado genérica según AWS B2.1/B2.1M:2014.....	78
Figura 49. Fórmula del diámetro de rodillo fijo según AWS B4.0:2016.	80
Figura 50. Durómetro Zwick Roell ZHV30	81
Figura 51. Probeta para barrido de durezas.	82
Figura 52. Puntos para el barrido de durezas Vickers para la probeta.....	82
Figura 53. Probeta para ensayo de impacto Charpy-V.	83
Figura 54. Gráfico de Energía de impacto absorbida vs temperatura de ensayo.....	88
Figura 55. Sección de probetas ensayadas a -60 °C	88
Figura 56. Sección de probetas ensayadas a -20 °C	88
Figura 57. Vista lateral de probetas ensayadas a -80 °C.....	89
Figura 58. Sección de probeta ensayada a -80 °C.....	89
Figura 59. Muestra metalográfica. Imagen a 100X	89
Figura 60. Muestra metalográfica. Imagen a 100X	89
Figura 61. Diagrama de Graville con los parámetros químicos del acero estudiado.....	91
Figura 62. Ángulo de bisel de 30°	91
Figura 63. Altura de talón de 2.5 mm	91
Figura 64. Pre calentamiento de acero	92
Figura 65. Lectura de pirómetro de 175 °C	92
Figura 66. Porosidad vermicular en el extremo del cupón soldado con FCAW.....	92
Figura 67. Medición de socavaciones	93
Figura 68. Medida de 0.6 mm para cupón WPS-002.....	93

Figura 69. Registro de parámetros eléctricos para PQR-001 – Soldeo con FCAW-HYPERFIL	93
Figura 70. Registro de parámetros eléctricos para PQR-002 – Soldeo con FCAW	94
Figura 71. Indicaciones de porosidades vermiculares en cupón WPS-002	96
Figura 72. Indicación de socavación que se encontró por método de Inspección Visual y que fue validada por Tintes Penetrantes	96
Figura 73. Indicaciones lineales en el cordón de soldadura.....	97
Figura 74. Indicaciones lineales sobre el cordón de soldadura.....	97
Figura 75. Porosidad vermicular en cupón WPS-02 soldado con FCAW	98
Figura 76. Porosidad individual en cupón WPS-01 soldado con FCAW-Hyperfill	99
Figura 77. Ejecución de ensayo de doblado.....	100
Figura 78. Foto frontal de probetas de doblado de raíz – Soldadura FCAW-G Hyperfill.....	100
Figura 79. Probeta de doblado rota, proceso FCAW-G.....	101
Figura 80. Foto lateral de probeta de doblado rota, proceso FCAW-G.....	101
Figura 81. Ejecución de ensayo de doblado.....	102
Figura 82. Foto frontal de probeta extra de doblado de raíz FCAW-G	102
Figura 83. Rotura dúctil de probeta de tracción en zona del material base	103
Figura 84. Probeta con cordón de soldadura y zona zac revelados.	104
Figura 85. Probetas marcadas para mecanizado.	104
Figura 86. Probetas de impacto mecanizadas.	104
Figura 87. Detalle de entalla de probeta charpy-v	104
Figura 88. Probetas de impacto de cupón 1 (soldadura FCAW-G Hyperfill) puntos S4, S5 y S6 correspondientes a la zona ZAC.	105
Figura 89. Probeta de barrido de durezas de cupón FCAW-G Hyperfill.....	106
Figura 90. Probeta de barrido de durezas de cupón FCAW-G	106

Figura 91. Marcado de probetas previo a la ejecución de ensayo de dureza Vickers.....	107
Figura 92. Barrido de durezas de proceso FCAW-G Hyperfill	108
Figura 93. Barrido de durezas de proceso FCAW-G.....	108
Figura 94. PQR proceso FCAW-HYPERFILL. Primera página	109
Figura 95. PQR proceso FCAW-HYPERFILL. Segunda página.....	110
Figura 96. PQR Proceso FCAW-HYPERFILL. Tercera página. Resultado de ensayos.....	111
Figura 97. PQR proceso FCAW. Primera página.....	112
Figura 98. PQR proceso FCAW. Segunda página.....	113
Figura 99. PQR proceso FCAW. Tercera página. Resultado de ensayos.....	114
Figura 100. WPS-002. Proceso FCAW-G. Primera página.....	115
Figura 101. WPS-002. Proceso FCAW-G. Segunda página.....	116
Figura 102. Esquema de cordón de soldadura generado con ambos procesos de soldadura.	119



Introducción

El sector minería es uno de los pilares del desarrollo económico e industrial en el Perú, caracterizado por la constante demanda de estructuras metálicas robustas y de alto rendimiento. En este contexto, los aceros estructurales cumplen un rol fundamental, siendo ampliamente utilizados en la fabricación de puentes, plantas industriales, estructuras de soporte y en la construcción de componentes de maquinaria pesada como brazos hidráulicos, chasises y cucharones de excavadoras. La resistencia y tenacidad de estos aceros son factores clave para garantizar la seguridad y durabilidad de las obras y equipos sometidos a condiciones de operación extremas.

Sin embargo, el sector se enfrenta a una necesidad creciente de optimizar los procesos productivos, especialmente en soldadura, debido a los altos costos de fabricación y a la presión por reducir los plazos de entrega. En soldadura, la tasa de deposición, definida como la cantidad de metal de aporte depositado en un determinado tiempo, representa una de las variables más relevantes para aumentar la productividad. En los procesos convencionales como el SMAW, GMAW, FCAW, SAW, esta tasa está limitada por las características propias de cada técnica, lo que restringe el avance de la fabricación y el montaje de estructuras de gran envergadura.

Para dar solución a esta problemática, surge la posibilidad de emplear nuevas tecnologías como Hyperfill, una tecnología que permite utilizar dos alambres de soldadura empleando una sola fuente de poder y una sola antorcha de soldadura, lo que permite incrementar significativamente la tasa de deposición sin comprometer la calidad de la soldadura. En el presente trabajo se propone estudiar dos procesos FCAW Hyperfill y FCAW en un acero de alta resistencia EN 10025-6 S690QL utilizado en la fabricación de puentes y maquinaria pesada y para ello se propone poder calificar un WPS según los lineamientos del código de soldadura AWS B2.1/B2.1M:2014 con el fin de validar la ejecución de uniones soldadas sanas y resistentes.

Finalmente, se espera que al probarse al límite ambas tecnologías ante condiciones de soldaduras vertical ascendente y sin backing y que posteriormente al comparar los resultados obtenidos se logre demostrar que a través del proceso FCAW Hyperfill la calidad de la unión soldada se mantiene igual o incluso supera en términos de resistencia mecánica y propiedades metalúrgicas; y segundo, evidenciar que con Hyperfill se logra alcanzar mayores índices de productividad, reduciendo así el tiempo y los costos asociados a la fabricación y montaje de estructuras metálicas en el sector minería y construcción.

Objetivo general

“Realizar un estudio técnico-económico de soldadura de un acero EN 10025-6 S690 QL de $\frac{3}{4}$ ” cuando es soldado bajo dos procesos de soldadura: FCAW y FCAW-Hyperfill”.

Objetivos específicos

- Caracterizar el material base.
- Calificar los procedimientos de soldadura para el acero EN 10025-6 S690 QL que se soldará por procesos FCAW, FCAW-Hyperfill
- Evaluar cuantitativamente y cualitativamente las propiedades mecánicas de las juntas soldadas de acero EN 10025-6 S690 QL que se obtienen de los ensayos destructivos y no destructivos.
- Comparar económicamente los procesos de soldadura seleccionados considerando costos de consumibles, gases, máquina de soldar, energía y costos de hora-hombre de un soldador.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1. Material base EN 10025-6 S690QL

1.1.1. Clasificación de Aceros según EN 10027-1

El acero estudiado **S690QL** se designa bajo normativa europea EN 10027-1. Dicha norma divide a los aceros según su aplicación:

- Aceros estructurales.
- Aceros para aplicaciones a presión.
- Aceros para líneas de piping.
- Aceros para aplicaciones de ingeniería.
- Aceros para refuerzo de concreto.
- Aceros para pre-tensionado de concreto.
- Aceros para rieles.
- Aceros en estado de planchas laminadas en frío.
- Aceros para empaques.
- Aceros eléctricos.
- Aceros no aleados.

Un acero estructural genérico especificado bajo normativa EN 10027-1 se designa según 3 grupos de símbolos que se explican en la Tabla 1. Se asigna a primera letra de la designación de un acero un “S” para aceros estructurales o “G” para aceros fundidos (p 6-8). Los siguientes números de la designación indican el esfuerzo de fluencia mínimo especificado, o límite elástico mínimo especificado, del acero. Por último, el último dígito da información adicional del acero y/o posibles aplicaciones de servicio (British Standards Institution [BSI], 2016).

Tabla 1

Designación de un acero estructural genérico, según EN 10027-1

S690QL	S: acero estructural / G: acero fundido
	690: Límite elástico mínimo en MPa
	QL: Símbolos adicionales.
	Q: material con grano fino
	L: aplicaciones para baja temperatura

1.1.2. Aceros estructurales Templados y Revenidos

Según O'Brien (2011), los aceros Q&T (“*quenched & tempered*” o Templados y revenidos) son aquellos cuyos esfuerzos de fluencia van desde los 340 MPa [50 KSI] hasta los 1030 MPa [150 KSI] (p 55). No obstante, BSI (2019) especifica en la norma EN 10025-6 que los aceros estructurales estandarizados mantienen su esfuerzo a la fluencia desde los 460 MPa [66 KSI] hasta los 960 MPa [139 KSI], acotando más su uso (p 10). Esta información es resumida en la Tabla 2.

Tabla 2

Límites elásticos para aceros Templados y Revenidos

Fuente	Límite de fluencia para aceros templados y revenidos	Aplicación
AWS Welding handbook 9th Ed. Vol. 4	340 – 1030 MPa [50 – 150 KSI]	Aceros estructurales Aceros para recipientes a presión Aceros para aplicaciones navales
EN 10025-6	460 – 960 MPa [66 – 139 KSI]	Aceros estructurales

Los aceros templados y revenidos, al presentar valores altos de resistencia a la tracción a comparación de aceros de bajo carbono, son los óptimos para poder ser seleccionados en

aplicaciones para máquinas de movimiento de tierras, puentes, molino de bolas, equipos mineros, construcción de barcos, torres de comunicación, recipientes a presión, entre otros.

1.1.3. Material base – EN 10025-6 S690QL

El acero EN 10025-6 S690QL es un acero estructural que presenta 100 KSI de esfuerzo de fluencia mínimo especificado. Asimismo, en la designación S690QL la letra “L” hace referencia a que este acero puede ser utilizado para aplicaciones a bajas temperaturas donde se requiera cierto grado de ductilidad (ver Tabla 3). Por último, la misma norma indica que un acero con dicha designación presenta un estado de suministro de bonificado (templado y revenido). A continuación, se muestran tanto su designación, composición química (ver Tabla 4) y propiedades mecánicas (ver Tabla 5).

Tabla 3

Designación del acero EN10025-6 S690QL, según EN 10027-1

S690 QL	S: Acero estructural
	690: Resistencia a la fluencia en MPa
	Q: Acero templado y revenido
	L: Aplicaciones para bajas temperaturas

Tabla 4

Composición química nominal del acero EN 10025-6 S690 QL, según EN 10027-1

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.22	1.8	0.025	0.012	0.86	1.6	4.1	0.74	0.55	0.07
Ti	V	Co	Al	W	Sn	Fe	B	N	Zr
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.07	0.14	---	---	---	---	---	0.006	0.016	0.17

Tabla 5

Propiedades Mecánicas del acero EN 10025-6 S690 QL, según EN 10027-1

Propiedades Mecánicas	Valores
Esfuerzo de Fluencia	690 MPa [100 ksi]
Resistencia a la tracción	940 – 1100 MPa [136-159 ksi]
Elongación	14%
Energía de impacto	50 J @ 0°C
	40 J @ -20°C
	30 J @ -30°C

1.2. Soldabilidad de un material base

La soldabilidad se define como la capacidad de un material de ser soldado bajo las condiciones determinadas de manera que se obtenga una estructura la estructura deseada y que además la unión se comporte satisfactoriamente en las condiciones de servicio (CESOL, 2016, p.36).

La soldabilidad es una propiedad de los metales y es una propiedad cualitativa. No obstante, para el caso de los aceros, la soldabilidad de un acero depende tanto del porcentaje de carbono como de carbono equivalente. A mayor cantidad de carbono presente en la aleación del acero, la resistencia y dureza del material aumentan. así como también aumenta el peligro de agrietamiento en frío del material después de soldarse. En otras palabras, a mayor carbono, menor soldabilidad o facilidad con la que se puede obtener una unión soldada sana y resistente. En la Tabla 6 se muestra la soldabilidad de los aceros según su contenido de carbono.

Para el caso de los aceros aleados los elementos aleantes influyen en la soldabilidad ya que estos tienen una influencia similar, pero en menor medida, a cuando existe carbono en el material. El conocer la cantidad de carbono y carbono equivalente permite definir la estrategia de soldadura óptima para materiales de media o baja soldabilidad.

Tabla 6

Soldabilidad de aceros al carbono

Porcentaje de Carbono (C%)	Soldabilidad
%C < 0.15%	Excelente
0.15 % < C% < 0.30 %	Buena
0.30 < C% < 0.50 %	Media
0.50 % < C% < 1%	Pobre

Nota: Tomado de Curso de Formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura-IWE. Módulo II. Tema 2.9 Aceros Estructurales (No Aleados), por CESOL, 2016

Para el cálculo del carbono equivalente se utilizará la fórmula propuesta el Instituto Internacional de Soldadura.

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

Otro enfoque para identificar la el nivel de soldabilidad según la AWS es a través del diagrama de Graville (ver Figura 1). Este diagrama, indicado en la AWS D1.1:2020 apéndice B emplea tanto el porcentaje de carbono equivalente como el porcentaje de carbono. Para aceros de bajo porcentaje de carbono menores a de entre 0.09 a 0.12 la soldabilidad es excelente (nivel 1) y es muy probable conseguir soldaduras sin agrietamiento inducido por hidrógeno. Para aceros que caen en la zona 2 presenta una soldabilidad entre buena a media y para generar una soldadura correcta se tiene que controlar el heat input. Se puede controlar la soldabilidad a través de métodos de dureza. Para aceros que caen en el campo de la zona 3 se presenta una soldabilidad media a pobre y se requiere utilizar el método de control de hidrógeno en la soldadura para el cálculo de la temperatura de precalentamiento.

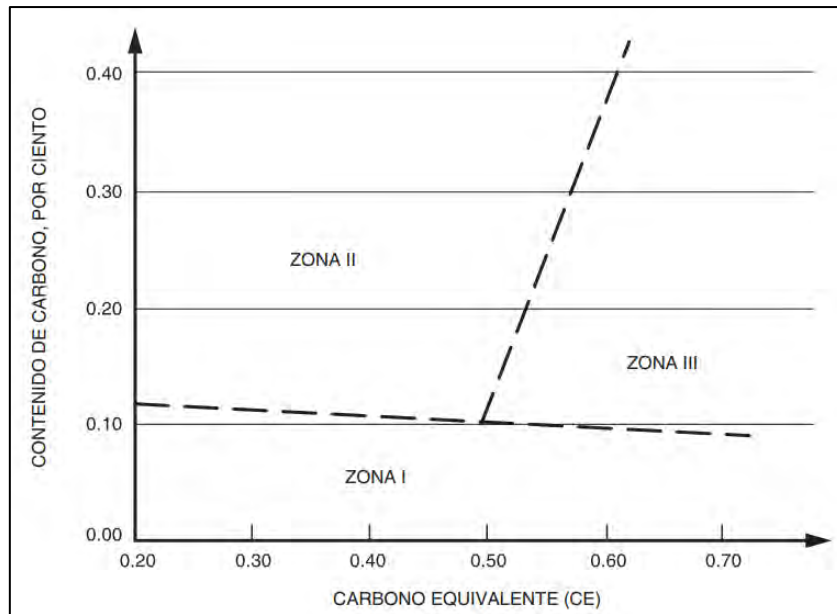


Figura 1. Diagrama de Graville para la identificación de la soldabilidad de un acero según su porcentaje de carbono equivalente y contenido de carbono

Nota: Tomado de *Código de Soldadura Estructural – Acero* (p. 359), por AWS, 2020

1.2.1. Zona Afectada Térmicamente por el Calor (ZAC).

Se define la zona afectada por el calor (ZAC) de una unión soldada como la zona del metal base cuyas propiedades mecánicas o microestructura han sido alteradas por el calor producto de la soldadura, soldadura blanda, soldadura fuerte o corte térmico.

La adición de calor en el material, producto del proceso de soldadura, genera cambios microestructurales en el material base. Dependiendo de las condiciones iniciales de soldadura como temperatura de precalentamiento y condiciones durante el soldeo (voltaje, amperaje, velocidad de avance, proceso de soldadura) así como condiciones ambientales (temperatura del ambiente) se puede generar un enfriamiento de la unión más pronunciado o más suave.

A mayor velocidad de enfriamiento de la pieza, más pronunciados son los cambios microestructurales (dado que el material tiende a templarse) y como consecuencia de ello la zona ZAC va a ser menos ancha. Por el contrario, cuanto más lento sea el enfriamiento, la zona ZAC será más ancha y por tanto las propiedades mecánicas del material base serán más

homogéneas. Gráficamente se puede visualizar la zona ZAC (heat-affected zone) en la Figura 2 que se muestra a continuación.

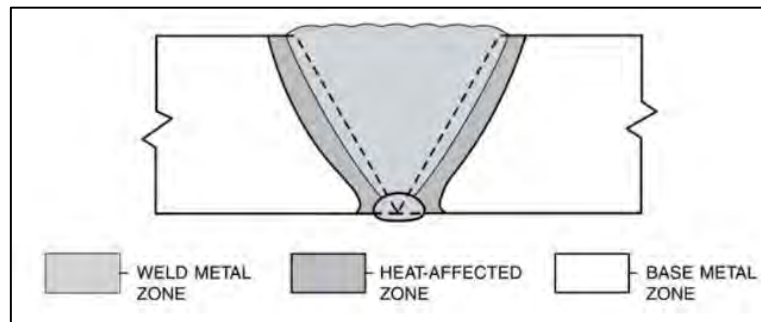


Figura 2. Esquema simplificado de la zona ZAC

Nota. Tomado de *Standard Welding Terms and Definitions including Terms of Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting and Thermal Spraying* (p 119), por AWS, 2020

1.2.2. Temperatura de precalentamiento e interpase.

Según la norma AWS A3.0:2020, se define la temperatura de precalentamiento como “la temperatura del material base en los alrededores del punto de soldadura antes de que comience la soldadura”.

Para aceros de medio y alto contenido de carbono, a fin de mejorar la soldabilidad, se recomienda emplear valores de temperatura de precalentamiento / interpase mayores a la temperatura ambiente a fin de garantizar la calidad de la unión soldada después del soldeo.

Para el cálculo de la temperatura de precalentamiento se puede emplear el método de la AWS D1.1/D1.1M:2020 – Método de Control que contempla factores como composición química, cantidad de hidrógeno difundido en el material de aporte, espesor y grado de embriamiento en la unión soldada, así como el método de la norma EN 1011-2 que además de considerar los efectos de la composición química, nivel de hidrógeno difusible en la unión soldada también considera el espesor del material base y el heat input del proceso de soldadura.

1.2.3. Aporte térmico o Heat Input.

El aporte térmico, también llamado heat input, es la cantidad energía térmica que se añade a la unión soldada para poder fundir tanto el material de aporte como el material base. Su valor depende principalmente de (1) el voltaje (2) el amperaje (3) el tipo de corriente – si es corriente continua o alterna (4) la velocidad de avance y (5) del tipo de proceso de soldadura.

El aporte térmico bruto (HIB), para procesos de soldadura con fuentes de corriente continua se define con la Ecuación (2), donde HIB: Heat input bruto, V: Voltaje, I: Corriente, v : Velocidad de avance.

$$HIB \left(\frac{kJ}{mm} \right) = \frac{V (V) * I(A) * 60}{v \left(\frac{mm}{min} \right) * 1000} \quad (2)$$

Por otra parte, el aporte térmico neto, o heat input neto (HIN) es el calor que es realmente aportado a la unión soldada. Todo proceso de soldadura genera pérdidas de energía por calor (radiación, conducción, convección) y parte de esa energía se pierde producto de las pérdidas inherentes a cada proceso de soldadura. Para su cálculo, ver Ecuación (3), donde HIN: Heat input neto, HIB: Heat input bruto, η_t : Eficiencia térmica del proceso de soldadura.

$$HIN \left(\frac{kJ}{mm} \right) = \eta_t * HIB = \eta_t * \frac{V * I * 60}{v * 1000} \quad (3)$$

A continuación, en la Tabla 7 se muestran los valores de eficiencias térmicas por proceso de soldadura estándares o promedios. Estos valores pueden ser empleadas como referenciales.

Para obtener soldaduras sanas y resistentes de los aceros HSLA y aceros de baja aleación y microaleados, se recomienda controlar el valor del Heat Input a no más de 2 kJ/mm.

Tabla 7

Valores de eficiencia térmica por proceso de soldadura

PROCESO	EFICIENCIA TÉRMICA (η t)
SMAW	70-85%
GMAW	70-85%
GTAW	20-50%
SAW	90-99%

Nota. Tomado de *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura. Capítulo II: Ciclo Térmico* (p 86), por Fosca, C., 2007

1.2.4. Fisuración en frío

El fenómeno de la fisuración por hidrógeno suele ocurrir después de que se enfría la unión soldada, específicamente por debajo de los 150 °C. Las fisuras pueden aparecer ya sea inmediatamente o después de un periodo de 48 horas con una tendencia a aparecer en la zona ZAC. En la Figura 3 se puede ver un fenómeno de agrietamiento cuya grieta inicia en la interfaz entre la zona ZAC y la zona de aporte de soldadura.



Figura 3. Unión soldada con fisuración iniciada en la zona ZAC.

Nota. Tomado de *Fenómenos de agrietamiento de las uniones soldadas: Fisuración en frío* por Nuñez R., 2021.

Para que se genere la fisuración inducida por hidrógeno, se tienen que combinar tres factores importantes presentes durante el proceso de soldeo: 1) Microestructura susceptible a

la fisuración en frío como lo puede ser estructuras duras como matrices martensíticas 2) Fuentes de hidrógeno presentes ya sea en la superficie del material base o en el material de aporte 3) Tensiones residuales en el material, especialmente tensiones de tracción ya sea provenientes de cargas mecánicas externas o producto de la dilatación, contracción en una unión mediana o fuertemente embriada.

Como dato adicional, se presenta una tendencia mayor a la fisuración inducida por hidrógeno cuando el material tiene un esfuerzo de fluencia mayor a 620 MPa (90 ksi) (AWS, 2011, p.12).

Para poder controlar este fenómeno, se proponen el control de cada uno de los elementos por medio de las siguientes estrategias presentadas a continuación.

1.2.4.1. Fuente de hidrógeno.

Los materiales de aporte son los mayores contaminantes de hidrógeno para una unión soldada, especialmente para los procesos SMAW Y FCAW. Para poder evitar el hidrógeno disuelto en el baño de fusión, Nuñez (2021) recomienda emplear como medidas de control:

- a. Usar procesos de soldadura cuyos materiales de aporte eviten la contaminación.
Ejemplo: SMAW con electrodos de bajo hidrógeno, o procesos con alambres de bajo absorción de hidrógeno como lo son el GMAW y MCAW.
- b. Ejecutar la limpieza preliminar de la superficie de la junta preparada/biselada y que pueda estar libre de grasas y humedad por medio de escobillado y amolado. De esta forma, se evita la contaminación del baño de fusión durante el soldeo de las piezas.
- c. Para procesos semiautomáticos, emplear gas de protección ya sea gas activo (100% CO₂ o Ar-CO₂ al 80/20) o gas inerte (Ar al 100%)

1.2.4.2. Microestructura susceptible

Microestructuras duras, producto de altos porcentajes de carbono, o microestructuras con tratamientos térmicos que endurecieron el material, pueden inducir al fenómeno de fisuración en frío. Se recomienda emplear las medidas de control:

- a. Controlar la temperatura de precalentamiento e interpase para que la transferencia de calor y enfriamiento del material sea más suave.
- b. Controlar el aporte de calor para no sobrecalentar la pieza
- c. Controlar la velocidad de enfriamiento de la pieza después del soldeo por métodos como baño en cal o cubierta de la pieza con mantas térmicas.
- d. Medir la dureza en la zona ZAC como medida indirecta del control del hidrógeno. Durezas menores a 350 HV son recomendables.

1.2.4.3. Tensiones residuales

Las tensiones generadas producto de las deformaciones térmicas de dilatación y contracción, así como tensiones estáticas, dinámicas, de impacto, etc., son el último ingrediente para la fisuración en frío. Para este caso como la junta estará apuntalada rígidamente podría influir en la fisuración en frío.

1.2.5. Fisuración en caliente

La fisuración por solidificación suele ocurrir en los aceros al carbono y aceros de baja aleación. Esto sucede cuando el baño de fusión solidifica y la unión soldada no puede soportar los cambios volumétricos y de esfuerzos productos de (1) el enfriamiento del material y (2) el grado de embridamiento que puede haber en la junta soldada.

Los factores que propician la aparición de la fisuración en caliente en una unión soldada son:

- Alto aporte térmico.

- Segregación de constituyentes con bajo punto de fusión.
- Cordones muy anchos o muy angostos.
- Tensiones de soldadura.
- Presencia de eutécticos durante la soldadura.

Principalmente este fenómeno sucede cuando el tamaño del área transversal de cada pase del cordón (en soldaduras multipase) tienen un perfil cóncavo, de tamaño pequeño o cuando en una unión soldada la relación altura-ancho del baño de fusión son incorrectas. Un ejemplo de agrietamiento en caliente es el mostrado en la Figura 4 en el que la discontinuidad se forma en el centro del cordón y a su vez se puede apreciar que la relación alto-ancho es más grande cuando se le compara con un diseño de junta en V de 60° (diseño más usual para juntas a tope de penetración parcial o penetración completa).

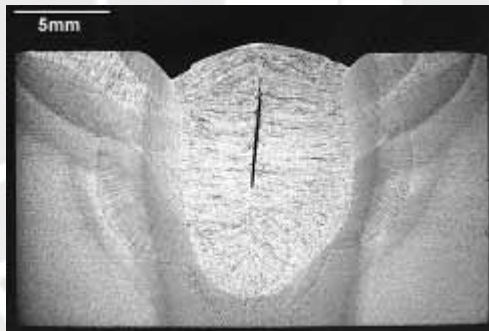


Figura 4. *Fisuración en caliente para una junta a tope*

Nota. Tomado de *What is hot cracking (solidification cracking)?*, por TWI, 2017. La fisuración en caliente aparece en el centro del cordón.

A fin de minimizar o eliminar la fisuración en caliente, Nuñez (2021) también recomienda ejecutar las siguientes medidas de control:

- Buen control del heat input. Se recomienda controlar tanto el voltaje, amperaje y velocidad de avance.

- b. Buen diseño de junta. Se definirá un diseño de junta para facilitar el enfriamiento homogéneo del baño de fusión.
- c. Uso correcto de cantidad de cordones. Se buscará realizar la cantidad necesaria de cordones. Se evitará el uso de soldaduras de un pase para espesores anchos.

1.3. Procesos de soldadura

Los procesos de soldadura estándares son mencionados en el código de soldadura AWS A3.0M/A3.0 (ver Figura 5). De los procesos de soldadura más empleados en la industria metalmecánica peruana encontramos a SMAW, GTAW, GMAW, FCAW y SAW. Se detallarán los procesos de soldadura FCAW y FCAW-Hyperfill puesto que son los procesos a utilizar en el desarrollo de la presente tesis.

1.3.1. Proceso FCAW.

El proceso FCAW es un proceso de soldadura semiautomático por fusión por arco eléctrico parecido al GMAW, sólo que emplea un alambre tubular en vez de alambre sólido. Dentro del alambre se encuentra un flux cuyos componentes contienen elementos que le dan mejor control y estabilidad al arco eléctrico. Chiara (2021) explica que las características de este proceso son las presentadas a continuación:

- a. Puede ser autoprotegido (FCAW-S) o puede usarse un gas de protección externo (FCAW-G).
- b. Al usarse un alambre tubular, la densidad de corriente que soporta la sección del material de aporte es mayor y por tanto aumenta la tasa de deposición y penetración en el proceso de soldadura cuando se le compara con el proceso GMAW.
- c. Asimismo, para disminuir el calor de aporte por los altos valores de corriente, se usan valores de velocidad de avance altos.

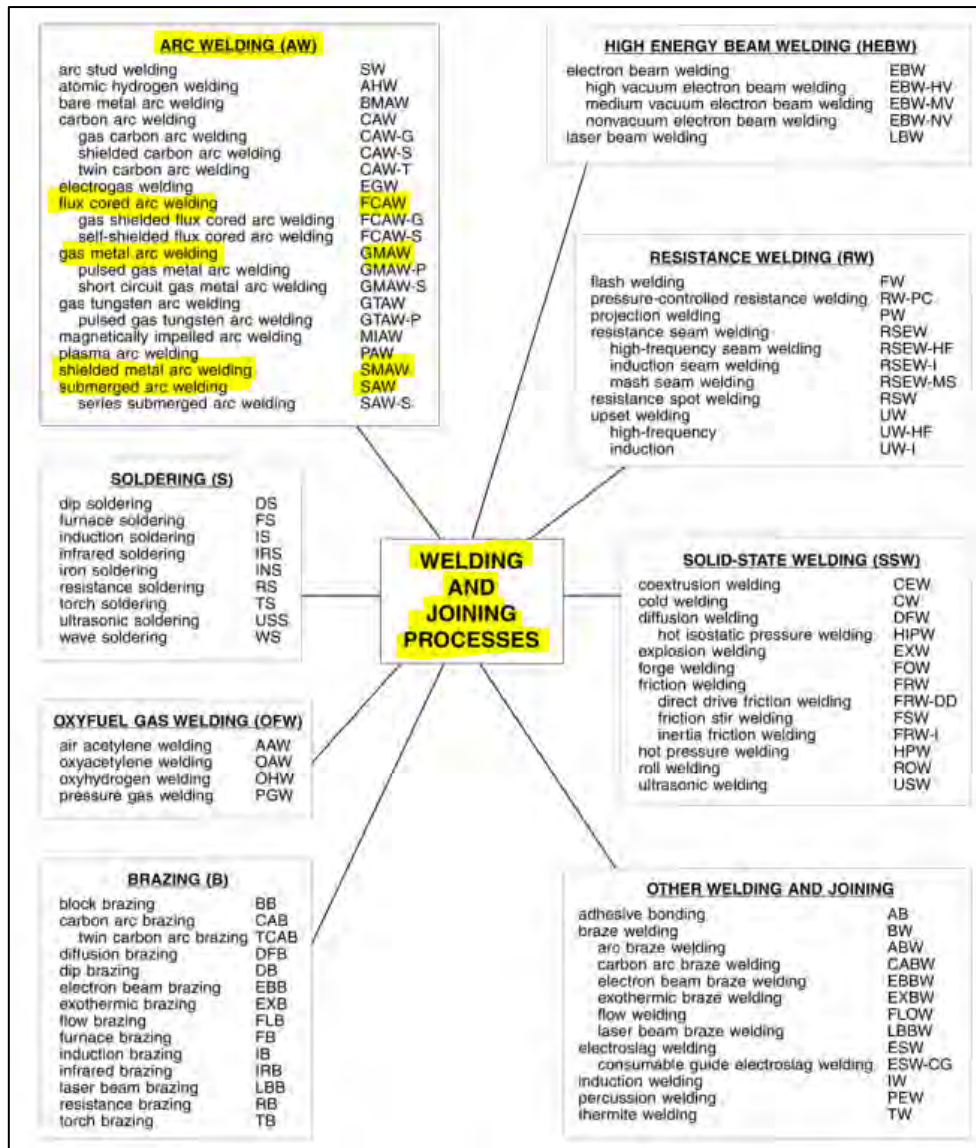


Figura 5. Master chart de los procesos de soldadura y unión de materiales.

Nota. Tomado de *Standard Welding Terms and Definitions including Terms of Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting and Thermal Spraying* (p. 75), por AWS, 2020

- d. La fuente de alimentación usa principalmente CCEP – Corriente Continua Electrodo al Positivo / Polaridad invertida. Mayor estabilidad del arco, buena penetración buenas características.
- e. Limitado a soldadura de aceros ferrosos y aceros base al níquel. No se puede soldar aluminio.

- f. Equipos más costosos y más complejos que en SMAW. Requieren un mayor mantenimiento.
- g. Genera más humos que en GMAW.

A continuación, en la Figura 6 se muestra visualmente los esquemas de los procesos de soldadura FCAW-S y FCAW-G. Mientras que en el proceso FCAW-S la atmósfera protectora es generada por la fusión del propio fundente del alambre, el proceso FCAW-G usa un gas de protección auxiliar, que puede ser un gas inerte o gas activo. Asimismo, en la Figura 7, se observa los equipos requeridos para poder ejecutar el proceso de soldadura FCAW. Como se ve en la misma figura, se requiere de una fuente de poder, un alimentador que acciona el carrete de alambre, una botella de gas (opcional), la antorcha y una pinza o clamp puesta a la pieza de trabajo para cerrar el circuito eléctrico.

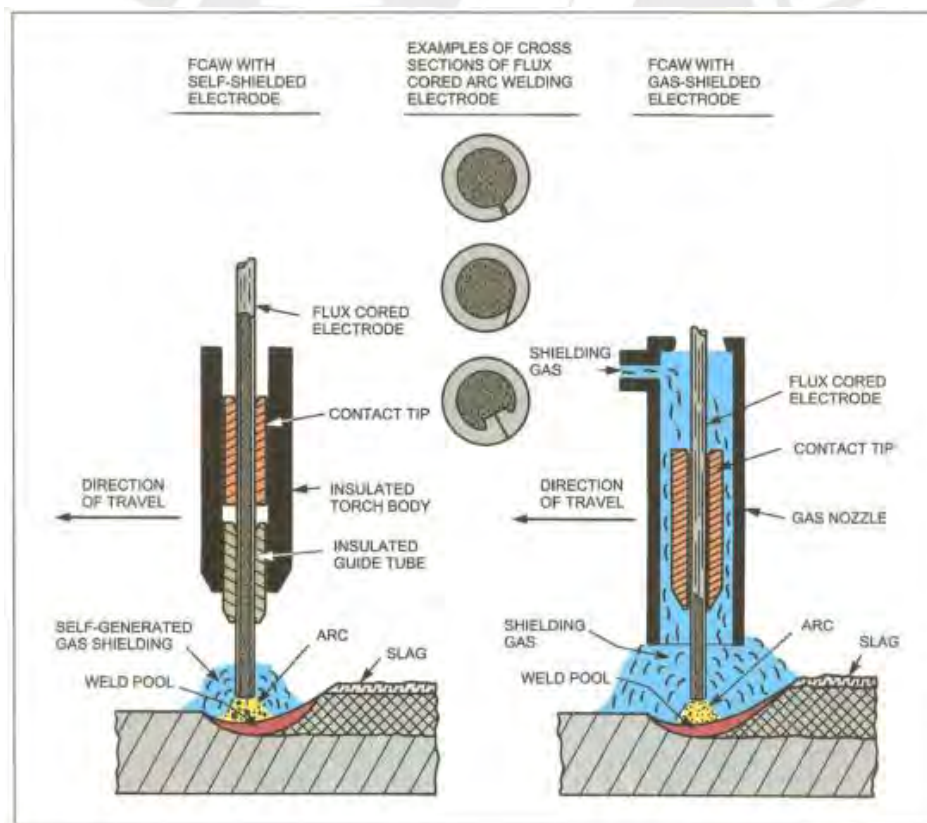


Figura 6. Esquema del Proceso FCAW-S y FCAW-G

Nota. Tomado de *Welding Handbook Volume 2 – Welding Processes* (p.212) por O'Brien (2004)

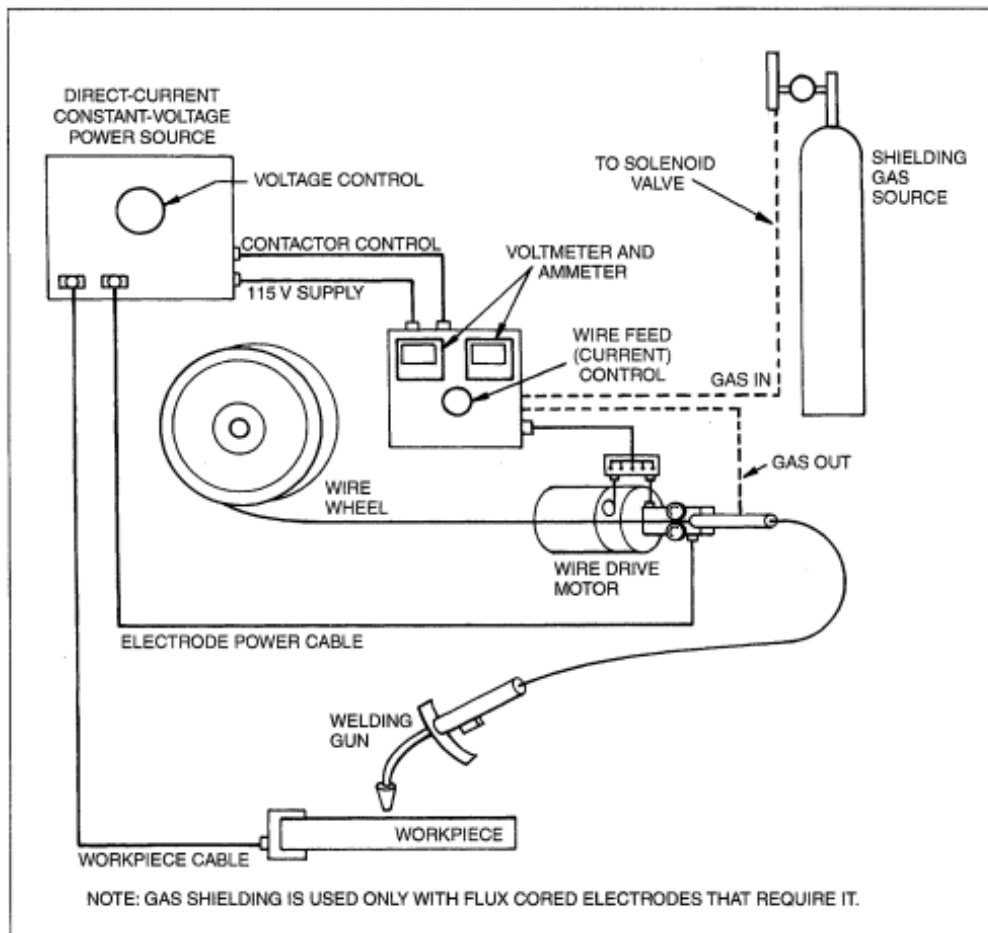


Figura 7. Equipos empleados para soldadura FCAW: alimentador con motor, fuente de poder, gases de aporte, antorcha.

Nota. Tomado de *Welding Handbook Volume 2 – Welding Processes* (p.212) por O'Brien (2004)

1.3.2. Proceso FCAW/GMAW con tecnología Hyperfill.

HyperFill™ es una tecnología de soldadura que permite poder soldar con un alambre doble (twin-wire) y que este salga por una misma punta de contacto (ver Figura 9). Ello genera una mayor tasa de deposición cuando se le compara con procesos GMAW o FCAW de un solo carrete de soldadura. Para poder generar un arco eléctrico estable a través de dos alambres que atraviesan una sola punta de contacto se utilizan mayores valores de amperaje. Si esta tecnología se le compara con dos máquinas de soldar típicas que cada una utiliza un alambre de soldadura y que consumen cada una un valor de potencia eléctrico $P = V \cdot I$ (Voltaje x

Amperaje), la energía requerida en Hyperfill es menor (ver Ecuación 4), ya que se aprovecha la energía térmica del 1er alambre para poder fundir más fácilmente el 2do alambre. Es por esa misma razón que las máquinas de soldar de un solo alambre utilizan fuentes de poder de 400-450 amperios a un ciclo de trabajo del 100%, mientras que las máquinas de soldar Lincoln con tecnología Hyperfill utilizan fuentes de poder de 500 o 600 amperios como mínimo. Al incrementarse ligeramente el calor por el Heat Input Bruto, se requiere a su vez emplear un sistema de refrigeración por agua en la antorcha de soldar para evitar el sobrecalentamiento de esta y para evitar el choque térmico cuando se utiliza Hyperfill en soldadura semiautomática (cuando un soldador ejecuta directamente la soldadura).

$$P_{Hyperfill} < 2 * P = 2 * V * I \quad (4)$$

Según el desarrollador de la tecnología Lincoln (2019), Hyperfill permite soldaduras con tamaño de gotas de alambre fundidos más grandes y con un arco eléctrico más estable puesto que este mismo arco presenta un cono más ancho que el de un proceso normal de un solo alambre. Esto se puede observar en la Figura 8 en el que se muestra las etapas de formación y separación de la gota fundida de los alambres en Hyperfill a través de un solo arco eléctrico. Son 4 las etapas que conforman la transferencia del alambre fundido al baño de fusión:

1. Formación de la gota. Cada alambre se funde producto del calor de fusión generado por el arco eléctrico. Las fuerzas electromagnéticas generan a su vez que ambas gotas se unan en el centro, formando una gota sola
2. Estrangulación de la gota. Por el mismo efecto pinch se logra que la gota se estrangule y se vaya separando del alambre sólido
3. Separación del metal fundido. El efecto pinch termina de estrangular la gota y sea disparada hacia el baño de fusión.
4. Background. El fabricante llama a esta etapa de esa forma ya que, cuando la gota alcanza el baño de fusión, el background del arco eléctrico aporta calor al baño de fusión

y permite que el alambre, impulsado por el alimentador, pueda tener vía libre para seguir avanzando sin perder calor, listo para la siguiente transferencia de la siguiente gota.



Figura 8. *Ciclo de soldadura en el proceso Hyperfill – etapas de transferencia de la gota al baño de fusión.*

Nota: Tomado de *Hyperfill™*, de Lincoln Global Inc, 2019.

Los beneficios de emplear esta tecnología son los siguientes:

- Mayor productividad en la soldadura gracias a la soldadura de doble alambre. Puede presentar hasta un +35% de tasa de deposición en planta y +21% en campo para proceso de soldadura FCAW con un alambre de 1.2mm para una soldadura en posición plana con backing. (Lincoln Electric, s.f.). Nota: el fabricante no especifica la separación de raíz en la bibliografía. Se podría asumir que utilizaron una separación de raíz entre 3 a 5mm al utilizar un backing en sus pruebas experimentales.
- Equipo simple en relación a su tecnología. Solamente requiere de una sola fuente, un solo alimentador, un módulo de refrigeración y la antorcha de soldar.
- Se puede obtener una calidad de la unión soldada con características similares a las obtenidas en procesos GMAW y FCAW soldadas con un solo alambre.

Una característica del proceso es que genera un mayor aporte térmico o “heat input” al proceso de soldeo. Para aplicaciones de soldadura de acero de alto carbono se

recomienda limitar el valor de heat input a fin de evitar grandes variaciones de propiedades microestructurales en la unión soldada.



Figura 9. Máquina de soldar POWER WAVE con tecnología HyperFill

Nota. Tomado de *Lincoln Electric Expands HyperFill Line to Include New Flux-Cored Wire Applications* por Canadian Metalworking, 2023.

1.3.3. Gas de protección más usados para proceso GMAW, FCAW y FCAW-HYPERFILL

Durante un proceso de soldeo, cuando el metal fundido entra en contacto con el aire tiende a formar óxidos y nitruros, los cuales son contaminantes para la junta soldada. A consecuencia de ello y si no se emplea un gas de protección, se pueden presentar inclusiones de escoria, porosidades y fragilización en la unión soldada que pueden afectar negativamente las propiedades mecánicas. Por ello mismo se dice que la función principal de los gases de protección en soldadura es la proteger el baño de fusión de la atmósfera oxidante mientras se lleva a cabo el proceso de soldeo.

Los gases que más se usan para procesos GMAW y FCAW y cuyos aportes no son autoprotegidos son los gases C1 (gas 100% CO₂), gases M21 (mezcla Ar/CO₂ al 80/20 o 75/25), gases M20 (mezcla Ar/CO₂ al 90/10), o I1 (100% gas Argón) para aceros al carbono.

1.3.3.1. Tipos de juntas

El código de soldadura AWS A3.0:2020 define 5 tipos de juntas para los distintos tipos de materiales a soldar. Estas se muestran en la Figura 10. Para calificación de procedimiento de soldadura se usa principalmente la soldadura de Junta a Tope.

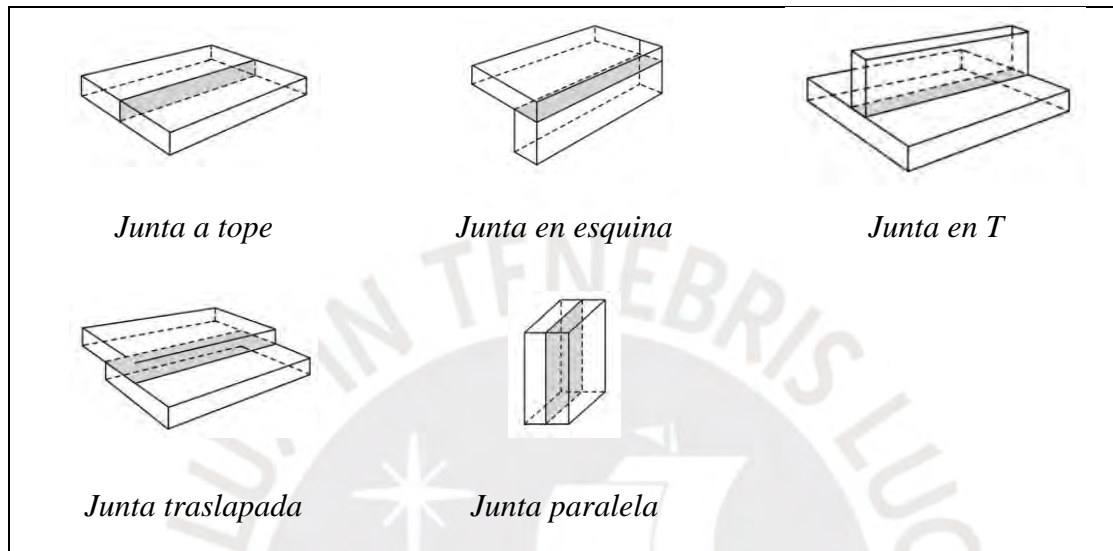


Figura 10. Tipos de juntas en soldadura

Nota. Tomado de *Standard Welding Terms and Definitions including Terms of Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting and Thermal Spraying* (p. 82), por AWS, 2020.

1.3.3.2. Posiciones de soldadura

La posición de soldadura es la posición relativa entre el baño de fusión, los elementos a soldar y la fuente de calor durante el soldeo. El presente estudio solamente se tomará como referencia lo especificado para soldadura de ranura y no soldadura en filete.

A continuación, la Tabla 8 especifica los valores de inclinación y rotación a contemplar durante el soldeo para que una soldadura pueda ser categorizada como junta soldada en posición plana, horizontal o vertical. Asimismo, los mismos valores de la Tabla 8 se pueden observar de manera dinámica en un gráfico donde se pueden observar las posiciones relativas de los cordones de soldadura para soldadura de ranura (ver Figura 11).

Tabla 8

Tabla de posiciones de soldadura para soldadura de ranura

Soldadura de ranura			
Posición	Diagrama de Referencia	Inclinación del eje	Rotación de cara
Plana (F)	A	0° a 15°	150° a 210°
Horizontal (H)	B	0° a 15°	80° a 150° 210° a 280°
Sobrecabeza (OH)	C	0° a 80°	0° a 80° 280° a 360°
Vertical (V)	D	15° a 80°	80° a 280°
	E	80° a 90°	0° a 360°

Nota: Tomado de *Código de Soldadura Estructural – Acero* (p. 160), por AWS, 2020

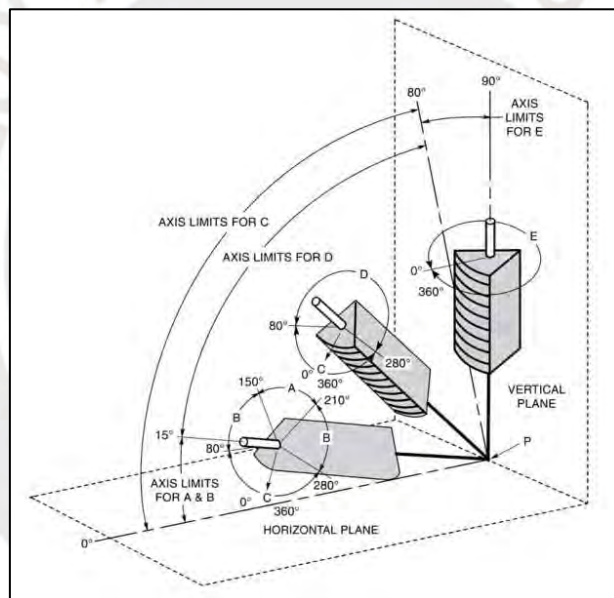


Figura 11. Posición relativa de los cordones de soldadura para soldadura de ranura.

Nota. Tomado de *Standard Welding Terms and Definitions including Terms of Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting and Thermal Spraying* (p. 102), por AWS, 2020

1.3.3.3. Posiciones de prueba de soldadura

Según lo especificado en la AWS A3.0:2020, la posición de prueba es la orientación de la unión para una prueba de calificación de soldador. Para el presente estudio la prueba de calificación de soldador 3G vertical ascendente (ver Figura 12).

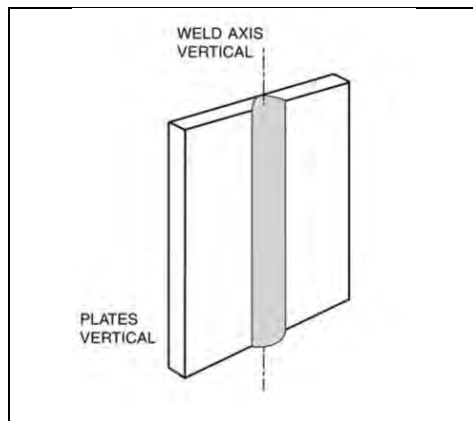


Figura 12. Posición de prueba de soldadura 3G

Nota. Tomado de *Standard Welding Terms and Definitions including Terms of Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting and Thermal Spraying* (p. 105), por AWS, 2020

1.4. Códigos de soldadura para calificación de procedimientos y calificación de soldadores

Los códigos de soldadura son un conjunto de prácticas y recomendaciones relacionadas de soldadura que permiten a un fabricante que sigue dichas prácticas y recomendaciones garantizar un mínimo estándar calidad de una unión soldada o proceso de soldadura a ejecutar. Los códigos de soldadura más conocidos se detallan a continuación, cuyo uso depende del tipo de producto y aplicación a utilizar.

- a. AWS B2.1/B2.1M:2014 – Especificación para la calificación de procedimiento y del desempeño de la soldadura.
- b. AWS D1.1/D1.1M:2020 – Código de soldadura estructural – Acero.
- c. AWS D1.4/D1.4M:2018 – Código de soldadura estructural – Acero de refuerzo.
- d. AWS D1.5/D1.5M:2020 – Código de soldadura para puentes.
- e. AWS D1.6/D1.6M:2017 – Código de soldadura estructural – Acero inoxidable.
- f. AWS D14.3/D14.3 – Especificación para la soldadura de equipos de movimiento de tierras, construcción, agricultura y materiales para manipulación de tierra.
- g. API 1104:2021 – Soldadura de tuberías e instalaciones relacionadas.

- h. ASME B31.3 – Tuberías de proceso.
- i. ASME SECCIÓN IX – Calificaciones estándar para procesos de soldadura, brazing, fuzing: soldadores y operadores.

El código de soldadura API 1104 contempla soldaduras cuyas aplicaciones son netamente para compresión, transporte y bombeo de hidrocarburos, gases combustibles, dióxido de carbono y nitrógeno. El código de soldadura ASME B31.3 describe diseño, materiales, fabricación y pruebas/inspección de tuberías de procesos, incluyendo aquellas donde se emplea de fluido agua.

Por otro lado, los códigos de soldadura AWS se utilizan para la calificación de procedimiento de soldadura y calificación de soldadores dependiendo del uso de los componentes, siendo los códigos AWS D1.1/D1.1M, AWS D14.3/D14.3M y AWS B2.1/B2.1M los de mayor interés para la presente tesis. Mientras que el alcance del código AWS D1.1/D1.1M restringe o limita su uso a la aplicación de aceros para fabricación y montaje de estructuras metálicas hasta con un esfuerzo de fluencia mínimo de 690 MPa, el código AWS D14.3/D14.3M restringe su uso para soldadura de fabricación y reparación para equipos de construcción, agricultura y movimiento de tierras con aceros estructurales, aceros fundidos y fundiciones y metales no ferrosos que sean identificados al menos por una especificación. Por otra parte, el código AWS B2.1/B2.1M para la calificación de procedimiento de soldadura no tiene esa limitante de la aplicación ni de la resistencia del material base a soldar, siempre y cuando la soldadura cumpla con los criterios de aceptación de los ensayos correspondientes, además de que ambos códigos AWS D1.1 y AWS D14.3 aceptan el uso de procedimientos de soldadura calificados y aprobados según la AWS B2.1 que es de uso más general. Por este motivo, se seleccionará el código AWS B2.1 puesto que, en caso de lograr la calificación de procedimientos de soldadura, la validez del documento aplicará para uso de estructuras metálicas y soldadura de equipos de movimiento de tierras usados en minería.

1.4.1. Identificación y selección de variables esenciales para proceso FCAW según AWS B2.1:2014

A continuación, se detallan las variables esenciales a utilizar en el proceso FCAW y FCAW-Hyperfill. Se indica con una “(T)” todas las variables esenciales requeridas para requerimientos de tenacidad a la fractura.

1.4.1.1. Diseño de junta

- Cambio de soldadura de filete a canal.

1.4.1.2. Metal base

- Cambio de espesor del material base fuera del rango límite de calificación.
- Cambio de un material base no enlistado a otro material base no enlistado o a un material enlistado o viceversa.

1.4.1.3. Metal de aporte

- Cambio de un F-Number a cualquier otro F-Number o a un alambre no enlistado.
- Cambio de un número A-Number a otro A-Number para materiales ferrosos.
- (T) Cambio de especificación y clasificación AWS de alambre de soldadura.
- Cambio en un alambre de soldadura cuya nueva resistencia excede 10 KSI o 69 MPa a la anterior o el cambio a un alambre con una resistencia menor a la resistencia a la tracción mínima especificada del material base.
- (T) La adición o eliminación de alambre de soldadura suplementario (polvo o alambre) o un cambio en el 10% de la cantidad.

1.4.1.4. Posición de soldadura

- (T) Cambio de cualquier posición a la posición vertical ascendente. La progresión vertical ascendente califica para cualquier posición.

1.4.1.5. Temperatura de precalentamiento

- Disminución del precalentamiento en más de 38°C del que se empleó para calificación.
- (T) Un incremento de más de 38°C en la temperatura máxima de interfase registrada en el PQR.

1.4.1.6. Gas de protección

- Adición o disminución de gas de protección.
- Cambio de la composición nominal especificada del gas de protección.

1.4.1.7. Parámetros eléctricos

- (T) Incremento del heat input. Se tomará de referencia lo registrado en el PQR.

1.4.1.8. Otras variables de soldadura

- Cambio en el proceso de soldadura.
- Cambio de técnica de soldeo de recta a oscilante para soldadura vertical ascendente.

1.5. Cálculos de costos de soldadura

Se tomará como referencia las fórmulas del AWS WELDING HANDBOOK Capítulo 8 – Economía de la soldadura y corte. A continuación, se definen los distintos tipos de costos asociados a un proceso de soldadura.

- **Costo de gas por unidad de peso de metal depositado C_{gas}**

$$C_{gas} \left(\frac{\$}{kg} \right) = \frac{G * F}{D} \quad (5)$$

Siendo:

G: Costo del gas por unidad de volumen ($\$/m^3$)

F: Caudal del gas (m^3/h)

D: Tasa de deposición (kg/h)

- **Costo de energía por unidad de peso de metal depositado C_{power}**

$$C_{power} \left(\frac{\$}{kg} \right) = \frac{P * V * A}{1000 * D} \quad (6)$$

Siendo:

P: Costo de energía (\$/kWh)

V: Voltaje (V)

A: Amperaje (A)

D: Tasa de deposición (Kg/h)

- **Costo de material de aporte por unidad de peso de metal depositado $C_{material}$**

$$C_{mat} \left(\frac{\$}{kg} \right) = \frac{M}{E} \quad (7)$$

Siendo:

M: Costo de materiales (\$/kg)

E: Eficiencia de deposición (%)

- **Costo de mano de obra por unidad de peso de metal depositado C_{labor}**

$$C_{labor} \left(\frac{\$}{kg} \right) = \frac{L * K}{D * 100} \quad (8)$$

Siendo:

L: Costo hora de operario (\$/h)

K: Factor de operación (%)

D: Tasa de deposición (kg/h)

- **Costos generales por unidad de peso de metal depositado C_{oh}**

Los costos generales son todos los costos que no pueden asignarse directamente al trabajo de soldadura. Estos costos contemplan herramientas de soldadura, consumibles como puntas de contacto y toberas y EPPs.

$$Coh \left(\frac{\$}{kg} \right) = \frac{O}{D * \left(\frac{K}{100} \right)} \quad (9)$$

Siendo:

O: Costo general horario (\$/h)

K: Factor de operación (%)

D: Tasa de deposición (kg/h)

- **Costos total de soldadura por unidad de peso de metal depositado (\$/kg)**

$$C_{tot.kg} \left(\frac{\$}{kg} \right) = C_{gas} + C_{power} + C_{mat} + C_{labor} + C_{oh} \quad (10)$$

- **Costos total de soldadura (\$)**

$$C_{tot}(\$) = C_{tot.kg} * S * N * \rho \quad (11)$$

Siendo:

S: Área de la sección transversal de la soldadura (mm²)

N: Longitud total de soldadura (mm)

ρ : Densidad del acero (7850 kg/m³)

- **Área de la sección transversal de la soldadura para diseño de junta a tope con bisel en V (S)**

El valor del área transversal de soldadura a utilizar depende del diseño de junta utilizado en el material: si la junta tiene talón ya sea de 1, 2 o 3 mm o si su diseño no tiene talón. A manera ilustrativa, La Tabla 9 especifica los valores en base a una junta de ángulo de ranura de 60° con bisel en V con talón en 0 mm (ver Figura 13) ya que este es el caso en el que existe mayor cantidad de metal depositado en la junta soldada.

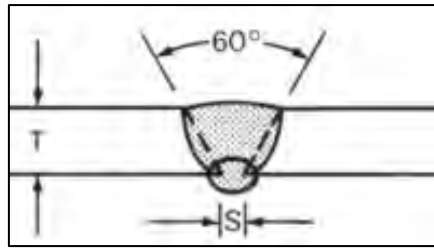


Figura 13. Junta a tope con bisel en V sin talón

Nota. Tomado de *Welding Handbook Volume 1 – Welding and Cutting Science and Technology* (p. 424) por AWS, 2018

Tabla 9

Área de soldadura en mm² para una junta a tope con bisel en V sin talón

Espesor (pulg)	Raíz (mm)	Talón (mm)	Sección de soldadura (mm ²)	Peso por metro (kg/m)
1/4	1/16	0	33.36	0.26
5/16	3/32	0	55.28	0.43
3/8	1/8	0	82.62	0.65
1/2	1/8	0	133.44	1.05
5/8	1/8	0	195.90	1.54
3/4	1/8	0	270.01	2.12
1	1/8	0	453.13	3.56

Nota. Valores extraídos de *Welding Handbook Volume 1 – Welding and Cutting Science and Technology* (p. 424) por AWS, 2018

1.6. Ensayos no destructivos (END)

Los ensayos destructivos se emplean para poder identificar la presencia o ausencia de discontinuidades y defectos dentro y fuera de un material. Se emplean principalmente como herramientas de Control de Calidad o Mantenimiento en componentes mecánicos. Los ensayos más empleados en soldadura son: Inspección Visual (VT), Tintes Penetrantes (PT), Partículas

Magnéticas (MT), Radiografía Industrial (RT) y ultrasonido (UT) de las cuales se describirán a detalle las (04) primeras.

1.6.1. Inspección Visual

La técnica de la inspección visual es aplicada directamente con el ojo humano de una persona que cumple el rol de inspector. Es una técnica de bajo costo que permite evaluar rápidamente un material en búsqueda de discontinuidades superficiales.

1.6.2. Tintes penetrantes

La técnica de tintes penetrantes tiene por objetivo la búsqueda de discontinuidades abiertas a la superficie en un material. Esta por aplicación de un líquido auxiliar llamado tinte penetrante permite que el líquido penetre en las discontinuidades las cuales, con ayuda de un insumo llamado revelador, permiten al inspector identificar aquellas que concentran mayor parte de penetrante en ellas. La aplicación de tintes tiene dos principales usos: 1) Identificar discontinuidades que por tamaño y forma no han podido ser identificadas en un proceso anterior de Inspección Visual. 2) Se emplea para confirmar y evaluar la extensión de una discontinuidad identificada por inspección visual previamente. En la Figura 14 se puede ver un ejemplo de la aplicación de los tintes penetrantes en el que el mismo tinte ha ingresado a las discontinuidades de la superficie exterior de una brida welding neck.

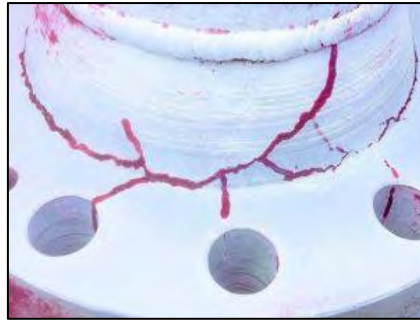


Figura 14. Brida con grietas detectadas por tintes penetrantes

Nota. Tomado de *Capítulo 1: Introducción a los líquidos penetrantes*, por Academia Testek

1.6.3. Partículas magnéticas

El ensayo de partículas magnéticas es un ensayo no destructivo que permite identificar y detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. El principio de funcionamiento del método funciona aplicando un campo magnético en el material. Si un material presenta alguna discontinuidad, alrededor de esta se acumularán fugas de campo magnético que tratarán de bordear la discontinuidad. Si a ello se le aplica polvo ferromagnético este se acumulará sobre dichas fugas de campo magnético, pudiendo revelar la discontinuidad al inspector (ver Figura 15). Esta técnica se utiliza tanto para detectar discontinuidades o defectos producto de fabricación/manufactura como producto del servicio de un componente, principalmente fisuras superficiales o subsuperficiales.

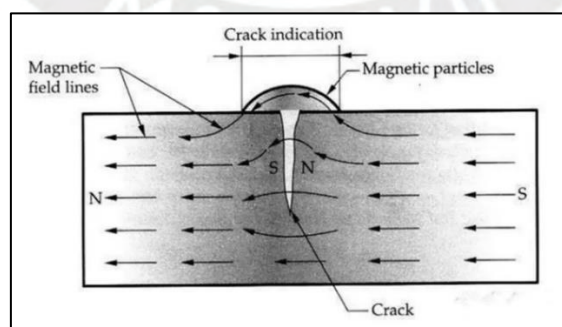


Figura 15. Esquema de partículas magnéticas.

Nota. Tomado de *Introduce Magnetic particle Inspection (MPI) of Non-destructive testing (NDT)* por Fushun Special Steel, 2020.

1.6.4. Radiografía industrial

La radiografía industrial es un ensayo no destructivo empleado para inspección de la macroestructura interna de un material, pieza o componente. Se dice que es una técnica volumétrica ya que permite revelar indicaciones que se encuentre dentro de un material específico.

El ensayo de radiografía industrial requiere de (03) elementos para poder ser ejecutada:

a) Una fuente ionizante, que puede ser una fuente de rayos gamma o rayos X b) Un cuerpo opaco, que vendría a ser el material a ser inspeccionado y c) Un sensor. En este último punto se suelen utilizar placas radiográficas que dentro de su composición presentan haluros de plata que reaccionan a la exposición de los rayos X o rayos gamma y que, después de un procesamiento posterior a la ejecución del ensayo, permiten registrar y revelar las indicaciones producidas por los disparos de radiación. Dependiendo de la densidad del cuerpo opaco, los haluros son expuestos a más o menos radiación y dicho efecto se verá plasmado en la película radiográfica: zonas de mayor densidad absorben más los rayos X o gamma (y en la película se verán más opacas) mientras que zonas de menor densidad absorben una menor cantidad (y se observarán de forma más clara en la película). En la Figura 16 se pueden apreciar placas radiográficas tomadas a cordones de soldadura que presentaron discontinuidades en el propio cordón de soldadura.

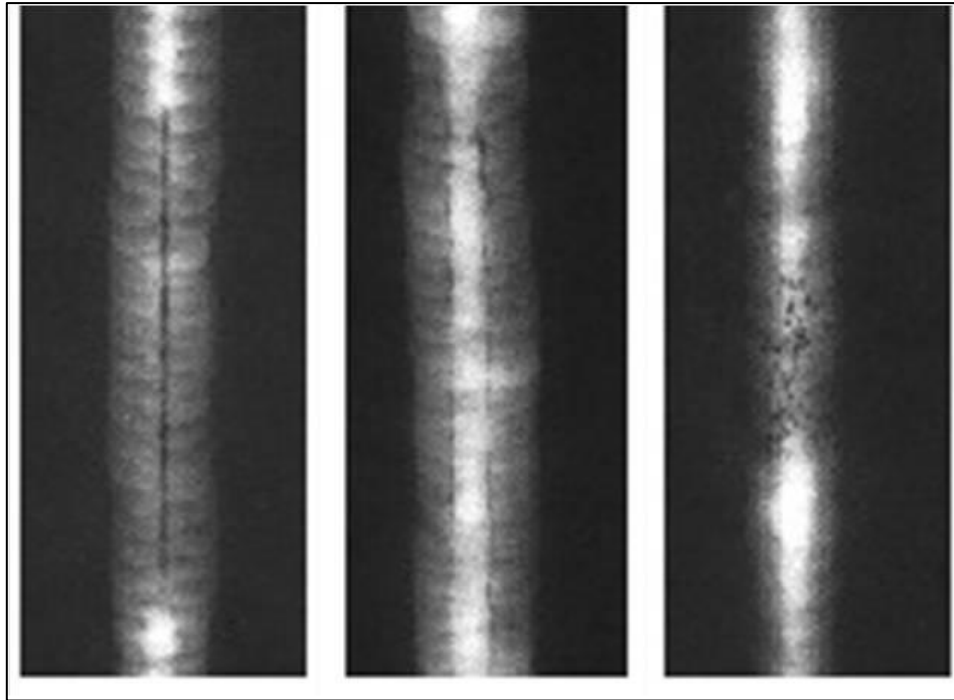


Figura 16. Placas radiográficas de cordones de soldadura, cada una con indicaciones

Nota. Tomado de *Radiografía industrial – RT* por Blumer

1.7. Ensayos destructivos

Los ensayos destructivos más conocidos como son ensayo de tracción e impacto se utilizan para obtener los valores de resistencia a la tracción, esfuerzo de fluencia, elongación y energía absorbida. Para el caso de ensayos de doblado, se emplean principalmente para evaluar la sanidad de una unión soldada siendo evaluada con los criterios de aceptación de un código de soldadura determinado.

1.7.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es un ensayo destructivo que permite obtener las propiedades mecánicas de un material (esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción, ductilidad). Para lograr ello, se emplea como insumo una probeta con dimensiones predeterminadas según normativa y esta se somete a cargas de tracción lentas. A medida que se incrementa la carga, la elongación

presentada en la probeta aumentará hasta llegar a un punto donde se genera la ruptura o falla del material

Las máquinas de ensayo tracción durante todo el ensayo permiten registrar los valores de Carga-Elongación y estos son graficados analógicamente o digitalmente una curva correspondiente. Cabe resaltar que estos valores dependen de la forma inicial de la probeta (a mayor sección transversal de probeta, se requerirá una mayor carga). Por ello, para obtener las propiedades que no dependen de la forma o geometría del material a partir de una curva de carga-elongación se construyen las curvas de esfuerzo-deformación como la presentada en la Figura 17. Para su cálculo, se emplean las fórmulas indicadas a continuación.

El cálculo del límite de elasticidad o esfuerzo de fluencia será definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_o} \quad (12)$$

Siendo:

σ_f Límite elástico, en N/mm²

F_f Carga de fluencia

A_o Área inicial

El cálculo de la resistencia a la tracción será definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma_b = \frac{F_{max}}{A_o} \quad (13)$$

Siendo:

σ_b Resistencia a la tracción, en N/mm²

F_{max} Carga máxima, en N

A_o Área inicial, en mm²

La elongación del material será calculada de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (14)$$

Siendo:

ε Elongación

L_f Longitud final de separación de marcas en la probeta

L_0 Longitud inicial de separación de marcas

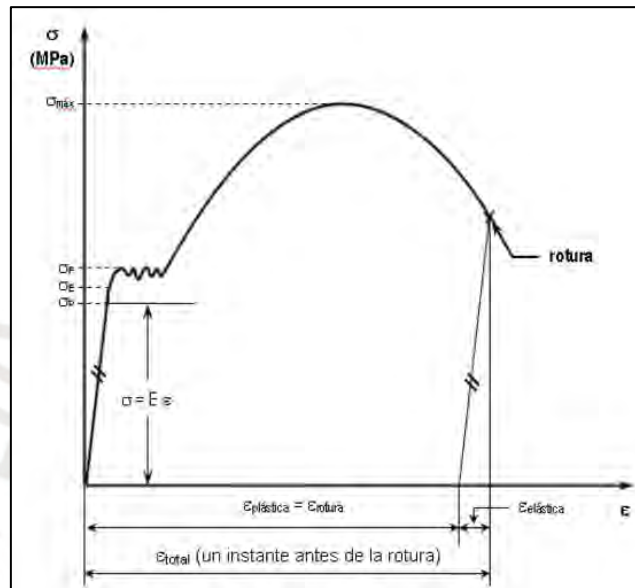


Figura 17. Curva de esfuerzo vs deformación de algunos aceros.

Nota. Tomado de *Diplomatura de Estudio de Fundamentos de análisis de falla en componentes mecánicos. Tema 2: Ensayos de Materiales* (p.15), por Lean P., 2024

1.7.2. Ensayo de impacto Charpy-V

El ensayo de impacto Charpy-V se emplea para obtener el valor de energía absorbida de impacto cuando a una probeta con una entalla en forma de V dispuesta la entalla en posición vertical es sometida a una carga de impacto a través de un péndulo con una masa “m” conocida. Para ejecutar el ensayo, la masa “m” del péndulo es posicionada a una altura “h1” conocida. Una vez que se suelta la masa de su posición, el péndulo impactará a la probeta y la masa alcanzará una altura h2 final menor a la altura h1. Para obtener el valor de energía absorbida

total se realiza una diferencia de cálculo de la energía potencial correspondiente a las alturas h_1 y h_2 . El esquema del ensayo se muestra en la Figura 18.

Este ensayo puede realizarse a distintas temperaturas a fin de poder revisar el comportamiento dúctil o frágil de un acero con matriz ferrítica y que presenta temperatura de transición.

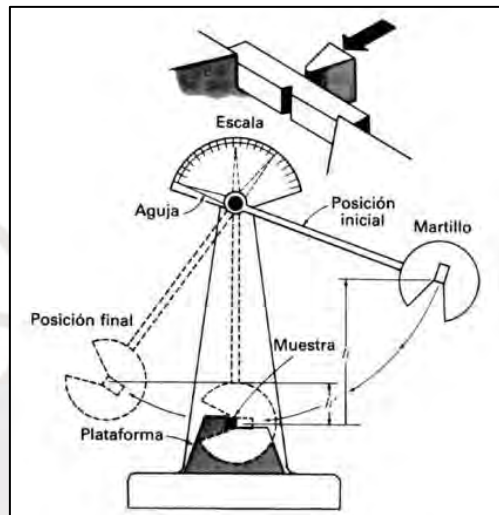


Figura 18. Esquema de ensayo de impacto Charpy-V y disposición espacial de la entalla de la probeta de impacto.

Nota. Tomado de *Diplomatura de Estudio de Fundamentos de análisis de falla en componentes mecánicos. Tema 2: Ensayos de Materiales* (p.38), por Lean P., 2024

1.7.3. Ensayo de doblado

El ensayo de doblado es un ensayo destructivo que permite evaluar la sanidad de una unión soldada. El código de soldadura AWS B4.0 así como los códigos AWS B2.1 y AWS D1.1 especifican que para evaluar la sanidad de una soldadura pueden emplearse ensayos de 1) doblado de cara 2) doblado de raíz 3) doblado transversal. Dependiendo del espesor del cupón de soldadura se realizan o A) doblado de cara + doblado de raíz o B) doblado transversal.

La prueba consiste en realizar el doblado de una probeta con dimensiones predeterminadas. Estas se colocan sobre una matriz o guía con rodillos como los que se

muestran en la Figura 19 . Para el doblado de cara, la cara de soldadura debe de ubicarse exterior al punzón o rodillo ya que será la zona que presente más deformación plástica. De igual forma, para el doblado de raíz, la raíz de la probeta debe de posicionarse exteriormente al punzón o rodillo.



Figura 19. *Doblado de probeta de soldadura mediante punzón y guía con rodillos*

Nota. Tomado de Laboratorio de Ensayos, por Eddytronic

1.7.4. Ensayo de dureza

La dureza es la propiedad mecánica de los materiales que indica la resistencia a la cual un material se opone a ser penetrado, o rayado, por otro material más duro. Esta propiedad permite revelar indirectamente qué tan resistente es un acero respecto de otro. En soldadura, la dureza también permite dar una idea de la susceptibilidad del material a la fisuración en frío.

Para medir la dureza de un acero, se pueden emplear ensayos Brinell, Rockwell y Vickers, siendo Vickers el más recomendado para metales y aleaciones de mayor dureza y resistencia.

1.7.4.1. Dureza Rockwell

La dureza Rockwell determina la dureza de un metal en relación a la profundidad a la que penetra un indentador. Rockwell presenta dos escalas de medición: Rockwell B y Rockwell

C las cuales usan indentadores de Billa de acero de 1/16” y un cono de diamante respectivamente. La escala de dureza Rockwell B presenta menor dureza que la Rockwell C por lo que para materiales de alta dureza se debe realizar la medición directamente en escala Rockwell C. El ensayo se encuentra estandarizado por ASTM bajo la norma ASTM E18. A su vez, se puede ver un esquema del ensayo Figura 20 en el que se observa el uso de un indentador cónico de diamante característico del ensayo Rockwell C.

Las condiciones de ensayo para Rockwell B (HRB) y Rockwell C (HRC) como precarga inicial, carga mayor y carga total así como el cálculo de la dureza varían (ver Tabla 10). A continuación, se muestra la diferencia entre dichos valores.

La dureza Rockwell teórica se puede calcular en relación de la profundidad de penetración “hf” (ver ecuaciones 15 y 16). No obstante, esta se puede medir en el dial de la máquina directamente. A continuación, se muestran las ecuaciones que se emplean para el cálculo de la dureza HRB o HRC en relación a la profundidad de penetración

Tabla 10

Condiciones de ensayo para ensayo de dureza Rockwell

Escala	Indentador	Pre-carga (kg-f)	Carga mayor (kg-f)	Carga total (kg-f)	Rango teórico de escala	Validez de la escala
B	Billa de acero de 1/16”	10	90	100	0-130	28-94
C	Cono de diamante	10	140	150	0-100	20-70

Nota. Tomado de *Diplomatura de Estudio de Fundamentos de análisis de falla en componentes mecánicos. Tema 2: Ensayos de Materiales* (p.30-31), por Lean P., 2024

$$HRB = 130 - \frac{hf(mm)}{0,002} \quad (15)$$

$$HRC = 100 - \frac{hf(mm)}{0,002} \quad (16)$$

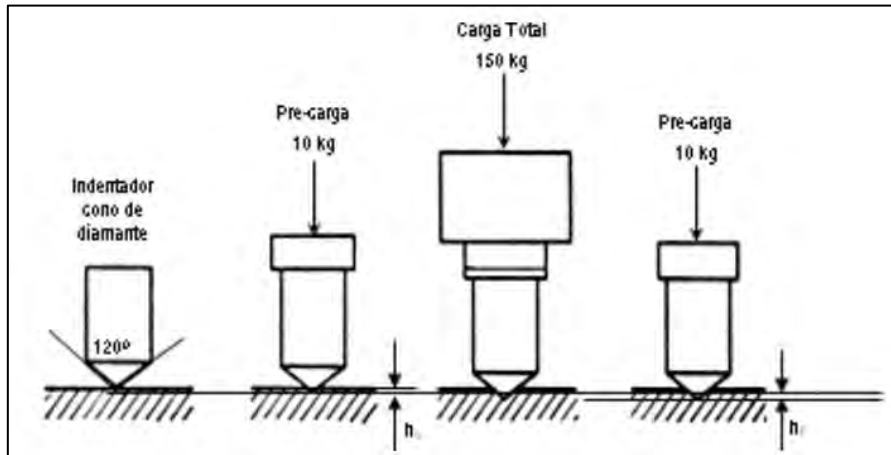


Figura 20. Esquema de ensayo de dureza Rockwell C

Nota. Tomado de *Diplomatura de Estudio de Fundamentos de análisis de falla en componentes mecánicos. Tema 2: Ensayos de Materiales* (p.31), por Lean P., 2024

1.7.4.2. Dureza Vickers

La dureza Vickers (HV) se mide en función de la relación entre la carga aplicada en un acero versus la huella que deja un indentador en forma de pirámide cuadrangular de forma conocida (ver Figura 21). Para materiales metálicos, el ensayo de dureza Vickers está estandarizada bajo la norma ASTM E92.

El ensayo de dureza Vickers utiliza cargas de entre 1kg-f a 120 kg-f aplicadas de entre 10 a 15 segundos (tiempo de aplicación de carga estándar). Se puede obtener valores de dureza independientes de la carga aplicada a partir de los 5 kg-f siendo 30 kg-f el valor mínimo más aplicado en ensayos de dureza Vickers.

Para el cálculo de la dureza HV, se define la siguiente fórmula. El valor de “d” es el promedio de la medición de las diagonales de la huella que deja el indentador en el material.

$$HV = \frac{F}{S} = 1.18544 * \frac{F (kg)}{d^2 (mm^2)} \quad (17)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (18)$$

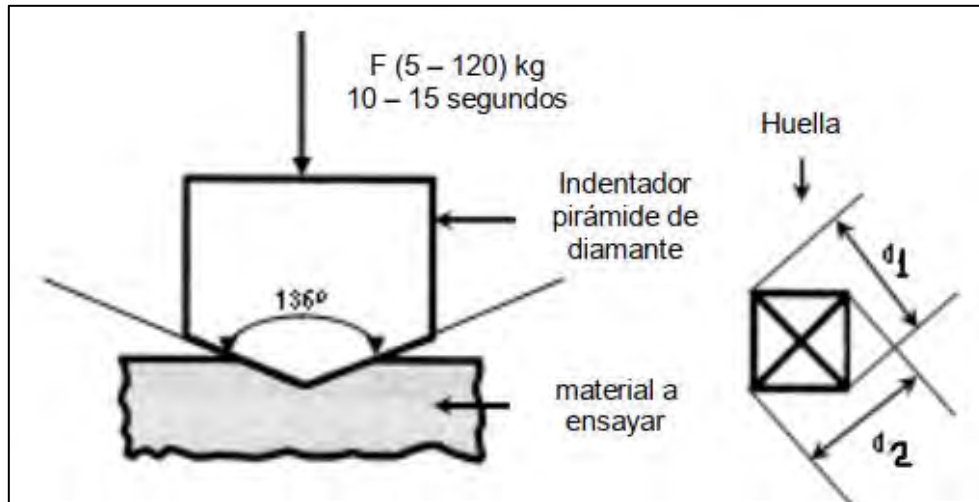


Figura 21. Esquema de ensayo de dureza Vickers

Nota. Tomado de *Diplomatura de Estudio de Fundamentos de análisis de falla en componentes mecánicos. Tema 2: Ensayos de Materiales* (p.33), por Lean P., 2024

CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El presente capítulo desarrolla la metodología para la ejecución del procedimiento experimental tanto para (1) la caracterización del material base como para (2) la calificación de los procedimientos de soldadura a realizar.

2.1. Metodología para caracterización de material base

Para caracterizar el material base, se realizarán ensayos mecánicos (tracción, dureza, impacto) así como macrografía y análisis químico. La cantidad de ensayos se especifica en la Tabla 11.

Tabla 11

Cantidad de ensayos para caracterización de material base

Descripción	Cantidad de ensayos	Norma a aplicar	Observación
Análisis químico	1	ASTM E415	---
Ensayo de Tracción	2	ASTM E8/E8M	---
Ensayo de dureza	3	ASTM E92	---
Impacto	*3	ASTM E23	(*) Por cada temperatura a ensayar
Macrografía	1	ASTM E3	---

2.1.1. Análisis químico

Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar

Se empleará un espectrómetro de emisión óptica marca Bruker modelo Magellan Q8 el cual también es utilizado en el Laboratorio a realizar ensayos (ver Figura 22 referencial).



Figura 22. *Espectrómetro Magellan Q8*

Nota. Tomado de *Espectrómetros de emisión óptica chispa – Q8 Magellan* por Proinstra s.a.

Elemento(s) a inspeccionar

El análisis químico en el acero S690QL fue realizado sobre una superficie preparada libre de óxido y grasas.

Procedimiento a utilizar

Se realizará la ejecución de la prueba según lo especificado por la norma ASTM E415-21 para la realización de espectrometría por emisión atómica por chispa. La superficie del acero será preparada usando lijas de carburo de silicio de número de 100, 240 y 320. Posterior a ello, sobre la superficie preparada se realiza el ensayo.

2.1.2. Macrografía

Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar

Se empleará un esteroscopio marca Leica S6D para la visualización desde 6.3x hasta 40x (ver Figura 23 referencial).



Figura 23. Esteroscopio Leica S6D

Nota. Tomado de *Leica S6D Stereo Zoom Microscope 6.3x - 40x* por Microscope Central

Elemento(s) a inspeccionar

La macrografía se realizará sobre la sección transversal de la plancha de acero.

Procedimiento a utilizar

Para las pruebas de análisis macrográfico se emplearán las normas ASTM E3-11 para la preparación de especímenes metalográficos según prácticas recomendadas y la norma ASTM E340 como práctica recomendada estándar para la ejecución del macroataque en metales. Las muestras serán preparadas mediante abrasión con lijas de carburo de silicio de grano 100, 240, 320, 400 y 600. Para el macroataque se empleará Nital al 5%. Por último, se revisará la macrografía en 10x aumentos.

2.1.3. Ensayo de tracción

Instrumento(s) utilizado(s)

Para la ejecución del ensayo se empleará una máquina de tracción ZWICK ROELL Z250 como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Máquina de tracción universal ZWICK ROELL Z250

Elemento(s) inspeccionado(s)

Las pruebas serán realizadas en el material base S690QL de suministro.

Procedimiento a utilizar

Para cada cupón de soldadura, se extraerán dos (02) probetas de tracción en sección reducida que deben cumplir geoméricamente con lo especificado según ASTM E8/E8M las cuales, al ser sometidas al ensayo, deberán cumplir con los criterios de aceptación. Las dimensiones deben cumplir con la Figura 25. Dimensiones conformes con la norma ASTM E8.

- La resistencia a la tracción de cada espécimen no deberá ser menor a la resistencia mínima especificada a la tracción del material base.

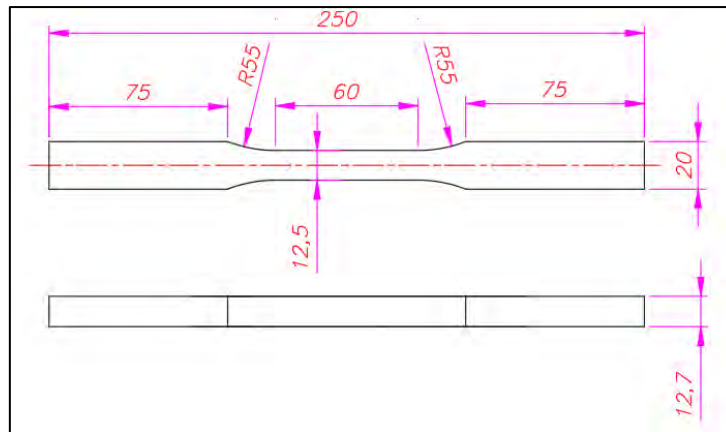


Figura 25 *Probeta de ensayo de tracción en sección reducida*

2.1.4. Ensayo de dureza

Instrumento(s) utilizado(s)

Para el ensayo de dureza se empleará un durómetro Rockwell marca Wilson Instruments serie RB2000 modelo 2002T (ver Figura 26) que permite realizar las indentaciones según el ensayo de dureza ASTM E18.

Elemento(s) inspeccionado(s)

Las pruebas serán realizadas en el material base S690QL de suministro. Se realizará sobre la cara superficial del material de una probeta con dimensiones como la que se muestra en la Figura 27.

Procedimiento a utilizar

El ensayo se realizará en conformidad con la norma ASTM E18. Se fabricará la muestra de acuerdo a plano y se preparará la superficie a ensayar quedando esta lisa y sin presencia de grasas, óxidos y virutas. Se harán mediciones de durezas de acuerdo a la norma ASTM E18 en la cara superficial de la probeta fabricada. Asimismo, las condiciones de ensayo a realizar serán las siguientes:

- Fuerza de precarga de 10 ± 0.2 kg-f

- Fuerza máxima de 150 ± 0.9 kg-f
- Velocidad de contacto de indentador máxima = 2.5 mm/s
- Condiciones ambientales de 20 a 25 °C



Figura 26. Durómetro Wilson Instruments serie RB2000 modelo 2002T

Nota. Tomado de Wilson Rockwell 2000 Automated Hardness Tester (rockwell-2000-auto) por Berg Engineering & Sales Company, INC,

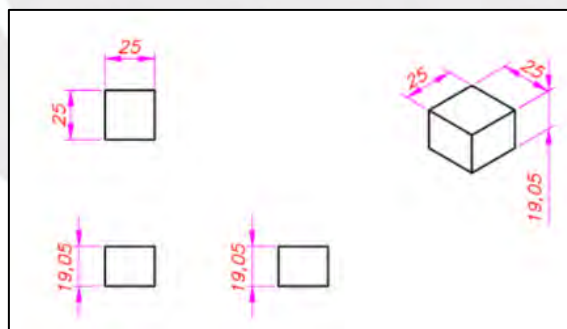


Figura 27. Probeta para ensayo de dureza

2.1.5. Ensayo de impacto

Instrumento(s) utilizado(s)

Para el ensayo de impacto se utilizará una máquina de impacto Zwick Roell RKP 450 como se aprecia en la Figura 28. Este equipo está en el Laboratorio de materiales y permite

realizar ensayos de impacto Charpy-V. Para pruebas a temperaturas bajo cero se empleará nitrógeno líquido conectado al equipo.

Elemento(s) inspeccionado(s)

Las pruebas serán realizadas en el material base S690QL de suministro.



Figura 28. Máquina Zwick Roell RKP 450.

Procedimiento a utilizar

Tanto la geometría de las probetas como el procedimiento experimental se ejecutarán en conformidad con lo especificado en la norma ASTM E23-22 así como se muestra en la Figura 29.

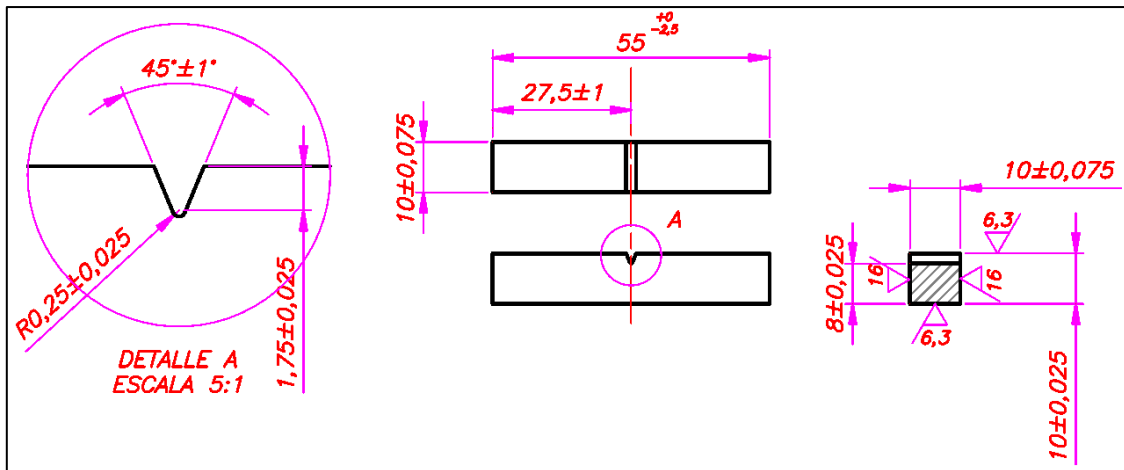


Figura 29. Probeta para ensayo de impacto Charpy-V

Se ensayarán probetas a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se llegará a las temperaturas inferiores a la temperatura ambiente utilizando nitrógeno líquido. Se esperará un tiempo menor a 1min30 para cada prueba, siendo el tiempo específico seteado por el equipo. Para cada temperatura ensayada, se realizarán 3 pruebas para poder conseguir un valor promedio de energía absorbida de impacto de cada temperatura. Por último, se graficará la curva S del material ensayado.

2.2. Metodología para la elaboración de registro de calificación de procedimiento de soldadura (PQR) según AWS B2.1

Según la AWS B2.1, para elaborar un PQR se tiene que realizar los siguientes pasos:

- Elaborar un WPS preliminar (pWPS) usando variables esenciales y no esenciales seleccionadas.
- Registrar todas las variables de soldadura de las pruebas de soldeo.
- Ejecutar los ensayos destructivos y no destructivos y adjuntar al documento los resultados de los ensayos que corresponda.

2.2.1. Cantidad de cupones de prueba a realizar para el pWPS

Se realizarán (02) cupones de soldadura para cada proceso de soldadura seleccionado: FCAW-G y FCAW-G HYPERFILL.

2.1.1. Definición de posición de soldadura para ambos procesos de soldadura

Cada cupón será soldado en posición vertical ascendente puesto que califica para posición plana y horizontal.

2.1.2. Diseño de junta

Las planchas para las pruebas presentan dimensiones generales de 600 x 180 mm de espesor de $\frac{3}{4}$ ". Las planchas apuntaladas cuentan con ranura en V con ángulo de mecanizado 30° cada una y con altura de talón de 0-3mm. Abertura de raíz de 3mm. La soldadura presentará un resanado o blanqueado de raíz "backgouging" para garantizar la sanidad de la soldadura. El diseño de junta se puede apreciar en la Figura 30. Cabe resaltar que el diseño de junta no emplea backing en la raíz y que el diseño de junta será el mismo para el proceso FCAW como FCAW-Hyperfill puesto que se pretende 1) comparar ambos procesos de soldadura ante condiciones experimentales similares y 2) probar ambas tecnologías ante la condición más crítica que se pueda presentarse en condiciones de producción reales. Asimismo, la condición de ausencia de backing es una variable esencial por lo que, si se consigue la calificación de procedimiento de soldadura sin backing, el procedimiento de soldadura a obtener WPS será válido para la condición de soldadura con backing.

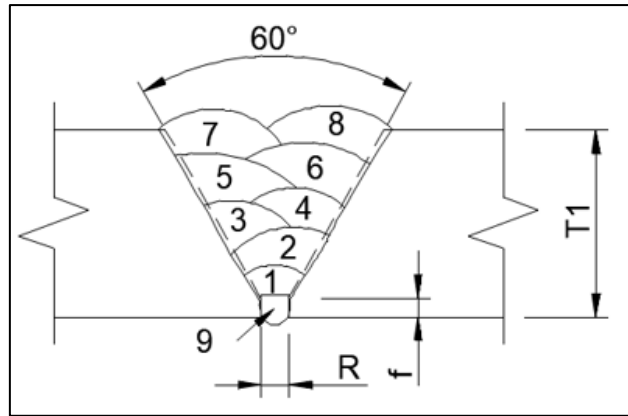


Figura 30. Diseño de junta en V simple para WPS

2.1.3. Selección de material de aporte para el pWPS

El material de aporte para ambas pruebas de soldeo será el alambre UltraCore® 111K3M-H Plus de diámetro 0.045” (1.14mm aprox.). La especificación técnica del alambre indica que se puede conseguir resistencia de 110 ksi (758 MPa) de resistencia a la tracción como mínimo y fluencia mínima de 98 ksi (675 MPa).

Para las pruebas se adquirieron dos alambres con número de lote Q2 Lot 19158078 cuyo certificado de calidad mostrado en la Tabla 12. Asimismo, la composición química del alambre se muestra en la Tabla 13.

Tabla 12

Propiedades mecánicas del alambre UltraCore 111K3M-H Plus c/ lote 19158078

Propiedad mecánica	E11T1-K3M-JH4 Según AWS A5.29	Resultados del lote soldado en un acero ASTM A514
Resistencia a la tracción MPa (KSI)	(110-130)	810 (117)
Resistencia a la fluencia (0.2%) MPa (KSI)	(98 mín.)	770 (111)
Elongación (%)	15 mín.	20
Energía absorbida de impacto @ -51°C Joules (lb-pie)	27 mín. (20 mín)	59-69 (44-51)

Tabla 13

Composición química del alambre UltraCore 111K3M-H Plus c/ lote 19158078 (peso %)

Elemento químico	E11T1-K3M-JH4 Según AWS A5.29	Resultados del lote
C	0.15 máx.	0.06
Mn	0.75 – 2.25	1.68
Si	0.80 máx.	0.33
S	0.030 máx.	0.011
P	0.030 máx.	0.008
Cr	0.15 máx.	0.04
Ni	1.25 – 2.60	2.14
Mo	0.25 – 0.65	0.39
V	0.05 máx.	0.00
B	No especificado	0.005

2.1.4. Selección de gas de protección para el pWPS

Se selecciona el gas de protección M20 que presenta mezcla Ar/CO₂ al 90/10 por su amplia disponibilidad en el sitio de pruebas. Asimismo, dicho gas tiene mejores beneficios de sanidad a diferencia del comercial M21 (gas con mezcla de Ar/CO₂ de 80/20) que al tener mayor proporción de Argón, gas inerte, la sanidad y resistencia de la unión se ve aumentada puesto que el CO₂ tiende a oxidar el cordón y disminuir ligeramente la resistencia.

2.1.5. Selección de temperatura de precalentamiento para el pWPS

Según el certificado de calidad, para conseguir los valores de resistencia mecánica especificados según el requerimiento de E111T1-K3M-JH4, el fabricante recomienda ejecutar una temperatura de precalentamiento de 135 °C a 162 °C. No obstante, la temperatura de precalentamiento mínima calculada en la presente sección según AWS D1.1/D1.1M:2020 es de 80 °C y según la norma EN 1011-2 son de 34.1 °C y de 17.8 °C para los procesos FCAW y

FCAW-Hyperfill respectivamente (se verá el desarrollo de ambos métodos AWS D1.1 y EN 1011-2 en los siguientes puntos de esta sección). Cabe resaltar que la temperatura obtenida según método de AWS D1.1 sólo considera la composición química, porcentaje de absorción de humedad del material de aporte y grado de embridamiento de la junta soldada, mas no el calor de aporte del proceso de soldadura como sí lo hace el método de la EN 1011-2. Es por ello mismo que para el pWPS se seleccionará una temperatura de precalentamiento ligeramente mayor a la máxima recomendada por el fabricante $T=175\text{ }^{\circ}\text{C}$ que sea compatible con ambos métodos de cálculo de temperatura de precalentamiento y compatible para ambos procesos de soldadura FCAW y FCAW-Hyperfill sin llegar a la temperatura de crecimiento de grano ($T=230\text{ }^{\circ}\text{C}$) a fin de evitar variaciones significativas de las propiedades mecánicas del material base.

2.1.5.1. Método AWS D1.1 – Determinación del método de la temperatura de precalentamiento

El código de soldadura AWS D1.1/D1.1M:2020 en su apéndice B indica que para definir el método 1) se debe identificar el tipo de junta a soldar (a tope o filete) y 2) se debe identificar la soldabilidad del acero a soldar según el carbono equivalente y carbono del material. La combinación de dichas variables de entrada, o inputs, dará como resultado la elección del método A (Control de durezas) o B (Control de Hidrógeno) para el cálculo de la temperatura de precalentamiento.

La norma indica que para uniones a filete se debe de elegir el método de control de durezas, mientras que para uniones a tope se puede usar el método de control de hidrógeno. Por este motivo, se elige el método de control de hidrógeno para calcular la temperatura de precalentamiento e interpase requeridos para ejecutar la soldadura.

2.1.5.2. Método AWS D1.1 – Paso 1 – Determinación de la composición química del material base

Para efectos de cálculo, se extrae los valores de la composición química del material base desarrollado en el Capítulo 3 del presente documento. Estos se muestran en la Tabla 14 mostrada a continuación.

Tabla 14

Composición química del material S690QL adquirido

Composición química del material									
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.138	1.033	0.009	0.0016	0.3006	0.585	0.206	0.198	0.014	0.001
Ti	V	Co	Al	W	Sn	Fe	B	N	Zr
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.019	0.008	0.0142	0.0647	0.0039	0.0014	97.348	0.0009	---	---

2.1.5.3. Método AWS D1.1 – Paso 2 – Cálculo del parámetro PCM

El parámetro PCM viene dado por la siguiente ecuación. Reemplazando los valores de elementos químicos obtenidos previamente, se obtiene que el parámetro PCM es de 0.25 (ver Tabla 15).

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + +5B \quad (19)$$

Tabla 15

Cálculo de parámetro PCM

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	
% E.A.	0.13	0.300	1.03	0.01	0.20	0.58	0.19	0.00	0.000	
	8	6	3	4	6	5	8	8	9	
Peso	1	30	20	20	60	20	15	10	0.2	SUMA
Peso parcial	0.14	0.01	0.05	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.25

2.1.5.4. Método AWS D1.1 – Paso 3 – Determinación del nivel de hidrógeno

Se asume nivel H2 de hidrogeno, ya que los alambres FCAW se usarán después de abrir su empaque.

2.1.5.5. Método AWS D1.1 – Paso 4 – Determinación del grupo de índice de susceptibilidad

Tomando en cuenta el parámetro PCM = 0.25 y nivel de hidrógeno H2, se define que el grupo de índice de susceptibilidad es “D” (ver Figura 31).

Nivel de hidrógeno, H	Índice de susceptibilidad ^a Agrupación ^b				
	Equivalente de carbono = P_{cm}				
	<0.18	<0.23	<0.28	<0.33	<0.38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Figura 31. Selección de grupo según índice de susceptibilidad según nivel de hidrógeno y parámetro PCM

Nota. Tomado de Código de Soldadura Estructural – Acero (p. 357), por AWS, 2020

2.1.5.6. Método AWS D1.1 – Paso 5 – Determinación de temperatura de precalentamiento mínima

Para un grado de restricción “Medio” (se usarán arriostres entre placas a soldar), grupo D y placas de 3/4”, la temperatura de precalentamiento y entre pasadas es 80°C como mínimo (ver Figura 32).

Tabla B.2 (continuación)								
Temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pasadas para tres niveles de restricción (ver B6.2.4)								
		Precalentamiento mínimo una temperatura entre pasadas (°C) ^a						
Nivel	Espesor ^b mm	Agrupación del índice de susceptibilidad						
		A	B	C	D	E	F	G
Bajo	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	150
	10-20 incl.	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	> 20–38 incl.	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	> 38–75 incl.	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150
Medio	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	70	140	160
	10-20 incl.	< 20	< 20	20	80	115	145	160
	> 20–38 incl.	20	20	75	110	140	150	160
	> 38–75 incl.	20	80	110	130	150	150	160
	> 75	95	120	140	150	160	160	160
Alto	< 10	< 20	< 20	20	40	110	150	160
	10-20 incl.	<20	20	65	105	140	160	160
	> 20–38 incl.	20	85	115	140	150	160	160
	> 38–75 incl.	115	130	150	150	160	160	160
	> 75	115	130	150	150	160	160	160

Figura 32. Temperaturas de precalentamiento a aplicar para espesores de 3/4” y 1” con un grado de restricción medio.

Nota. Tomado de *Código de Soldadura Estructural – Acero* (p. 357), por AWS, 2020 }

2.1.5.7. Método EN 1011-2 – Determinación de temperatura de precalentamiento mínima

El método de la norma EN 1011-2 para la determinación de la temperatura de precalentamiento las siguientes variables de entrada: a) composición química del material base, b) el espesor de las placas a soldar, c) el contenido de hidrógeno difusible en el material de aporte, d) el heat input del proceso de soldadura. Un incremento de las variables a, b y c

incrementan el riesgo de fisuración en frío, mientras que un incremento de la variable d lo disminuye.

2.1.5.8. Método EN 1011-2 – Paso 1 - Determinación de temperatura de precalentamiento dependiente de la composición química del material base

A diferencia del carbono equivalente propuesto por el IIW, la norma define un cálculo distinto para dicho valor. Este se muestra en la siguiente ecuación:

$$CE_{EN\ 1011-2} = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (20)$$

Reemplazando los valores del análisis químico obtenemos que $CE_{EN\ 1011-2} = 0.2962$.

$$CE_{EN\ 1011-2} = C + \frac{1.033 + 0.198}{10} + \frac{0.585 + 0.014}{20} + \frac{0.206}{40}$$

$$CE_{EN\ 1011-2} = 0.2962$$

Con el valor del carbono equivalente, se puede calcular la temperatura de precalentamiento mínima T_{pCET} que depende de la composición química, la cual se muestra a continuación en la siguiente ecuación:

$$T_{pCET} = 750 * CE_{EN\ 1011-2} - 150 \quad (21)$$

Resolviendo la ecuación, dicha temperatura nos resulta $T_{pCET} = 72.2\ ^\circ C$.

$$T_{pCET} = 750 * 0.2962 - 150$$

$$T_{pCET} = 72.2\ ^\circ C$$

2.1.5.9. Método EN 1011-2 – Paso 2 - Determinación de temperatura de precalentamiento dependiente del espesor del material a soldar

Se define la temperatura de precalentamiento que depende del espesor a soldar T_{pd} en la siguiente ecuación, siendo “ d ” el espesor a soldar en milímetros.

$$T_{pd} = 160 * \tan \left(\frac{d}{35} \right) - 110 \quad (22)$$

Reemplazando los valores obtenemos que $T_{pd} = 160 * \tan(19.05/35) - 110 = -30.6 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$T_{pd} = 160 * \tan \left(\frac{19.05}{35} \right) - 110$$

$$T_{pd} = -30.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Eso quiere decir que para el espesor de 19.05mm teóricamente si solamente se considera la geometría del material se requeriría de una temperatura mínima de precalentamiento de -30.6 °C.

2.1.5.10. Método EN 1011-2 – Paso 3 - Determinación de temperatura de precalentamiento dependiente del hidrógeno difusible del material de aporte

Se define la temperatura de precalentamiento que depende del porcentaje de hidrógeno difusible T_{pHD} en la Ecuación (23), siendo “HD” el contenido de hidrógeno difusible en ml/100g. Para extraer su valor, se revisó el certificado de calidad del alambre que nos brindó el fabricante (ver Anexo 1). El fabricante garantiza que su alambre, de HD de 2 ml/100g (H2) cumple con lo requerido según la norma de fabricación del material de aporte AWS A4.3 donde el requisito mínimo es de 4 ml/100g (H4). Como no hay garantía de que los siguientes lotes de aportes cumplan con nivel de hidrógeno de H2, se define el caso crítico de HD = 4 ml/100g que es el valor límite permitido por norma.

$$T_{pHD} = 62 * HD^{0.35} - 100 \quad (23)$$

Con estas consideraciones, obtenemos el valor de T_{pHD} para nivel de hidrógeno H4. No obstante, para fines informativos se calcula también para niveles de hidrógeno H2 y H8. Como se observa, para nivel H4 se requiere de 1°C como temperatura mínima de precalentamiento y a medida que el nivel de hidrógeno aumenta, también aumenta la temperatura requerida para evitar la fisuración en frío.

$$T_{pHD@H4} = 62 * 4^{0.35} - 100 = 0.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{pHD@H2} = 62 * 2^{0.35} - 100 = -21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{pHD@H8} = 62 * 8^{0.35} - 100 = 28.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.1.5.11. Método EN 1011-2 – Paso 4 - Determinación de temperatura de precalentamiento dependiente del heat input del proceso de soldadura

Se define la temperatura de precalentamiento que depende del porcentaje de hidrógeno difusible T_{pQ} en la Ecuación 24, siendo Q el valor de heat input del proceso de soldadura en kJ/mm.

$$T_{pQ} = (53 * CE_{EN 1011-2} - 32) * Q - 53 * CE_{EN 1011-2} + 32 \quad (24)$$

Vamos a asumir que el proceso FCAW nos da un heat input de 1.5 kJ/mm y el proceso FCAW-Hyperfill de hasta 3 kJ/mm. Con estas consideraciones, como resultados obtenemos

$$T_{pQ@FCAW} = (53 * 0.2962 - 32) * 1.5 - 53 * 0.2962 + 32 = -8.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{pQ@Hyperfill} = (53 * 0.2962 - 32) * 2.5 - 53 * 0.2962 + 32 = -24.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como se aprecia en los resultados, a mayor heat input se requiere de una menor temperatura de precalentamiento.

2.1.5.12. Método EN 1011-2 – Paso 5 - Determinación de temperatura de precalentamiento considerando temperaturas calculadas previamente

Se define la temperatura de precalentamiento total como T_p en la Ecuación (25),

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad (25)$$

Reemplazando los valores parciales calculados previamente obtenemos el valor de temperatura total.

$$T_p@FCAW = 72.2 - 30.6 + 0.7 - 8.2 = 34.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_p@Hyperfill = 72.2 - 30.6 + 0.7 - 24.5 = 17.8^\circ C$$

Como nota, se puede observar que la temperatura es baja ya que el valor de carbono equivalente que define la norma EN 1011-2 es menor que el que se obtendría si se aplicara el valor del carbono equivalente del IIW (ver Ecuación 1 y ver apartado 3.1. del presente documento). Si se considerara dicho valor de CE se obtiene lo siguiente:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CE = 0.138 + \frac{1.033}{6} + \frac{0.585 + 0.198 + 0.008}{5} + \frac{0.206 + 0.014}{15}$$

$$CE = 0.483$$

Asimismo, los valores de temperatura parciales con dicho valor también cambiarían

$$T_{pCET} = 750 * 0.483 - 150 = 212.3^\circ C$$

$$T_{pQ@FCAW} = (53 * 0.483 - 32) * 1.5 - 53 * 0.483 + 32 = -3.2^\circ C$$

$$T_{pQ@Hyperfill} = (53 * 0.483 - 32) * 2.5 - 53 * 0.483 + 32 = -32.6^\circ C$$

$$T_p@FCAW = 212.3 - 30.6 + 0.7 - 3.2 = 179.2^\circ C$$

$$T_p@Hyperfill = 212.3 - 30.6 + 0.7 - 32.6 = 149.8^\circ C$$

Como se puede apreciar, el resultado de temperatura de precalentamiento es afectado principalmente por el porcentaje de carbono equivalente obtenido. No obstante, se respetará el valor de CE que está definido según norma ya que la obtención de la temperatura final está estandarizada según este método. Las temperaturas finales para FCAW y FCAW-Hyperfill son de 34.1 °C y de 17.8 °C.

2.1.6. Selección de parámetros eléctricos para el pWPS

Los parámetros eléctricos cumplirán con lo mínimo indicado en el datasheet del alambre.

- Polaridad: CCEP (Corriente continua electrodo al positivo).
- Voltaje nominal = 20-26 V.
- Amperaje nominal = 140-250 A.
- Velocidad de avance = 10-25 cm/min.
- Velocidad de alimentación de alambre = 150 – 350 ipm.
- Distancia punta de contacto a zona de trabajo = 19 mm.
- Gas de protección = 20-25 LPM.

2.1.7. Selección de equipo de soldadura para todas las pruebas

La fuente de poder a utilizar es una Power Wave® S500 + módulo de refrigeración Cool Arc® 50 + Alimentador Power Feed 84 + Antorcha Magnum® PRO 500 (ver Figura 33).

A continuación, se muestran algunas características de la fuente de poder:

- Máquina multiproceso (SMAW, TIG, TIG pulsado, GMAW, GMAW pulsado, FCAW).
- Voltaje de entrada 3Ø: 200-600 V @ 50-60 Hz.
- Corriente de entrada 3Ø al 40% ciclo de trabajo: de 29 a 80 A.
- Corriente de entrada 3Ø al 100% ciclo de trabajo: de 21 a 60 A.
- Corriente de salida: 550 A - 41.5 V @ 40% ciclo de trabajo.
- Corriente de salida: 450 A – 36.5 V @ 40% ciclo de trabajo.



Figura 33. Fuente de poder Power Wave® S500 + módulo de refrigeración Cool Arc® 50

2.1.8. pWPS para el proceso FCAW-G Hyperfill

A continuación, se presenta el WPS preliminar para el proceso FCAW-G Hyperfill (ver Figura 34 y Figura 35).


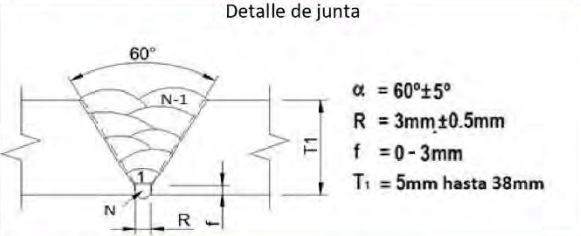

	CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PRELIMINAR (pWPS) SEGÚN AWS B2.1 2014		Código	pWPS-001			
			Revisión	0			
			Fecha	01/01/2025			
			Página	1 de 2			
Compañía	<u>PUCP</u>	Elaborado por:	<u>Oscar Carrera Escajadillo</u>				
Identificación WPS	<u>pWPS-001</u>	Fecha	<u>1/01/2025</u>				
N° de rev	<u>0</u>	Fecha de rev.	<u>1/01/2025</u>				
PQR de respaldo	<u>---</u>	Tipo (s)	<u>Semiautomático</u>				
Procesos de soldadura	<u>FCAW-G-HYPERFILL</u>	(Manual, Semiautomático, Mecanizado, Robotizado)					
Diseño de junta (según 4.13.1)							
Diseño de junta	<u>A tope en V simple</u>						
Respaldo	Si <input type="checkbox"/>	No <input checked="" type="checkbox"/>					
Material del respaldo	<u>N/A</u>						
Ángulo de junta a soldar	<u>60°</u>						
Altura de talón (f)	<u>0-3 mm</u>						
Resane de raíz	Si <input checked="" type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>					
Método de resane de raíz	<u>Amolado (Grinding)</u>						
Metales base (según 4.13.2)							
M-No.	<u>No enlistado</u>	Grupo No.	<u>No enlistado</u>	Soldado a M-No.	<u>No enlistado</u>	Grupo No.	<u>No enlistado</u>
Especificación tipo y grado	<u>EN 10025-6 S690QL</u>		Especificación tipo y grado		<u>EN 10025-6 S690QL</u>		
Rango de espesores del material base:	A tope	<u>3/16" a 2T (1 1/2")</u>	Filete	<u>---</u>			
Metal depositado:	A tope	<u>---</u>	Filete	<u>---</u>			
Rango de diámetro de tubería	A tope	<u>---</u>	Filete	<u>---</u>			
Resistencia a la tracción	<u>847.63 MPa</u>		Documento de ref.	<u>---</u>			
Resistencia mínima especificada a la tracción	<u>690 MPa</u>		Documento de ref.	<u>EN 10025-6</u>			
Análisis químico - documento de referencia	<u>MAT-Lab-4.123</u>		Rev	<u>1</u>	Fecha	<u>12/06/2024</u>	
Carbono equivalente CE	<u>0.39%</u>		Documento de ref.	<u>---</u>			
Material de aporte (según 4.13.3)							
Proceso de soldadura	<u>FCAW-G HYPERFILL</u>						
Especificación AWS	<u>AWS A5.29</u>						
Clasificación AWS	<u>E111T1-K3M-JH4</u>						
F-No.	<u>6</u>						
A-No.	<u>1</u>						
Diámetro metal de aporte	<u>.045" (1.1 mm)</u>						
Nombre comercial alambre	<u>UltraCore 111K3M-H Plus</u>						
Metal depositado	<u>20mm (3/4")</u>						
Nombre comercial fundente	<u>---</u>						
Inserto consumible	<u>---</u>						
Otro	<u>---</u>						
Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:					
Oscar Carrera Escajadillo	Oscar Carrera Escajadillo	Oscar Carrera Escajadillo					
Fecha: 01.01.2025	Fecha: 01.01.2025	Fecha: 01.01.2025					

Figura 34. WPS preliminar para el proceso FCAW-G Hyperfill. Primera página.

	ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PRELIMINAR (pWPS) SEGÚN AWS B2.1 2014	Código	pWPS-001
		Revisión	0
		Fecha	01/01/2025
		Página	2 de 2

Posición de soldadura (según 4.13.4)		Precalentamiento (según 4.13.5)	
Posición de soldadura a tope	<i>Vertical</i>	Temperatura de precalentamiento (Mín.)	<i>175 °C</i>
Posición de soldadura a filete	---	Temperatura de precalentamiento	<i>175 °C</i>
Progresión de soldadura	<i>Ascendente</i>	Temperatura de interpase (Máximo)	<i>230 °C</i>
PWHT (según 4.13.6)		Distancia de verificación precalentamiento	<i>Armado a 1"</i>
Temperatura	---		<i>Soldeo a 3"</i>
Tiempo	---		

Gas de protección (según 4.13.7)			
	Protección antorcha	Protección raíz - respaldo	Protección arrastre
Gases	<i>SG - M20</i>	---	---
Composición %	<i>90% Ar / 10% CO2</i>	---	---
Caudal	<i>20-25 LPM</i>	---	---

Características eléctricas (según 4.13.8)		Otras variables (según 4.13.9)	
Tipo de corriente / polaridad	<i>CCEP - DC - CV</i>	Tamaño de tobera	<i>Ø 5/8"</i>
Corriente pulsada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Collet body	---
Rango de amperaje	<i>VER TABLA 1</i>	Técnica:	Oscilante <input type="checkbox"/> Recta <input checked="" type="checkbox"/>
Rango de voltaje	<i>VER TABLA 1</i>	Método de limpieza	<i>Amolado (raíz - backgoughing)</i> <i>Escobillado (relleno + acabado)</i>
Rango de alimentación de alambre	<i>VER TABLA 1</i>	Número de electrodos / alambres	<i>1</i>
Tamaño / tipo electrodo tungsteno	<i>N/A</i>	Pasada única	<input type="checkbox"/> o Multipase <input checked="" type="checkbox"/>
Parámetros pulsados	---	Stickout electrico	<i>3/8" a 1/2"</i>
Modo de transferencia	<i>Globular</i>	Otros:	
Otros:		Otros:	

Tabla 1 - Parámetros de soldadura

Pase	Proceso	Metal de aporte		Parámetros eléctricos				Velocidad de avance (cm/min)	Heat input (KJ/mm)
		Clase AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)	Velocidad alim. Alambre (IPM)	Voltaje (V)		
<i>1</i>	<i>FCAW-G-HYPERFILL</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>150-220</i>	<i>150-250</i>	<i>21-23</i>	<i>10.0-15.0</i>	<i>2.40</i>
<i>2 a N-1</i>	<i>FCAW-G-HYPERFILL</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>200-250</i>	<i>150-250</i>	<i>21-25</i>	<i>15.0-25.0</i>	<i>2.00</i>
<i>N</i>	<i>FCAW-G-HYPERFILL</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>200-250</i>	<i>150-250</i>	<i>21-25</i>	<i>15.0-25.0</i>	<i>2.00</i>

Elaborado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 01.01.2025	Revisado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 01.01.2025	Aprobado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 01.01.2025	
--	---	---	---

Figura 35. WPS preliminar para el proceso FCAW-G Hyperfill. Segunda página.

2.1.9. pWPS para el proceso FCAW-G

A continuación, se presenta el WPS preliminar para el proceso FCAW-G (ver Figura 36 y Figura 37).


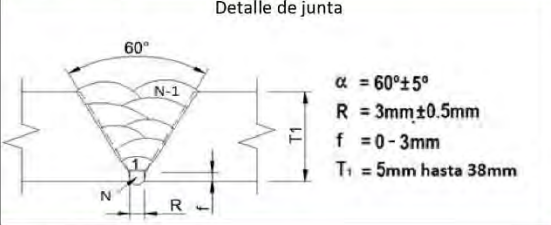

		CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PRELIMINAR (pWPS) SEGÚN AWS B2.1 2014		Código	pWPS-002
				Revisión	0
				Fecha	1/01/2025
				Página	1 de 2
Compañía	<u>PUCP</u>	Elaborado por:	<u>Oscar Carrera Escajadillo</u>		
Identificación WPS	<u>pWPS-002</u>	Fecha	<u>10/01/2025</u>		
N° de rev	<u>0</u>	Fecha de rev.	<u>10/01/2025</u>		
PQR de respaldo	<u>---</u>	Tipo (s)	<u>Semiautomático</u> <small>(Manual, Semiautomático, Mecanizado, Robotizado)</small>		
Procesos de soldadura	<u>FCAW-G</u>				
Diseño de junta (según 4.13.1)					
Diseño de junta	<u>A tope en V simple</u>				
Respaldo	Si <input type="checkbox"/>	No <input checked="" type="checkbox"/>			
Material del respaldo	<u>N/A</u>				
Ángulo de junta a soldar	<u>60°</u>				
Altura de talón (f)	<u>0-3 mm</u>				
Resane de raíz	Si <input checked="" type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>			
Método de resane de raíz	<u>Amolado (Grinding)</u>				
					
Metales base (según 4.13.2)					
M-No.	<u>No enlistado</u>	Grupo No.	<u>No enlistado</u>		
Especificación tipo y grado	<u>EN 10025-6 S690QL</u>		Soldado a M-No.	<u>No enlistado</u>	
			Grupo No.	<u>No enlistado</u>	
Rango de espesores del material base:	A tope	<u>3/16" a 2T (1 1/2")</u>	Filete	<u>---</u>	
Metal depositado:	A tope	<u>---</u>	Filete	<u>---</u>	
Rango de diámetro de tubería	A tope	<u>---</u>	Filete	<u>---</u>	
Resistencia a la tracción	<u>847.63 MPa</u>		Documento de ref.	<u>---</u>	
Resistencia mínima especificada a la tracción	<u>690 MPa</u>		Documento de ref.	<u>EN 10025-6</u>	
Análisis químico - documento de referencia	<u>MAT-Lab-4.123</u>		Rev	<u>1</u>	
Carbono equivalente CE	<u>0.39%</u>		Fecha	<u>12/06/2024</u>	
			Documento de ref.	<u>---</u>	
Material de aporte (según 4.13.3)					
Proceso de soldadura	<u>FCAW-G</u>				
Especificación AWS	<u>AWS A5.29</u>				
Clasificación AWS	<u>E111T1-K3M-JH4</u>				
F-No.	<u>6</u>				
A-No.	<u>1</u>				
Diámetro metal de aporte	<u>.045" (1.1 mm)</u>				
Nombre comercial alambre	<u>UltraCore 111K3M-H Plus</u>				
Metal depositado	<u>20mm (3/4")</u>				
Nombre comercial fundente	<u>---</u>				
Inserto consumible	<u>---</u>				
Otro	<u>---</u>				
Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:			
Oscar Carrera Escajadillo	Oscar Carrera Escajadillo	Oscar Carrera Escajadillo			
Fecha: 01.01.2025	Fecha: 01.01.2025	Fecha: 01.01.2025			

Figura 36. WPS preliminar para el proceso FCAW-G. Primera página.

	ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PRELIMINAR (pWPS) SEGÚN AWS B2.1 2014		Código	pWPS-002
			Revisión	0
			Fecha	1/01/2025
			Página	2 de 2

Posición de soldadura (según 4.13.4)		Precalentamiento (según 4.13.5)	
Posición de soldadura a tope	<i>Vertical</i>	Temperatura de precalentamiento (Mín.)	<i>175 °C</i>
Posición de soldadura a filete	---	Temperatura de precalentamiento	<i>175 °C</i>
Progresión de soldadura	<i>Ascendente</i>	Temperatura de interpase (Máximo)	<i>230 °C</i>
PWHT (según 4.13.6)		Distancia de verificación precalentamiento	<i>Armado a 1"</i>
Temperatura	---		<i>Soldeo a 3"</i>
Tiempo	---		

Gas de protección (según 4.13.7)			
	Protección antorcha	Protección raíz - respaldo	Protección arrastre
Gases	<i>SG - M20</i>	---	---
Composición %	<i>90% Ar / 10% CO2</i>	---	---
Caudal	<i>20-25 LPM</i>	---	---

Características eléctricas (según 4.13.8)		Otras variables (según 4.13.9)	
Tipo de corriente / polaridad	<i>CCEP - DC - CV</i>	Tamaño de tobera	<i>Ø 5/8"</i>
Corriente pulsada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Collet body	<input type="checkbox"/> Gas lens <input type="checkbox"/>
Rango de amperaje	<i>VER TABLA 1</i>	Técnica:	Oscilante <input type="checkbox"/> Recta <input checked="" type="checkbox"/>
Rango de voltaje	<i>VER TABLA 1</i>	Método de limpieza	<i>Amolado (raíz - backgoughing)</i> <i>Escobillado (relleno + acabado)</i>
Rango de alimentación de alambre	<i>VER TABLA 1</i>	Número de electrodos / alambres	<i>1</i>
Tamaño / tipo electrodo tungsteno	<i>N/A</i>	Pasada única	<input type="checkbox"/> o Multipase <input checked="" type="checkbox"/>
Parámetros pulsados	---	Stickout eléctrico	<i>3/8" a 1/2"</i>
Modo de transferencia	<i>Globular</i>	Otros:	
Otros:			

Tabla 1 - Parámetros de soldadura									
Pase	Proceso	Metal de aporte		Parámetros eléctricos				Velocidad de avance (cm/min)	Heat input (KJ/mm)
		Clase AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)	Velocidad alim. Alambre (IPM)	Voltaje (V)		
<i>1</i>	<i>FCAW-G-HYPERFILL</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>140-190</i>	<i>200-350</i>	<i>20-22</i>	<i>10.0-15.0</i>	<i>2.00</i>
<i>2 a N-1</i>	<i>FCAW-G-HYPERFILL</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>160-210</i>	<i>200-350</i>	<i>23-26</i>	<i>15.0-25.0</i>	<i>1.70</i>
<i>N</i>	<i>FCAW-G-HYPERFILL</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>160-210</i>	<i>200-350</i>	<i>23-26</i>	<i>15.0-25.0</i>	<i>1.70</i>

Elaborado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 01.01.2025	Revisado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 01.01.2025	Aprobado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 01.01.2025
--	---	---




Figura 37. WPS preliminar para el proceso FCAW-G. Segunda página.

2.2. Metodología para la elaboración de WPS según AWS B2.1

Para aprobar un WPS según AWS B2.1 se tiene contar con lo siguiente:

- a. Definir la cantidad de ensayos destructivos y no destructivos a aplicar para la calificación del WPS.
- b. Contar con un PQR con las variables de soldeo registradas por cada prueba.
- c. Evaluar los resultados de ensayos no destructivos y destructivos según los criterios de aceptación del código.
- d. Elaborar un WPS en base al PQR de soporte considerando los rangos de variables esenciales para el cual el código da soporte. Asimismo, se debe de incluir los espesores límites para el cual la el código cubre la calificación.

2.2.1. Cantidad de ensayos a realizar por cupón para cada pWPS

En conformidad con el código AWS B2.1. se elaborarán todos los ensayos requeridos para la calificación de procedimiento de soldadura. El tipo de ensayo y cantidades se especifican en la Tabla 16 para ensayos no destructivos y en la Tabla 17 para ensayos destructivos.

Tabla 16

Ensayos no destructivos a realizar por cupón de soldadura

Descripción	Requerido por AWS B2.1	Cantidad de pruebas por cupón	Norma a aplicar
Inspección visual	Si	1	AWS B2.1.
Tintes penetrantes	---	1	ASTM E165
Partículas magnéticas	---	1	ASTM E709
Radiografía	---	1	AWS D1.1

Tabla 17

Ensayos destructivos a realizar por cupón de soldadura

Descripción	Requerido por AWS B2.1	Cantidad de pruebas por cupón	Norma a aplicar
Ensayo de doblado	Si	2 doblado cara 2 doblado raíz	AWS B2.1.
Ensayo de Tracción	Si	2	ASTM E8/E8M
Impacto	Opcional	3	ASTM E23
Macrografía	Opcional	1	ASTM E3
Barrido de dureza	Opcional	1	ASTM E92 ISO 9015-1

2.2.2. Criterios de aceptación de elaboración de WPS – Inspección visual

Para la ejecución de los ensayos de Inspección Visual (VT) se deberá cumplir que:

- No deberá presentarse evidencia de fisuras, fusión incompleta o penetración incompleta en la soldadura.
- La profundidad de socavación no debe de exceder 1mm de profundidad o el 10% del espesor del material, el menor de ambos valores.
- Las porosidades no excederán las limitaciones del documento de referencia. Se define como documento de referencia el código de soldadura AWS D1.1.

2.2.3. Criterios de aceptación de elaboración de WPS – Ensayo de tracción

Los especímenes del ensayo de tracción deberán tener una resistencia a la tracción no menor a:

- La resistencia a la tracción mínima especificada del metal base (940 – 1100) MPa [136-159 ksi], ó:

- El valor de la resistencia a la tracción mínima especificada de la unión soldada cuando se emplea un documento de referencia que especifica que el cordón de soldadura presenta una resistencia a la tracción menor a la del metal base, ó:
- Si la probeta rompe en el metal base fuera del cordón de soldadura o interfaz de soldadura, el ensayo de tracción será aceptado siempre que el valor de la resistencia a la tracción sea 5% menor como máximo de la resistencia a la tracción mínima especificada del material base.

2.2.4. Criterios de aceptación de elaboración de WPS – Ensayo de doblado

- No deberá presentarse alguna discontinuidad abierta de más de 3mm de longitud sobre la superficie convexa de doblado después del doblado.
- Fisuras generadas en las esquinas no serán consideradas salvo que exista evidencia que se generen producto de discontinuidades en la soldadura.

2.2.5. Criterios de aceptación de elaboración de WPS – Ensayo de impacto

El tipo de ensayo, número de especímenes y criterio de aceptación deberá estar de acuerdo al documento de referencia.

2.2.6. Espesores límites para calificación

Para el material empleado de espesor de $\frac{3}{4}$ ", el rango de calificación según AWS B2.1 está definido desde los 5 mm hasta 2T o 38 mm.

2.2.7. Inspección visual antes del soldeo de planchas

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Se utilizarán como instrumentos de medición bridge cam, vernier y flexómetro.

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se revisará la preparación de mecanizado y estado de las planchas.

- **Procedimiento a utilizar**

Antes de realizar el soldeo, se debe verificar el cumplimiento del diseño de junta: altura de talón (entre 0 a 3 mm), ángulo de biselado de las planchas (30°) y separación de las planchas de 3mm.

2.2.8. Inspección visual después del soldeo de planchas

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Se utilizarán como instrumentos de medición bridge cam y V-WAC gauge (ver Figura 38 y Figura 39)

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se revisará la superficie soldada del material (cordón, zona zac y metal base).



Figura 38. *Bridge Cam gauge*



Figura 39. *V-WAC gauge*

- **Procedimiento a utilizar**

Después de haber sido soldado en cupón, se examinará longitudinalmente la junta soldada, tanto la cara como la raíz. Asimismo, al ser un material susceptible a la fisuración en frío, se volverá a examinar la junta soldada en las mismas zonas después de las 48 horas de haber enfriado el cupón. Después de las 48 horas, se validará por inspección visual la cara y la raíz del cordón de soldadura.

De acuerdo con los requerimientos especificados en el código de soldadura AWS B2.1. se deben cumplir los siguientes criterios de aceptación:

- Ausencia de fisuras, fusión incompleta o penetración incompleta en la junta.
- La profundidad de las mordeduras no debe exceder no deben exceder en 1mm.

2.2.9. Tintes penetrantes

Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar

Para la aplicación de tintes se utilizará cleaner SKC-S, tinte penetrante marca SKL-SP2, revelador SKD-S2 marca SPOTCHET marca MAGNAFLUX como se puede apreciar en la Figura 40. Se emplearán trapos industriales para la limpieza de tintes.



Figura 40. Kit de tintes penetrantes marca MAGNAFLUX. Imagen referencial

Nota. Tomado de *Tintes Penetrantes Magnaflux*, por Salvo Spa Soluciones Industriales.

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se revisará la superficie soldada del material (cordón, zona zac y metal base).

- **Procedimiento a utilizar**

Como procedimiento de aplicación se empleará lo especificado en la norma ASTM E165-18: “Standard Practice for Liquid Penetrant Testing por general Industry”.

Para la aplicación de los tintes penetrantes primero se realizará una prelimpieza con el cleaner. Este se aplicará directamente sobre la superficie de interés y con ayuda de un trapo industrial se retirará toda la suciedad y grasa. Una vez seca con el trapo, se esperará que se evapore el cleaner. Posterior a ello se aplicará el tinte penetrante sobre el cordón de soldadura cuidando de que esté completamente humedecido con el tinte. Se esperará un tiempo de penetración mínimo de 5 minutos según ASTM E165. Luego, se retirará con trapo industrial el exceso de tinte con trapo industrial. Para finalizar la limpieza, se aplicará cleaner desde una distancia de al trapo industrial brevemente y con el trapo se limpiará el exceso de tinte. Después de esperar a que evapore el cleaner, aplicar revelador a la superficie de interés hasta visualizar un contraste blanco en el cordón de soldadura. Se realizará la evaluación después de 10 min según ASTM E165.

2.2.10. Partículas magnéticas

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Para la ejecución de ensayo de partículas magnéticas se utilizarán partículas húmedas fluorescente marca MagnaFlux. Para generar la magnetización en el material se empleará un Yugo Magnético Y-7 marca Magnaflux. Para revelar las indicaciones presentes en el material se utilizará una lámpara marca Magnaflux EV5000. Ambos instrumentos referenciales se muestran en la Figura 41 y Figura 42. Se emplearán partículas magnéticas húmedas fluorescentes MR 76 F como se ve en Figura 43.



Figura 41. Yugo magnético Y-7.



Figura 42. Lámpara EV5000.



Figura 43. Partículas magnéticas fluorescentes MR 76F.

Nota 1. Figura 41 tomado de Magnaflux Y-8 -115V/230V Global Charger - DC Cordless Yoke Kit, por NDT Supplies

Nota 2. Figura 42 tomado de Magnaflux EV6000 LED UV Light, por MX INDUSTRIAL

Nota 3. Figura 43 tomado de PARTICULAS MAGNETICAS FLUORESCENTES MR 76F (Aceite), por DM STECH

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se revisará la superficie soldada del material (cordón, zona zac y metal base).

- **Procedimiento a utilizar**

Se empleará el estándar ASTM E709-21: “Standard Guide for Magnetic Particle Testing”. Para el ensayo, se preparará la superficie cuidando que se encuentre exenta de grasas, aceite y suciedad. Luego, con ayuda del yugo con corriente continua se procede a magnetizar la pieza con el yugo generando campos magnéticos perpendiculares. Mientras se está magnetizando la pieza, se procede a aplicar las partículas magnéticas directamente sobre las zonas de contacto del yugo a la pieza. Por último, se procede a realizar la evaluación con la lámpara EV5000 cuidando de que el ambiente no provea iluminación natural.

2.2.11. Inspección por radiografía industrial

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Para la ejecución del ensayo se utilizó el equipo X Balteau NDT Ceram 35 el cual es un tubo de rayos X. Asimismo, se emplearon películas radiográficas Structurix AGFA Tipo D7 (ver Figura 44).



Figura 44. *Tubo generador de rayos X Balteau NDT Ceram 35*

Nota. Tomado de *BALTOSPOT CERAM 35P*, por Stuart Hunt & Associates Ltd.

- **Elemento(s) a inspeccionar**

El área a inspeccionar es la superficie del cordón de soldadura de 60cm de largo.

- **Procedimiento a utilizar**

Para ejecutar en ensayo, se empleará como referencia lo especificado en el código AWS D1.1 Capítulo 8 Parte E – Pruebas Radiográficas (RT).

Los cupones de soldadura se colocarán a una distancia de entre 650-750 mm. Para las tomas de la radiografía se utilizará un voltaje de 235 kV, corriente de 5 mA y un tamaño de foco de 2.5x2.5 mm.

Dado que la longitud de las películas es de 34.5cm, se distribuirán marcas dividiendo el área de interés del cordón en 2 zonas para las cuales a cada zona se le revelará con una película. Se limitará por medio de marcas las zonas: de 0-1 corresponde a la primera película y de 1-2 corresponderá a la 2da (ver Figura 45).

Posterior al disparo, se revelarán las películas radiográficas sumergiéndolas 5 minutos en un revelador. Luego, las películas pasarán por un proceso de lavado y por último se les sumergirán en un fijador por 2 minutos. Por último, se les realizará un proceso de lavado final.

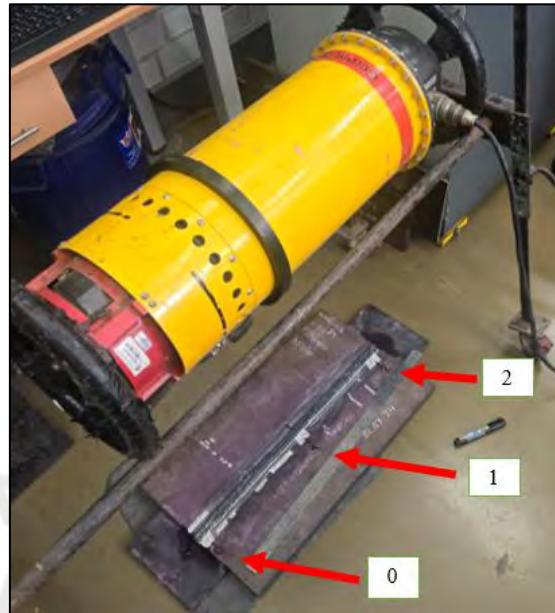


Figura 45. Ubicación de límites de zonas a radiografiar

2.3. Metodología para la ejecución de ensayos destructivos

En el presente apartado se definirá la metodología para ejecutar los ensayos de tracción, doblado, impacto y barrido de durezas a realizar para validar la calidad de la soldadura en conformidad con la norma AWS B2.1.

2.3.1. Ensayo de tracción

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Para la ejecución del ensayo se empleará una máquina de tracción ZWICK ROELL Z250.

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se extraerán probetas transversales a la longitud del cordón de soldadura las cuales serán ensayadas por ensayo de tracción. La geometría debe de cumplir con lo especificado según la AWS B2.1 para ensayo de probetas soldadas a tope, así como se muestra en la Figura 46.

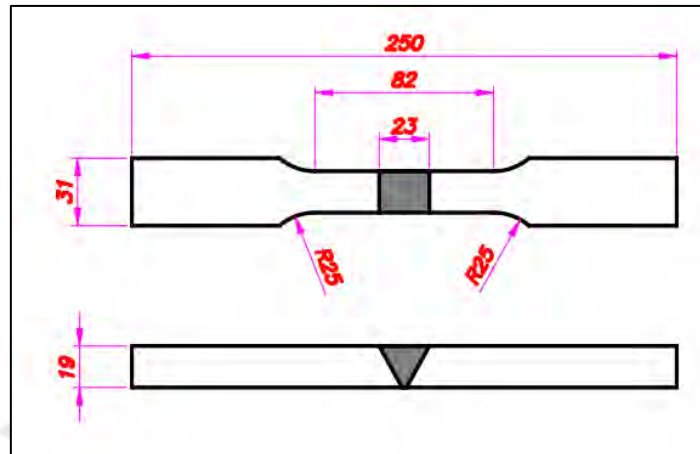


Figura 46. *Probeta de ensayo de tracción en sección reducida.*

- **Procedimiento a utilizar**

Para cada cupón de soldadura, se extraerán dos (02) probetas de tracción en sección reducida que deben cumplir geoméricamente con lo especificado según ASTM E8/E8M las cuales, al ser sometidas al ensayo, deberán cumplir con los criterios de aceptación.

- La resistencia a la tracción de cada espécimen no deberá ser menor a la resistencia mínima especificada a la tracción del material base.
- Si el material rompe en una zona afuera del cordón soldado o de la zona ZAC, el ensayo será aceptado si la resistencia a la tracción difiere en menos de un 5% de la resistencia a la tracción especificada del material base.
- Si el material base no tiene esfuerzo de fluencia mínimo especificado y la probeta rompe en el material base en una zona distinta al cordón de soldadura o a la interfaz (zona ZAC), la prueba deberá ser aceptada.

2.3.2. Ensayo de doblado – doblado de cara y doblado de raíz

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Se utilizará una matriz de doblado que cumpla con los esquemas especificados en la AWS B2.1. Se muestra a continuación la máquina de doblado (ver Figura 47) que se usa en el Laboratorio de Materiales PUCP.



Figura 47. Matriz y punzón de doblado a utilizar para las pruebas.

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se extraerán probetas transversales a la longitud del cordón de soldadura las cuales serán ensayadas por ensayo de doblado.

- **Procedimiento a utilizar**

Para cada probeta de doblado (de cara o de raíz) se debe de eliminar el refuerzo de la soldadura y el excedente de la superficie de la raíz. Asimismo, se empleará un rodillo fijo de 61 ± 3.2 mm de diámetro. Una vez preparado el espécimen, se procederá a realizar el doblado hasta deformar plásticamente el material.

Como criterio de aceptación, no deberá haber ninguna discontinuidad de más de 3 mm medida en cualquier dirección de la superficie convexa después del doblado. Las fisuras que

aparezcan en las esquinas del espécimen no serán consideradas salvo que sean evidentes que aparezcan producto de una discontinuidad.

- **Cálculos para hallar diámetro de doblado**

El código de soldadura AWS B2.1/2.1M:2014 especifica que una de las matrices para doblar probetas es la mostrada en la Figura 48. Asimismo, para materiales no enlistados en el código (materiales diferentes a lo especificado según ASTM) el diámetro mínimo del rodillo fijo es de 40mm.

- $A_{mín} = 40\text{mm}$

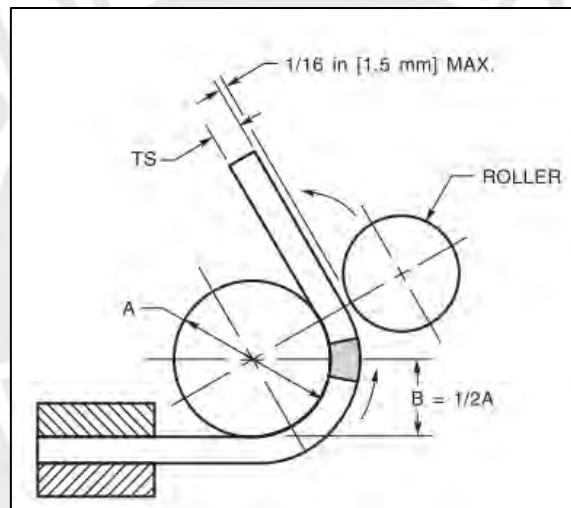


Figura 48. Esquema de matriz de doblado genérica según AWS B2.1/B2.1M:2014

El valor máximo del diámetro del rodillo fijo está definido según la siguiente ecuación de la norma AWS B2.1.

$$A = \left(100 \frac{TS}{E} \right) - TS \quad (26)$$

Siendo:

A Máximo diámetro de doblado (mm)

TS Espesor de probeta (mm)

E Elongación de material (%)

Como datos se cuenta con lo siguiente:

- TS1= 10mm
- TS2= 25.4mm
- E= 14%

Para el cálculo del diámetro máximo para probetas de doblado de cara y de raíz (TS1=10mm) se obtiene:

$$A1 = \left(100 \frac{TS1}{E}\right) - TS1$$

$$A1 = \left(100 * \frac{10}{14}\right) - 10$$

$$A1 = 61mm$$

Para el cálculo del diámetro máximo para probetas de doblado lateral (TS2=25.4mm) se obtiene:

$$A2 = \left(100 \frac{TS2}{E}\right) - TS2$$

$$A2 = \left(100 \frac{25.4}{14}\right) - 25.4$$

$$A2 = 156mm$$

Como resumen. en la Tabla 18 se muestran los diámetros a contemplar para el diseño y prueba destructiva.

Tabla 18

Diámetros admisibles de los diámetros del rodillo fijo según AWS B2.1/2.1M:2014

Tipo de probeta	Espesor (mm)	Diámetro mínimo Rodillo fijo (mm)	Diámetro máximo Rodillo fijo (mm)
Probeta doblado cara / raíz	10	40	61
Probeta doblado lateral	25.4	40	156

Por otro lado, se menciona que el código de soldadura AWS B4.0:2016 emplea la misma fórmula (ver Figura 49). No obstante, no menciona si es diámetro máximo. La ecuación indica que el valor obtenido debe de emplearse para el diámetro en la matriz.

6.6.4 The radius of the plunger, A, shown in Figures 6.1 and 6.2 or the mandrel shown in Figure 6.3 shall be specified or determined from the following equation:

$$A = T(50/e - 1/2)$$

where

A = Radius of mandrel or plunger, ±1/16 in (±1.6 mm);

e = Elongation at outer surface, %; and

T = Specimen thickness, ±1/64 in (±0.40 mm).

Figura 49. Fórmula del diámetro de rodillo fijo según AWS B4.0:2016.

Según lo especificado en el punto 4.3.2. del código AWS B2.1/2.1M:2016, se pueden emplear ambos códigos de soldadura como referenciales. No obstante, en caso de conflicto de información, se debe de emplear como referencia el código AWS B2.1/2.1M. Para mantener uniformidad en lo especificado en ambos códigos, se define un valor de diámetros de rodillos que cumpla con ambos códigos. Por eso mismo, se empleará el diámetro máximo calculado como el diámetro de doblado (ver Tabla 19).

Tabla 19

Dimensiones de diámetro de rodillo fijo

Tipo de probeta	Diámetro de rodillo fijo (mm)
Probeta doblado cara / raíz	61±3.2
Probeta doblado lateral	156±3.2

2.3.3. Ensayo de dureza

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Para el ensayo de dureza se empleará un durómetro Zwick Roell ZHV30 (ver Figura 50).} que permite realizar las indentaciones según el ensayo de dureza Vickers.



Figura 50. Durómetro Zwick Roell ZHV30

Nota. Extraído de ZHV30-S Vickers Hardness Tester, por Zwick Roell.

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se extraerán probetas que permitan visualizar la sección transversal del cordón de soldadura. Las dimensiones cumplirán con el siguiente esquema presentado en la Figura 51.

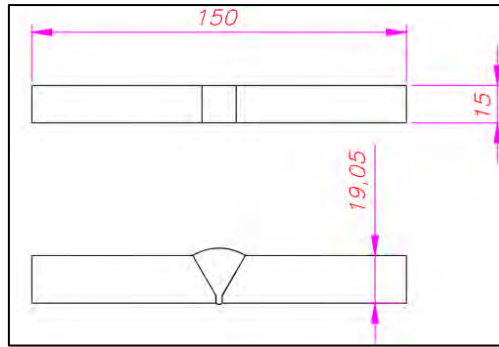


Figura 51. *Probeta para barrido de durezas.*

- **Procedimiento a utilizar**

Se realizará barrido de durezas de acuerdo a la norma ISO 9015-1. Este método emplea barrido de durezas Vickers el cual para la toma de muestras se solicita que se marquen 2 ejes horizontales ubicados a 2mm cada uno de las caras del cupón. Sobre estos ejes se tomarán 13 puntos de durezas a fin de levantar la curva de durezas Vickers tanto en la cara como en la raíz. Solamente se ensayarán los ejes X-X y eje Z-Z indicados en la Figura 52.

Como criterio de aceptación, se define que los valores de dureza no deben de superar los 400 HV a fin de evitar el fenómeno de endurecimiento y agrietamiento en frío.

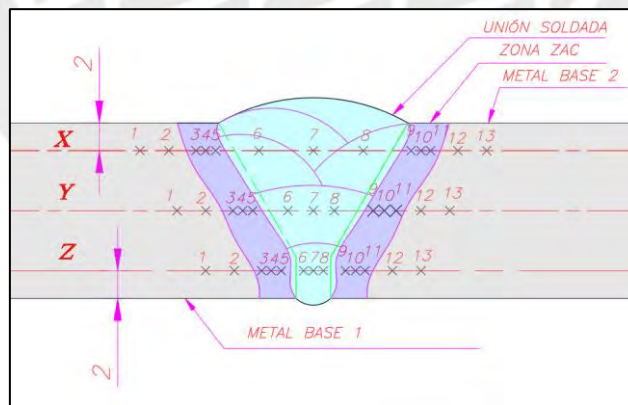


Figura 52. *Puntos para el barrido de durezas Vickers para la probeta.*

2.3.4. Ensayo de impacto Charpy-V

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Para el ensayo de impacto se utilizará una máquina de impacto Zwick Roell RKP 450.

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se extraerán probetas de ensayo Charpy-V de la zona del cordón de soldadura. La geometría de las probetas Charpy-V deberán cumplir con la norma ASTM E23-22 así como lo indicado en la Figura 53. La posición de la entaya debe coincidir con el eje vertical del cupón de soldadura.

- **Procedimiento a utilizar**

Para evaluar la tenacidad al impacto, se extraen (03) probetas de impacto del cordón de soldadura del centro del cordón y (03) probetas que coincidan con la zona ZAC. Para el marcado previo al corte, se debió revelar el cordón de soldadura con macroataque con nital al 5%. Tanto la geometría de las probetas como el procedimiento experimental se ejecutarán en conformidad con lo especificado en la norma ASTM E23-22. Se realizará el ensayo a condiciones ambientales a 20-25 °C a fin de comparar la variación de la propiedad mecánica respecto a lo caracterizado en el material base.

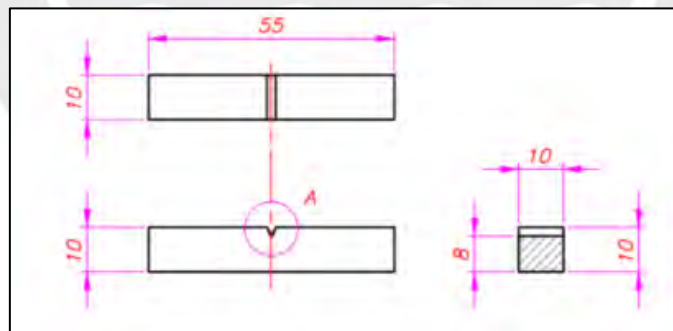


Figura 53. Probeta para ensayo de impacto Charpy-V.

Como criterio de aceptación, se define que el requisito mínimo para resultados de ensayo Charpy-V tanto en el centro del cordón del baño de fusión como en la zona ZAC alcancen como mínimo el valor de energía de impacto absorbida para la temperatura de ensayo

definida. En este caso, la norma EN 10025-6 especifica que para un acero S690QL a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ la energía de impacto mínima absorbida debe ser 40 J (ver Tabla 5).

Se define la temperatura de prueba a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ya que con dicha tempera se cubre la mayor cantidad de posibles aplicaciones de soldadura en minería en la Sierra Peruana.

2.3.5. Ensayo de macrografía

- **Instrumento(s) y equipo(s) a utilizar**

Para el ensayo de impacto se utilizará lija 600 para preparar el material. Se utilizará nital al 5% para el macroataque.

- **Elemento(s) a inspeccionar**

Se inspeccionará la superficie preparada para el barrido de durezas para el revelado de macroataque.

- **Procedimiento a utilizar**

Una vez cortada la probeta de barrido de durezas, se procederá a lijar de forma vertical ascendente y descendente con lija al agua 600 hasta borrar toda marca de mecanizado anterior. Una vez conseguida una superficie lisa, se procede a atacar la superficie de interés con nital al 5% hasta conseguir el revelado del cordón de soldadura, línea de fusión, zona zac del cordón.

Como criterio de aceptación, se empleará lo definido en AWS B2.1:2014 que indica que la superficie a inspeccionar debe de estar libre de fisuras, penetración incompleta o fusión incompleta.

CAPÍTULO 3. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Caracterización de material base

El material base fue caracterizado el día **12.06.2024**. Para ello, se realizaron análisis químico, ensayo de tracción, ensayo de dureza, pruebas de impacto charpy-v y macrografía.

Como resultado del análisis químico indicado en la Tabla 21 se observa que los resultados del análisis químico cumplen con lo especificado con la norma EN 10025-6. Asimismo, se observa cantidades elevadas de manganeso, cromo y níquel en el acero. Estos elementos podrían impactar en la soldabilidad del acero. Como validación de ello, se calculó el carbono equivalente, obteniéndose como valor **CE = 0.48** (soldabilidad media de acero).

En lo que respecta a la obtención de propiedades mecánicas, se ejecutaron las pruebas correspondientes de ensayo de tracción e impacto. Según los valores obtenidos indicados en la Tabla 22 se puede concluir que el material ensayado cumple con los requerimientos de la norma **EN 10025-6**.

Con la finalidad de conseguir una mayor data respecto a las propiedades mecánicas del material base, se realizó un barrido de durezas a la superficie del acero. Dichos resultados de dureza superficial son mostrados en la Tabla 20.

Tabla 20

Valores de dureza superficial del material base

Muestra	Mediciones			Dureza	Dureza
	1	2	3	HRC	HRB
1	24,5	24,1	24,3	24	247

Tabla 21

Composición química del material base analizado

Composición química del material base adquirido									
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.138	1.033	0.009	0.0016	0.3006	0.585	0.206	0.198	0.014	0.001
Ti	V	Co	Al	W	Sn	Fe	B	N	Zr
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.019	0.008	0.0142	0.0647	0.0039	0.0014	97.348	0.0009	---	---
Valores máximos de elementos químicos indicados en la norma EN-10025-6									
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.22	1.8	0.025	0.0120	0.86	1.6	4.1	0.74	0.55	0.07
Ti	V	Co	Al	W	Sn	Fe	B	N	Zr
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.07	0.14	---	---	---	---	---	0.006	0.016	0.17
RESULTADO: Cumple con lo especificado en la norma EN-10025-6									

Además de haber realizado un ensayo de impacto a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ se realizaron pruebas de impacto adicionales a temperaturas de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ con el fin de poder identificar la temperatura de transición del material. Imágenes de los resultados de ensayos se muestran en la Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58, de elaboración propia. De los ensayos realizados se consiguieron los valores mostrados en la Tabla 23 así como la curva S del material presentado en la Figura 54, ambas de elaboración propia.

Tabla 22

Comparativo de las propiedades mecánicas de material S690QL según EN 10025-6 vs.

Valores experimentales encontrados como resultados de ensayos

	Especificado por EN 10025-6	De resultados de ensayos
Esfuerzo de Fluencia	690 MPa [100 ksi] (como mínimo)	739 MPa [107 ksi]
Resistencia a la tracción	770 –940 MPa [111-136 ksi] (como mínimo)	799 MPa [115 ksi]
Elongación	14%	22.76%
Energía de impacto	50 J @ 0 °C 40 J @ -20 °C 30 J @ -30 °C	180 J @ -40 °C
RESULTADO: Cumple con lo especificado en la norma EN-10025-6		

Tabla 23

Valores de energía de impacto absorbida a -60 °C, -20 °C y 20 °C

Punto	T (°C)	E1(J)	E2(J)	E3(J)	Epromedio (J)
1	-80	44.65	53.46	27.29	41.8
2	-60	116.84	141.96	145.89	134.9
3	-20	145.6	124.58	104.83	125.1
4	0	229.4	223.04	238.15	230.2
5	20	214.78	222.13	214.7	217.3

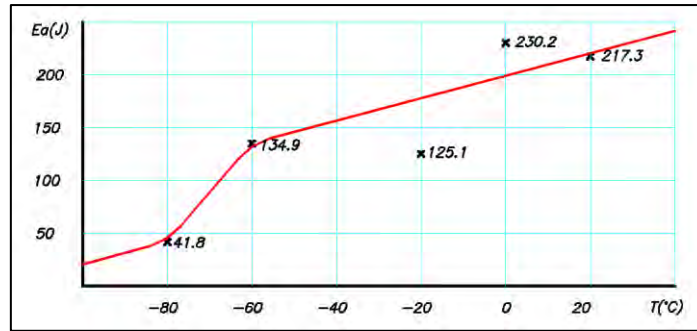


Figura 54. Gráfico de Energía de impacto absorbida vs temperatura de ensayo

De los resultados obtenidos, se concluye que el material presenta una temperatura de transición aproximada de $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ya que a valores de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ empieza a romper de forma frágil. Se observa que para pruebas de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ no hay deformación plástica a diferencia de las ensayadas a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 55. Sección de probetas ensayadas a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ Figura 56. Sección de probetas ensayadas a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Figura 57. Vista lateral de probetas ensayadas a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$



Figura 58. Sección de probeta ensayada a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Para los ensayos de metalografía se procedió a extraer dos (02) muestras de la zona del material base. Dichas muestras metalográficas fueron prepararon las placas metalográficas lijándolas con lija 120,180, 220, 400, 600 y 1200. Posterior a ello, se procedió a observar con el equipo microscópico en los aumentos x100 y x500. A continuación, se mostrarán las imágenes obtenidas en una de las muestras (ver Figura 59 y Figura 60).

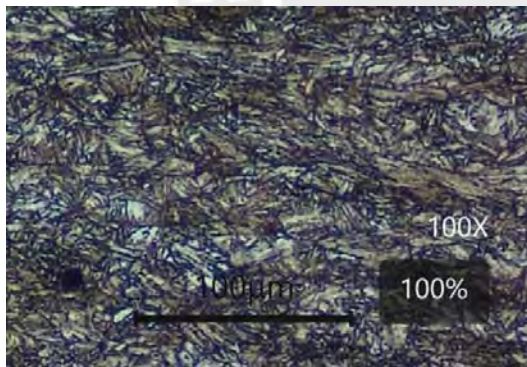


Figura 59. Muestra metalográfica. Imagen a 100X

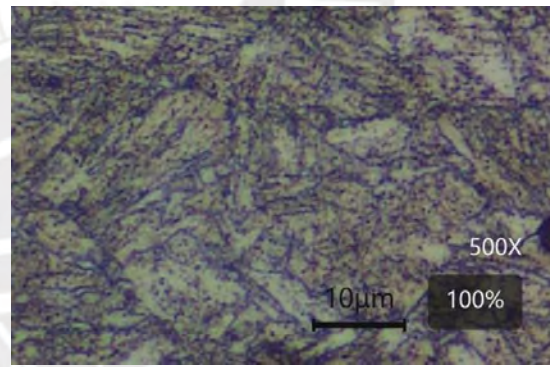


Figura 60. Muestra metalográfica. Imagen a 100X

Como se puede observar, los patrones de los granos con estructura acicular son semejantes a microestructuras martensíticas. Esto concuerda con la definición del estado de suministro especificado en la norma EN 10025-6 que indica que el material presenta de estado de suministro de temple y revenido (bonificado).

Se concluye que el material base caracterizado cumple con los requisitos de análisis químico, tracción e impacto definidos por la norma EN 10025-6 para un acero S690QL. Como resultados del análisis metalográfico y de impacto, se pudo comprobar que el material presenta indicios de haber sido procesado por un tratamiento térmico de temple y revenido puesto que se observó martensita en la metalografía, así como se observó que para temperaturas de impacto de -60 °C y superiores los valores de energía absorbida impacto registradas superan los 100 J y que para -80 °C la energía absorbida del material base se disminuye a 40 J. Esto genera como conclusión que, a pesar de tener una microestructura martensítica, el material base presenta cierta tenacidad al impacto y que pudo haber sido originada por el tratamiento térmico de revenido para ablandar el material.

Por último, para definir el grado de soldabilidad según el carbono y carbono equivalentes y saber el grado de dificultad con el que se puede obtener una soldadura sana y resistente, se procede a realizar el cálculo de carbono equivalente (ver Ecuación 1).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$CE = 0.138 + \frac{1.033}{6} + \frac{0.585 + 0.198 + 0.008}{5} + \frac{0.206 + 0.014}{15}$$

$$CE = 0.483$$

Con el valor del carbono equivalente obtenido se obtiene una dificultad media de soldabilidad (ver Tabla 6) y con el valor del carbono, se procedió a emplear el Diagrama de Graville (ver Figura 61). La zona II indica que estamos trabajando con un acero de soldabilidad intermedia, que se también presenta correlación con lo presentado en la Tabla 6.

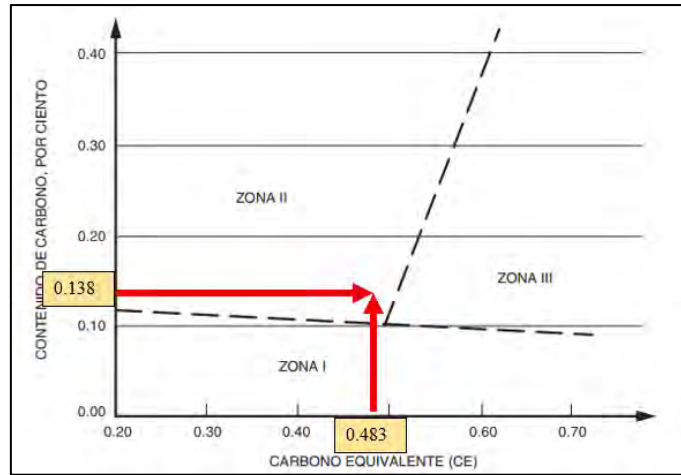


Figura 61. Diagrama de Graville con los parámetros químicos del acero estudiado

Nota. Tomado de Código de Soldadura Estructural – Acero (p. 359), por AWS, 2020

3.2. Control de Calidad de ejecución de pruebas de soldadura

Previo y durante a las pruebas se codificaron ambos cupones de soldadura, siendo WPS-001 el cupón soldado con proceso FCAW-HYPERFILL y el cupón WPS-002 el cupón soldado con proceso FCAW. Se validó que el proceso de mecanizado cumpla con las tolerancias especificadas para el diseño de junta, por lo que tanto la preparación de bisel (ángulo de 30°) como la altura del talón (0 a 3mm) y la separación de la raíz (1/8") estén dentro de los parámetros especificados del WPS.



Figura 62. Ángulo de bisel de 30°



Figura 63. Altura de talón de 2.5 mm

Durante las pruebas de soldeo se controló la temperatura de precalentamiento para que llegara a la temperatura mínima especificada de los 175 °C.



Figura 64. *Precalentamiento de acero*



Figura 65. *Lectura de pirómetro de 175 °C*

Una vez terminado el soldeo, se verificaron los cupones por inspección visual. Se encontró la presencia de porosidades vermiculares en el cupón soldado con proceso FCAW (ver Figura 66). No obstante, la AWS B2.1 no indica que las porosidades sean motivo de rechazo salvo por lo indicado en el documento de referencia. Por último, no se encontraron fisuras visibles por técnica VT. Se encontraron socavaciones de 0.4mm y 0.6mm de profundidad (ver Figura 67 y Figura 68).



Figura 66. *Porosidad vermicular en el extremo del cupón soldado con FCAW*



Figura 67. Medición de socavaciones

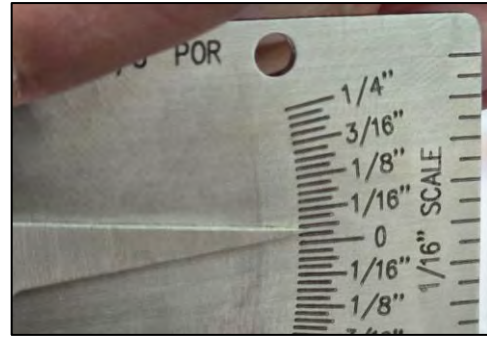


Figura 68. Medida de 0.6 mm para cupón WPS-002

3.3. Registro de tiempos de soldeo para ambos cupones soldados

Posterior al levantamiento de los PQR correspondientes, se levantó la siguiente información de parámetros eléctricos, voltaje y amperaje, así como la velocidad de avance de cada pase de soldadura. Esta información es mostrada en la Figura 69 y Figura 70.

Pase	Proceso	Metal de aporte		Parámetros eléctricos				Velocidad de avance (cm/min)	Heat input (KJ/mm)
		Clase AWS	Díámetro (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)	Velocidad alim. Alambre (IPM)	Voltaje (V)		
1	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	193-204	160	21.1-22.5	10	2.21
2	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	239-250	200	23.4-24.7	9.9	3.00
3-4	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	225-235	180	21.3-23.9	19.3-20.2	1.34
5-8	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	220-233	166	22.8-23.5	19.5-24	1.32
9	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	222-231	169	23.1-23.5	16.2	1.61

Figura 69. Registro de parámetros eléctricos para PQR-001 – Soldeo con FCAW-HYPERFIL

Pase	Proceso	Clase AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)	Velocidad alim. Alambre (IPM)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (cm/min)	Heat input (KJ/mm)
1	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	145-160	250	20.2-20.6	12.4	1.3
2-3	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	180-190	300-320	25.3-26	17-20.5	1.4
4-7	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	180-200	323	24.9-25.3	19-21	1.2
8-9	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	170-180	300	24.3-24.6	22.5-22.8	0.9
10	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	180-190	300	24.3-24.6	18.6	1.2

Figura 70. Registro de parámetros eléctricos para PQR-002 – Soldeo con FCAW

Como consecuencia del análisis de los resultados previos, se observa que para el soldeo HYPERFILL se cuentan con 2 pases de raíz. Para evaluar la productividad se procedió a comparar el tiempo que le tomó al soldador completar a nivel global la soldadura, así como los tiempos para completar la raíz y los pases de relleno para cada cupón soldado. Esto se muestra a continuación en la Tabla 24.

Tabla 24

Comparativo de tiempos de soldeo de cada proceso de soldadura

Proceso	Tipo de pase	Cantidad de pases	Tiempo total (min)	Tiempo global (min)
FCAW-HYPERFILL	Raíz	2	13.2	35.3
FCAW-HYPERFILL	Relleno	7	22.2	
FCAW	Raíz	1	5.0	32.9
FCAW	Relleno	9	27.9	

Una de las razones por las que el tiempo de arco encendido en FCAW-HYPERFILL fue mayor a FCAW fue porque la raíz tuvo que completarse en 2 pases. Esto se debe a que como el proceso genera gran Heat Input generó que se funda el biselado de la raíz y el soldador tuvo que realizar un proceso de reconstrucción del primer pase para que pueda aguantar el Heat Input del 2do pase sin que se funda el cordón.

Por otro lado, si se compara la ejecución y tiempos de los pases de relleno, se observa que hay una reducción significativa del tiempo de arco encendido en un 20.5% o que, por el contrario, se pueda soldar un 25% más en el mismo tiempo de trabajo. Esto quiere decir que por cada 5 minutos soldando en FCAW en posición vertical ascendente, soldar con FCAW-HYPERFILL toma 4 minutos. Un soldador a 200 horas-hombre mensuales al año trabaja aprox. 2400 HH. Considerando factor de operación para FCAW de 25% y para FCAW-HYPERFILL de 31.25% se obtendrían las horas de arco encendido anuales de 600 HH para FCAW y 750HH para FCAW-Hyperfill lo cual puede ser un beneficio para la empresa para producir más componentes soldados.

- $FCAW = 2400 * 0.25 = 600 \text{ HH/año}$
- $FCAW-HYPERFILL = 2400 * 0.3125 = 750 \text{ HH/año}$

En materia de análisis de tiempos, para la posición de soldadura 3G se concluye que el proceso FCAW-G Hyperfill es un 25% más productivo para cordones de relleno y acabado cuando se le compara con un proceso de soldadura FCAW-G que emplea solamente un alambre. No obstante, se requirieron (02) pases de soldadura para formar la raíz del cordón del proceso HYPERFILL. Esto se debe a que el proceso Hyperfill, para la posición vertical ascendente, con separación de raíz de 0-3mm y sin backing lograba que se fundía la raíz con todos los factores combinados. Esto incrementó los tiempos para ejecutar la raíz de 5min (FCAW-G) a 13.2 min (FCAW-G Hyperfill). Si se optaba por definir un diseño de junta con backing, se eliminaba la condición de bisel fundiéndose durante el proceso de soldeo y los tiempos en Hyperfill tanto para los pases de raíz como para los pases de relleno y acabado hubieran sido menores globalmente si se le comparaba con FCAW a un alambre.

3.4. Control de Calidad por ensayos no destructivos PT MT y RT

El segundo ensayo END ejecutado fue el ensayo de tintes penetrantes con tintes penetrantes visuales solubles con solvente. Como resultado de la aplicación del ensayo, se validaron como discontinuidades la presencia de porosidad vermicular y socavaciones (ver Figura 71 y Figura 72). Las porosidades fueron ubicadas en el cupón soldado con proceso FCAW y las socavaciones con proceso FCAW-HYPERFILL. En ambos casos fueron ubicados en la cara de la soldadura. No se encontró indicios de agrietamiento en la zona ZAC.

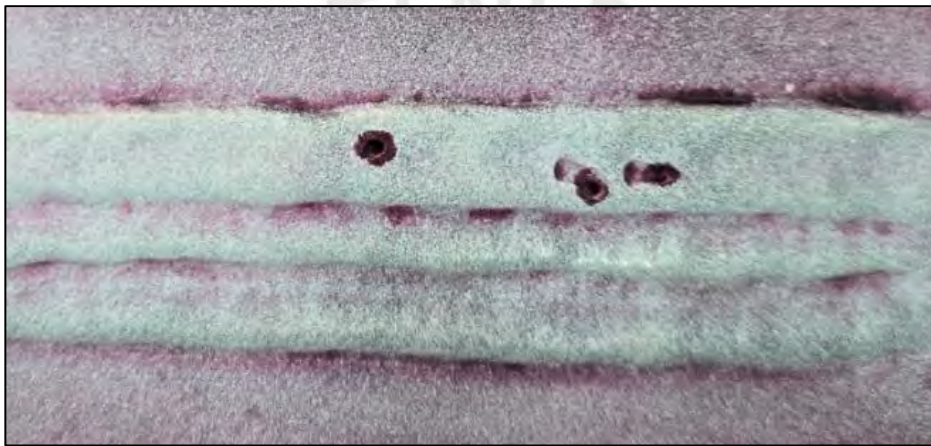


Figura 71. *Indicaciones de porosidades vermiculares en cupón WPS-002*

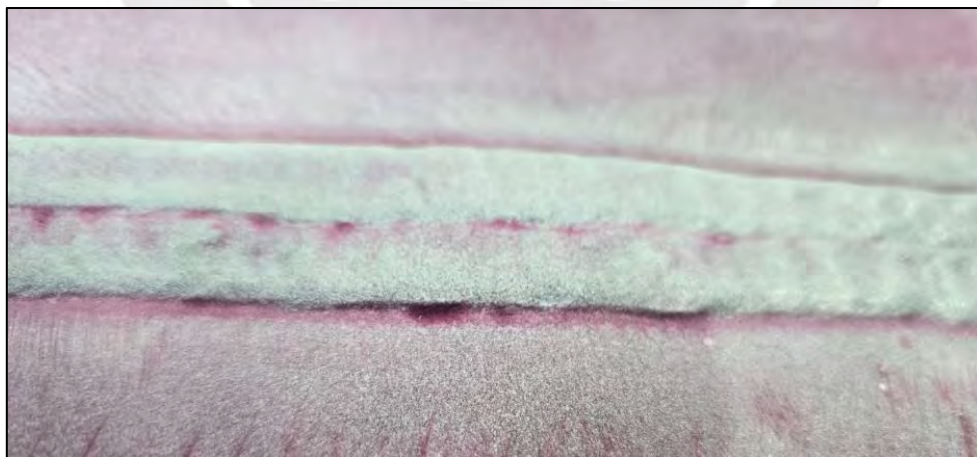


Figura 72. *Indicación de socavación que se encontró por método de Inspección Visual y que fue validada por Tintes Penetrantes*

El tercer ensayo END aplicado aparte de VT y PT fue el ensayo de MT. Se revisaron tanto la cara de la soldadura como la raíz a fin de encontrar fisuración superficial. No obstante, solamente se encontraron indicaciones producto del perfil del cordón de soldadura (ver Figura 73 y Figura 74).

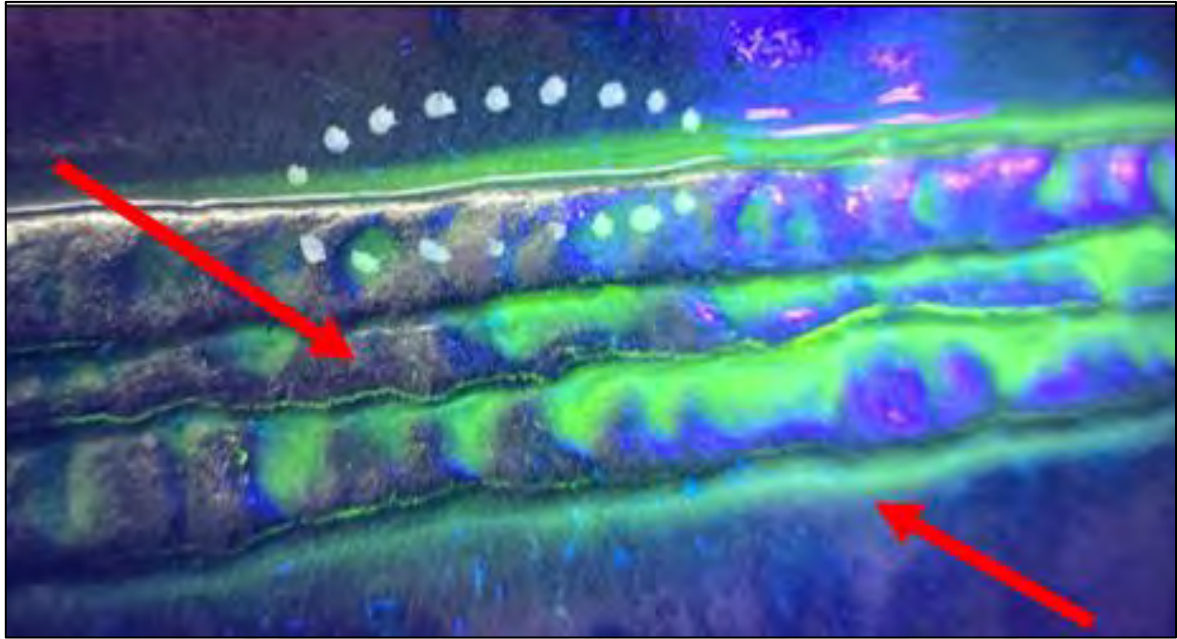


Figura 73. *Indicaciones lineales en el cordón de soldadura*

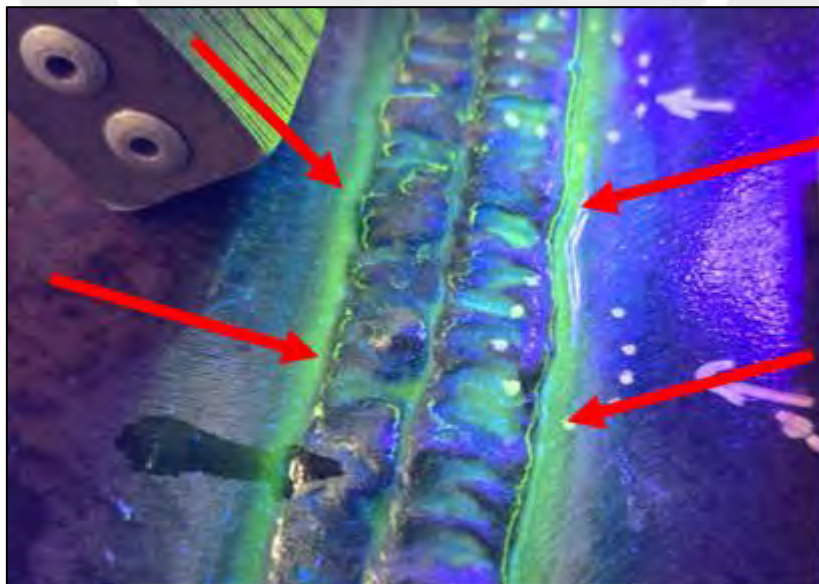


Figura 74. *Indicaciones lineales sobre el cordón de soldadura*

Las indicaciones estaban ubicadas en el redondeo más pronunciado en el refuerzo de soldadura y no en la zona ZAC que se ubica en el material base por lo cual se descarta el fenómeno de agrietamiento en frío en el material base.

Por último, como resultados de las pruebas radiográficas se observaron las siguientes indicaciones: 1. Presencia de socavaciones ya detectadas por inspección visual 2. Presencia de porosidad vermicular y su extensión 3. Presencia de una porosidad aislada.

Para el caso de la porosidad vermicular, ubicada en la placa WPS-02 en el tramo 0-1 a 6 cm del lado “0” de la placa (ver Figura 75), ubicada previamente por inspección visual como una porosidad individual se teoriza que las posibles causas de la aparición de esa porosidad es 1) interrupción del arco cuando se suelda el pase de acabado, lo cual genera un pase frío 2) presencia de exceso de antispatter en la boquilla de soldadura. La combinación de ambos elementos pudo generar gases de soldadura atrapados en el material lo cual generó la discontinuidad mencionada.

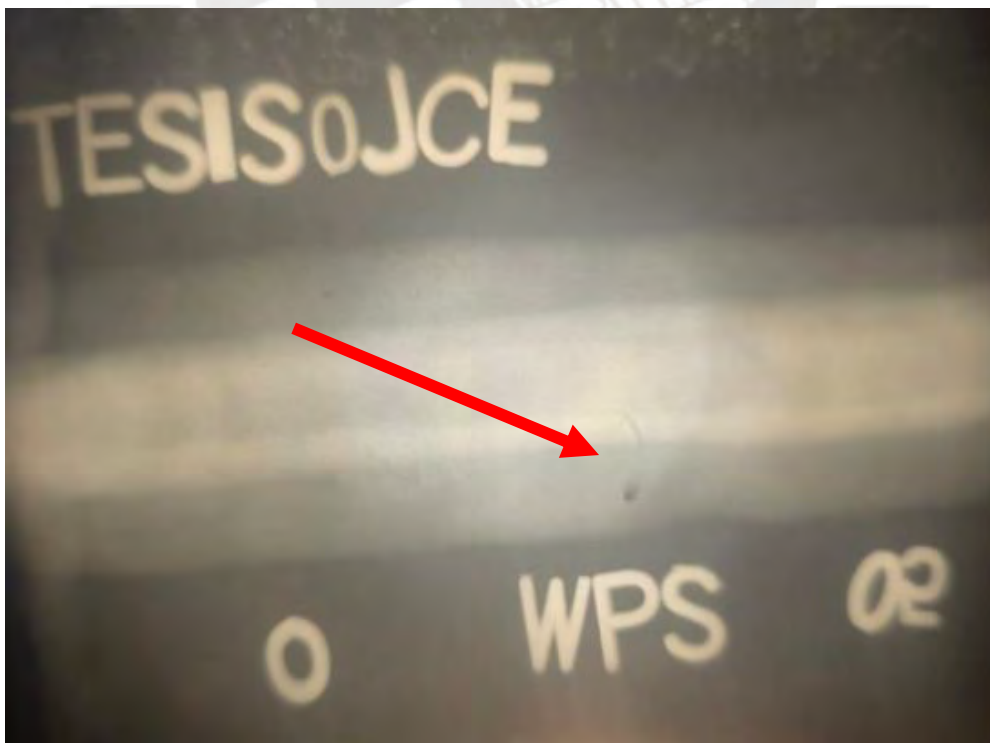


Figura 75. Porosidad vermicular en cupón WPS-02 soldado con FCAW

Asimismo, para el caso de la porosidad individual, esta fue detectada en el cupón WPS-01 en el tramo 0-1 a 10cm del extremo “0” (ver Figura 76). Esta porosidad tiene menos de 1mm de diámetro y no tiene influencia significativa si la soldadura trabajara en condiciones de servicio severas.

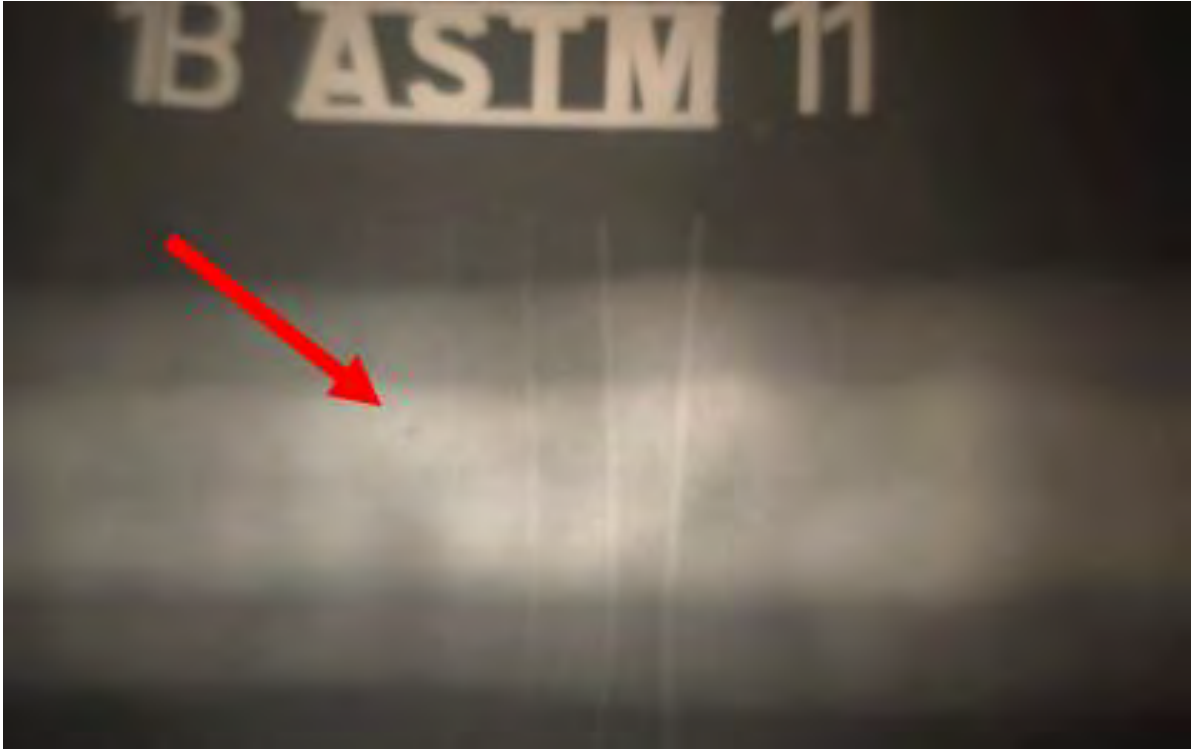


Figura 76. Porosidad individual en cupón WPS-01 soldado con FCAW-Hyperfill

3.5. Resultados de ensayos de doblado guiados

Para los ensayos correspondientes de doblado de cara y de raíz donde se utiliza un punzón y una matriz de guiado con dimensiones predeterminadas según norma. Para la ejecución de las pruebas, se utilizó un rodillo de 50 mm. Asimismo, dichas pruebas se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Materiales PUCP con la máquina de doblado del laboratorio (ver Figura 77). Se realizó un control dimensional de las probetas encontrándose que las dimensiones de las (04) probetas de cada cupón el ancho de las probetas se encuentra dentro de las medidas de $38 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ y el espesor de la probeta en $10 \pm 0.2 \text{ mm}$.

Producto de los ensayos se consiguieron los resultados correspondientes a cada cupón de soldadura, los cuales son presentados a continuación en la Tabla 25 y

Tabla 26. Para el proceso FCAW-Hyperfill se observó que las pruebas salieron conformes (ver Figura 78). Para el proceso FCAW de un solo alambre se observó que falló una prueba de doblado (ver Figura 79 y Figura 80).

Tabla 25

Resultados de ensayo de doblado de soldadura FCAW-G Hyperfill

Probeta 1 Doblado Cara	Probeta 2 Doblado Cara	Probeta 3 Doblado Raíz	Probeta 4 Doblado Raíz	Observación
C ¹	C ¹	C ¹	C ¹	Prueba conforme según AWS B2.1.

¹De las abreviaturas, “C” significa Conforme. “NC” significa No Conforme.



Figura 77. Ejecución de ensayo de doblado



Figura 78. Foto frontal de probetas de doblado de raíz – Soldadura FCAW-G Hyperfill

Tabla 26

Resultados de ensayo de doblado de Soldadura FCAW-G.

Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Conforme/No conforme
Doblado	Doblado	Doblado	Doblado	
Cara	Cara	Raíz	Raíz	
C ¹	C ¹	NC ¹	C ¹	Prueba no conforme según AWS B2.1. Probeta de doblado 3 rompe en superficie convexa.

¹De las abreviaturas, “C” significa Conforme. “NC” significa No Conforme.



Figura 79. *Probeta de doblado rota, proceso FCAW-G*



Figura 80. *Foto lateral de probeta de doblado rota, proceso FCAW-G.*

A fin de evaluar si para el proceso FCAW la rotura de la probeta es generada por discontinuidades internas en la soldadura no detectadas por los ENDS previamente ejecutados, se realizó un 3er ensayo de doblado cuya evidencia fotográfica y resultados se muestran en la Figura 81, Figura 82 y Tabla 27. Para este caso, se empleó un rodillo de doblado de 63 mm (límite superior máximo de diámetro de rodillo permitido para el material empleado. El código permite utilizar un rodillo de hasta 61 ± 3.2 mm de diámetro).

Tabla 27

Resultados de ensayo de doblado de probeta extra - Soldadura FCAW-G

Probeta 5	
Doblado	Conforme/No conforme
Raíz	
C¹	Prueba conforme según AWS B2.1. Probeta doblada no muestra discontinuidades en zona convexa.

¹De las abreviaturas, “C” significa Conforme. “NC” significa No Conforme.



Figura 81. *Ejecución de ensayo de doblado*



Figura 82. *Foto frontal de probeta extra de doblado de raíz FCAW-G*

3.6. Resultados de ensayos de tracción

Para el caso de ensayo de tracción, se validó que las dimensiones de las probetas cumplan con lo especificado según plano. Posterior a ello, se validó que las probetas después de la rotura cumplan con los criterios de aceptación según lo especificado en AWS B2.1, encontrándose la rotura en el material base (ver Figura 83). Los resultados de las pruebas de tracción se muestran tanto en la Tabla 28 como en la Tabla 29. Asimismo, se muestra una imagen de una probeta de tracción en la Figura 83.



Figura 83. Rotura dúctil de probeta de tracción en zona del material base

Tabla 28

Resultados de ensayo de tracción – Soldadura FCAW-G

Esfuerzo de tracción Probeta 1 [MPa]	Esfuerzo de tracción Probeta 2 [MPa]	Esfuerzo de tracción especificado EN ISO 10025-6 [MPa]	Observación
800.34	809.47	770 –940 MPa	Conforme. Cumple con los requisitos de AWS B2.1. Probetas rompen en el material base

Tabla 29

Resultados de ensayos de tracción - Soldadura FCAW-G Hyperfill

Esfuerzo de tracción Probeta 1 [MPa]	Esfuerzo de tracción Probeta 2 [MPa]	Esfuerzo de tracción especificado EN ISO 10025-6 [MPa]	Observación
812.51	818.51	770 –940 MPa	Conforme. Cumple con los requisitos de AWS B2.1. Probetas rompen en el material base

3.7. Resultados de ensayos de impacto

Para conseguir los resultados de ensayos de impacto en el centro del cordón como de la zona ZAC se procedió a atacar con nital al 5% cada probeta a ser mecanizada con el fin de revelar el cordón de soldadura. Una vez marcadas cada probeta a mecanizar, se procedió a extraer cada probeta mecanizada. Se validó que el control dimensional cumpla con los planos/esquemas de mecanizado así como la validación de la forma de la muesca en V y posteriormente se realizaron los ensayos de impacto a la temperatura definida en $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ver Figura 84, Figura 85, Figura 86 y Figura 87).



Figura 84. *Probeta con cordón de soldadura y zona zac revelados.*



Figura 85. *Probetas marcadas para mecanizado.*



Figura 86. *Probetas de impacto mecanizadas.*



Figura 87. *Detalle de entalla de probeta charpy-v*

Por último, después de proceder con la rotura de las probetas se procedió a realizar los ensayos de impacto correspondientes (ver Figura 88). Dichos resultados se muestran en las

Tabla 30 y Tabla 31. De los resultados, se observa que el proceso de soldadura FCAW-G Hyperfill no genera una soldadura que supere los 40 J de energía absorbida de impacto a -20 °C puesto que presenta valores promedio de 36.64 J.



Figura 88. *Probetas de impacto de cupón 1 (soldadura FCAW-G Hyperfill) puntos S4, S5 y S6 correspondientes a la zona ZAC.*

Nota. *Imagen tomada después de 4 días del ensayo*

Tabla 30

Resultados de ensayo de impacto – Soldadura FCAW-G Hyperfill.

Zona de ensayo	Punto	E(J)	Eprom. (J)	Requisitos de impacto a -20°C según EN 10025-6 (J)	Observación
Centro de cordón de soldadura	1	62.07	52.22	40	Ensayo no conforme. Energía de impacto absorbida en zona ZAC no alcanza los 40 J requeridos.
	2	47.81			
	3	46.78			
Zona ZAC	4	28.40			
	5	27.69	36.64		
	6	53.83			

Tabla 31

Resultados de ensayo de impacto - Soldadura FCAW-G

Zona de ensayo	Punto	E(J)	Eprom. (J)	Requisitos de impacto a -20°C según EN 10025-6 (J)	Observación
Centro de cordón de soldadura	1	51.84	81.11	40	Ensayo conforme. Cumple con lo mínimo requerido en el material base según EN 10025-6.
	2	86.47			
	3	105.01			
	4	99.96			
Zona ZAC	5	94.16	90.89		
	6	78.56			

3.8. Resultados de ensayos de macroataque

Para conseguir los resultados macrográficos se utilizó la etapa de revelado con nital al 5% para el barrido de durezas para obtener los resultados de las macrografías. Las imágenes de las probetas posterior al macroataque se muestran en la Figura 89 y Figura 90. Por último, se detallan los resultados del ensayo en Tabla 32.



Figura 89. *Probeta de barrido de durezas de cupón FCAW-G Hyperfill*



Figura 90. *Probeta de barrido de durezas de cupón FCAW-G*

Tabla 32

Resultados de macroataque tanto para FCAW-G Hyperfill como para FCAW-G

Item	Proceso de Soldadura	Resultados de ensayo de macroataque
1	FCAW-G Hyperfill	Conforme con AWS B2.1. Probeta no muestra discontinuidades.
2	FCAW-G	Conforme con AWS B2.1. Probeta no muestra discontinuidades.

3.9. Resultados de ensayos de barrido de durezas

Posterior al revelado de los cordones, cada probeta fue trazada en los ejes especificados por la ISO 9015-1 a 2 mm de la cara y raíz de soldadura (ver Figura 91). Una vez trazados, se procedió a ejecutar el ensayo de dureza vickers HV10.



Figura 91. *Marcado de probetas previo a la ejecución de ensayo de dureza Vickers*

Una vez realizado el trazado, se procedió a ejecutar el barrido de durezas. Los puntos 3-4-5 y 9-10-11 corresponden a la dureza de la zona ZAC. Los puntos 6-7-8 corresponde a dureza en el centro del cordón y puntos 1-2 y 12-13 corresponden a dureza en el material base. Los resultados se muestran en la Figura 92 y Figura 93.

Se observa tanto de la Figura 92 y Figura 93 que los valores de dureza máximos son 364 y 371 en la unión soldada. Como detalle a resaltar, el proceso FCAW-G Hyperfill presenta

una disminución de la dureza en la zona ZAC del lado de la cara de la raíz en su soldadura. Esta condición genera una entalla metalográfica (variación de las propiedades metalográficas y mecánicas en zonas adyacentes entre sí) lo cual podría contribuir a una baja resistencia al impacto.

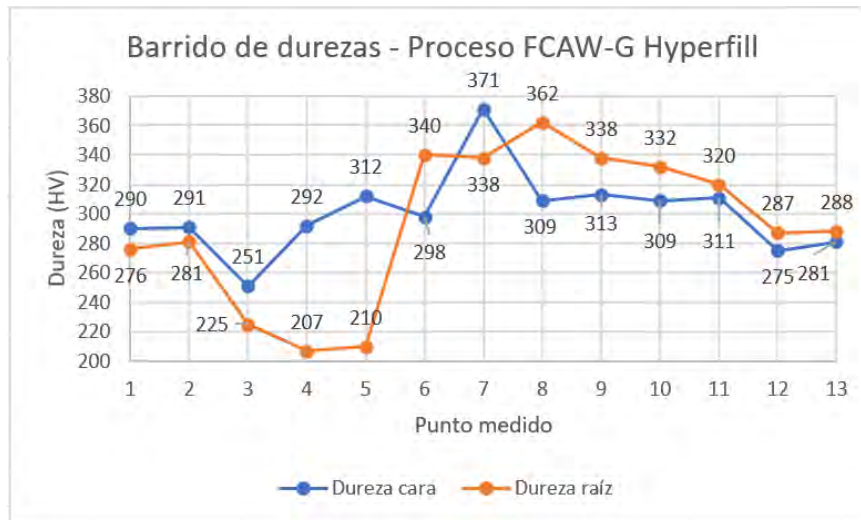


Figura 92. Barrido de durezas de proceso FCAW-G Hyperfill

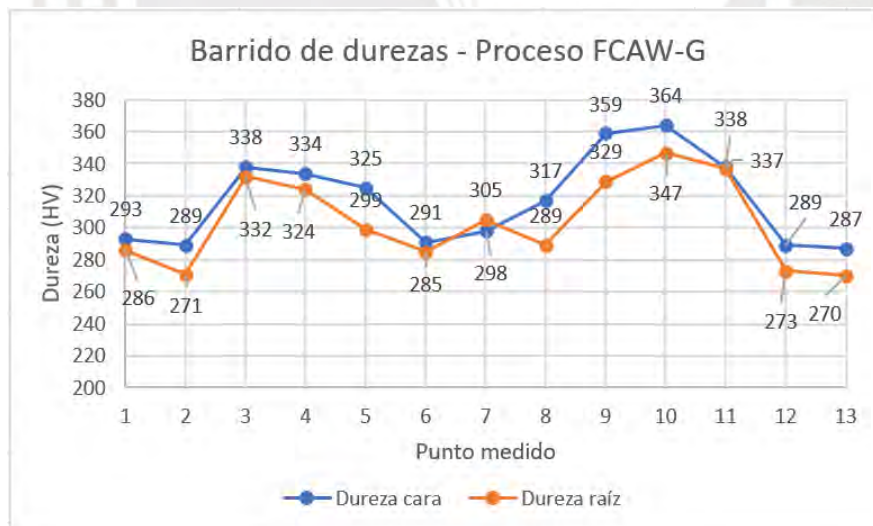


Figura 93. Barrido de durezas de proceso FCAW-G

3.10. PQR proceso de soldadura FCAW-HYPERFILL

A continuación, se muestra en la Figura 94 y Figura 95 el PQR en el primer cupón de soldadura (Soldadura FCAW-G HYPERFILL).


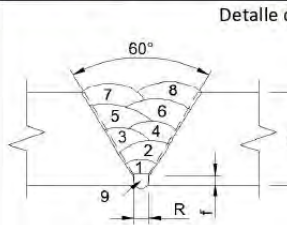
	REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) SEGÚN AWS B2.1 2014		Código	PQR-001			
			Revisión	0			
			Fecha	20/01/2025			
			Página	1 de 3			
Compañía	<u>PUCP</u>	Elaborado por:	<u>Oscar Carrera Escajadillo</u>				
Identificación WPS	<u>-</u>	Fecha	<u>20/01/2025</u>				
N° de rev	<u>0</u>	Fecha de rev.	<u>20/01/2025</u>				
PQR de respaldo	<u>PQR-001</u>	Tipo (s)	<u>Semiautomática</u>				
Procesos de soldadura	<u>FCAW-G-HYPERFILL</u>		<small>(Manual, Semiautomático, Mecanizado, Robotizado)</small>				
Diseño de junta (según 4.13.1)							
Diseño de junta	<u>A tope en V simple</u>						
Respaldo	Si <input type="checkbox"/>	No <input checked="" type="checkbox"/>					
Material del respaldo	<u>N/A</u>						
Ángulo de junta a soldar	<u>60°</u>						
Altura de talón (f)	<u>2.5 mm</u>						
Resane de raíz	Si <input checked="" type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>					
Método de resane de raíz	<u>Amolado (Grinding)</u>						
Metales base (según 4.13.2)							
M-No.	<u>No enlistado</u>	Grupo No.	<u>No enlistado</u>	Soldado a M-No.	<u>No enlistado</u>	Grupo No.	<u>No enlistado</u>
Especificación tipo y grado	<u>EN 10025-6 S690QL</u>		Especificación tipo y grado		<u>EN 10025-6 S690QL</u>		
Rango de espesores del material base:	A tope	<u>3/16" a 2T (1 1/2")</u>		Filete	<u>---</u>		
Metal depositado:	A tope	<u>---</u>		Filete	<u>---</u>		
Rango de diámetro de tubería	A tope	<u>---</u>		Filete	<u>---</u>		
Resistencia a la tracción	<u>847.63 MPa</u>		Documento de ref.		<u>---</u>		
Resistencia mínima especificada a la tracción	<u>690 MPa</u>		Documento de ref.		<u>EN 10025-6</u>		
Análisis químico - documento de referencia	<u>MAT-Lab-4.123</u>		Rev		<u>1</u>	Fecha <u>12/06/2024</u>	
Carbono equivalente CE	<u>0.39%</u>		Documento de ref.		<u>---</u>		
Material de aporte (según 4.13.3)							
Proceso de soldadura	<u>FCAW-G HYPERFILL</u>						
Especificación AWS	<u>AWS A5.29</u>						
Clasificación AWS	<u>E111T1-K3M-JH4</u>						
F-No.	<u>6</u>						
A-No.	<u>1</u>						
Diámetro metal de aporte	<u>.045" (1.1 mm)</u>						
Nombre comercial alambre	<u>UltraCore 111K3M-H Plus</u>						
Metal depositado	<u>20mm (3/4")</u>						
Nombre comercial fundente	<u>---</u>						
Inserto consumible	<u>---</u>						
Otro	<u>---</u>						
Elaborado por:	Revisado por:		Aprobado por:				
Oscar Carrera Escajadillo	Oscar Carrera Escajadillo		Oscar Carrera Escajadillo				
Fecha: 20.07.2025	Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025				



Figura 94. PQR proceso FCAW-HYPERFILL. Primera página



	REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) SEGÚN AWS B2.1 2014		Código	PQR-001					
			Revisión	0					
			Fecha	20/01/2025					
			Página	2 de 3					
Posición de soldadura (según 4.13.4)		Pre calentamiento (según 4.13.5)							
Posición de soldadura a tope	<u>Vertical</u>	Temperatura de pre calentamiento (Mín.)	<u>175 °C</u>						
Posición de soldadura a filete	<u>---</u>	Temperatura de pre calentamiento	<u>175 °C</u>						
Progresión de soldadura	<u>Ascendente</u>	Temperatura de interpase (Máximo)	<u>230 °C</u>						
PWHT (según 4.13.6)		Distancia de verificación pre calentamiento	<u>Armado a 1"</u>						
Temperatura	<u>---</u>		<u>Soldeo a 3"</u>						
Tiempo	<u>---</u>								
Gas de protección (según 4.13.7)									
	Protección antorcha	Protección raíz - respaldo	Protección arrastre						
Gases	<u>SG - M20</u>	<u>---</u>	<u>---</u>						
Composición %	<u>90% Ar / 10% CO2</u>	<u>---</u>	<u>---</u>						
Caudal	<u>20-25 LPM</u>	<u>---</u>	<u>---</u>						
Características eléctricas (según 4.13.8)		Otras variables (según 4.13.9)							
Tipo de corriente / polaridad	<u>CCEP - DC - CV</u>	Tamaño de tobera	<u>Ø 5/8"</u>						
Corriente pulsada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Collet body	<input type="checkbox"/>	Gas lens <input type="checkbox"/>					
Rango de amperaje	<u>VER TABLA 1</u>	Técnica:	Oscilante <input type="checkbox"/>	Recta <input checked="" type="checkbox"/>					
Rango de voltaje	<u>VER TABLA 1</u>	Método de limpieza	<u>Amolado (raíz - backgouging)</u> <u>Escobillado (relleno + acabado)</u>						
Rango de alimentación de alambre	<u>VER TABLA 1</u>	Número de electrodos / alambres	<u>1</u>						
Tamaño / tipo electrodo tungsteno	<u>N/A</u>	Pasada única	<input type="checkbox"/>	o Multipase <input checked="" type="checkbox"/>					
Parámetros pulsados	<u>---</u>	Stickout eléctrico	<u>3/8" a 1/2"</u>						
Modo de transferencia	<u>Globular</u>	Otros:							
Otros:									
Tabla 1 - Parámetros de soldadura									
Pase	Proceso	Metal de aporte		Parámetros eléctricos					
		Clase AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)	Velocidad alim. Alambre (IPM)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (cm/min)	Heat input (KJ/mm)
1	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	193-204	160	21.1-22.5	10	2.21
2	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	239-250	200	23.4-24.7	9.9	3.00
3-4	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	225-235	180	21.3-23.9	19.3-20.2	1.34
5-8	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	220-233	166	22.8-23.5	19.5-24	1.32
9	FCAW-G-HYPERFILL	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	222-231	169	23.1-23.5	16.2	1.61
\		Revisado por	Aprobado por:						
Fecha: 20.07.2025		Oscar Carrera Escjadillo	Oscar Carrera Escjadillo						
Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025	Fecha: 20.07.2025						

Figura 95. PQR proceso FCAW-HYPERFILL. Segunda página.

	REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) SEGÚN AWS B2.1 2014				Código	PQR-001
					Revisión	0
					Fecha	20/01/2025
					Página	3 de 3
Datos de soldador			Datos de prueba			
Nombre soldador	Geniel Sinuiri Guerra		Código de WPS	pWPS-001		
Código de estampa	GSG87		Código de PQR	PQR-001		
Compañía	Lincoln Electric		Fecha de soldeo de cupón	7/01/2025		
Resultados de ensayos no destructivos						
Tipo de prueba	Ensayista	Criterio de aceptación	Resultados	Observaciones		
Inspección Visual	O.C.	AWS B2.1/2.1M:2014	C	Presenta socavaciones de 0.4 y 0.6mm		
Tintes penetrantes	O.C.	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---		
Partículas magnéticas	M.C.	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---		
Radiografía	R.H.	AWS D1.1/1.1M:2020	C	Presenta porosidad interna menor a 1 mm. Ensayo no requerido en calificación		
Ultrasonido	---	---	---	---		
Resultados de ensayos destructivos - doblado						
Tipo de prueba	Ensayista	Tipo de probeta	Crit. Accept.	Resultados	Observaciones	
Doblado - probeta 1	R.H.	Doblado de cara	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---	
Doblado - probeta 2	R.H.	Doblado de cara	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---	
Doblado - probeta 3	R.H.	Doblado de raíz	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---	
Doblado - probeta 4	R.H.	Doblado de raíz	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---	
Doblado - probeta 5	---	---	---	---	---	
Resultados de ensayos destructivos - tracción						
Tipo de prueba	Ensayista	Ancho	Espesor	Fluencia	Tracción	Resultados
Tracción - probeta 1	R.H.	38.14	10.08	---	812.51MPa	Conforme. Falla en el material base
Tracción - probeta 2	R.H.	38.07	10.15	---	812.51MPa	Conforme. Falla en el material base
Resultados de ensayos destructivos - impacto						
Tipo de prueba	Ensayista	Zona ensayada	Temperatura	Valor	Promedio	Resultado
Charpy - probeta 1	A.R.	Centro cordon	-20°C	62.07	52.22	Conforme
Charpy - probeta 2	A.R.	Centro cordon	-20°C	47.81		
Charpy - probeta 3	A.R.	Centro cordon	-20°C	46.78		
Charpy - probeta 1	A.R.	Zona ZAC	-20°C	28.4	36.64	No conforme. No alcanza los 40J requeridos
Charpy - probeta 2	A.R.	Zona ZAC	-20°C	27.69		
Charpy - probeta 3	A.R.	Zona ZAC	-20°C	53.83		
Elaborado por:		Revisado por		Aprobado por:		
Oscar Carrera Escajadillo		Oscar Carrera Escajadillo		Oscar Carrera Escajadillo		
Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025		

Nosotros, los firmantes, certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras fueron preparadas, soldadas y probadas en conformidad con los requisitos por AWS B2.1/2.1M 2014, Especificación para la calificación del procedimiento y del desempeño de la soldadura.



Figura 96. PQR Proceso FCAW-HYPERFILL. Tercera página. Resultado de ensayos.

3.11. PQR proceso de soldadura FCAW

A continuación, se muestra en las Figura 97 y Figura 98 el PQR del segundo cupón de soldadura (Soldadura FCAW-G).


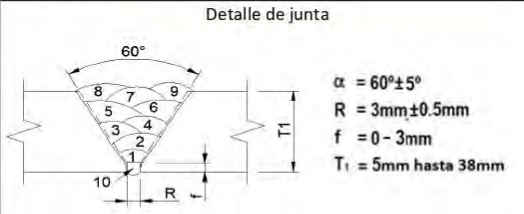

		REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) SEGÚN AWS B2.1 2014		Código	PQR-002
				Revisión	0
		Fecha	20/01/2025	Página	1 de 3
Compañía	<u>PUCP</u>	Elaborado por:	<u>Oscar Carrera Escajadillo</u>		
Identificación WPS	<u>-</u>	Fecha	<u>20/01/2025</u>		
N° de rev	<u>0</u>	Fecha de rev.	<u>20/01/2025</u>		
PQR de respaldo	<u>PQR-002</u>	Tipo (s)	<u>Semiautomático</u>		
Procesos de soldadura	<u>FCAW-G</u>		<small>(Manual, Semiautomático, Mecanizado, Robotizado)</small>		
Diseño de junta (según 4.13.1)					
Diseño de junta	<u>A tope en V simple</u>				
Respaldo	Si <input type="checkbox"/>	No <input checked="" type="checkbox"/>			
Material del respaldo	<u>N/A</u>				
Ángulo de junta a soldar	<u>60°</u>				
Altura de talón (f)	<u>2.5 mm</u>				
Resane de raíz	Si <input checked="" type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>			
Método de resane de raíz	<u>Amolado (Grinding)</u>				
Metales base (según 4.13.2)					
M-No.	<u>No enlistado</u>	Grupo No.	<u>No enlistado</u>	Soldado a M-No.	<u>No enlistado</u>
Especificación tipo y grado	<u>EN 10025-6 S690QL</u>		Especificación tipo y grado	<u>EN 10025-6 S690QL</u>	
Rango de espesores del material base:	A tope	<u>3/16" a 2T (1 1/2")</u>	Filete	---	
Metal depositado:	A tope	---	Filete	---	
Rango de diámetro de tubería	A tope	---	Filete	---	
Resistencia a la tracción	<u>847.63 MPa</u>		Documento de ref.	---	
Resistencia mínima especificada a la tracción	<u>690 MPa</u>		Documento de ref.	<u>EN 10025-6</u>	
Análisis químico - documento de referencia	<u>MAT-Lab-4.123</u>		Rev	<u>1</u>	Fecha <u>12/06/2024</u>
Carbono equivalente CE	<u>0.39%</u>		Documento de ref.	---	
Material de aporte (según 4.13.3)					
Proceso de soldadura	<u>FCAW-G</u>				
Especificación AWS	<u>AWS A5.29</u>				
Clasificación AWS	<u>E111T1-K3M-JH4</u>				
F-No.	<u>6</u>				
A-No.	<u>1</u>				
Diámetro metal de aporte	<u>.045" (1.1 mm)</u>				
Nombre comercial alambre	<u>UltraCore 111K3M-H Plus</u>				
Metal depositado	<u>20mm (3/4")</u>				
Nombre comercial fundente	---				
Inserto consumible	---				
Otro	---				
Elaborado por:	Revisado por:		Aprobado por:		
Oscar Carrera Escajadillo	Oscar Carrera Escajadillo		Oscar Carrera Escajadillo		
Fecha: 20.07.2025	Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025		
					

Figura 97. PQR proceso FCAW. Primera página



	REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) SEGÚN AWS B2.1 2014		Código	PQR-002					
			Revisión	0					
			Fecha	20/01/2025					
			Página	2 de 3					
Posición de soldadura (según 4.13.4)		Pre calentamiento (según 4.13.5)							
Posición de soldadura a tope	<i>Vertical</i>	Temperatura de pre calentamiento (Mín.)	<i>175 °C</i>						
Posición de soldadura a filete	---	Temperatura de pre calentamiento	<i>175 °C</i>						
Progresión de soldadura	<i>Ascendente</i>	Temperatura de interpase (Máximo)	<i>230 °C</i>						
PWHT (según 4.13.6)		Distancia de verificación pre calentamiento	<i>Armado a 1"</i>						
Temperatura	---		<i>Soldeo a 3"</i>						
Tiempo	---								
Gas de protección (según 4.13.7)									
	Protección antorcha	Protección raíz - respaldo	Protección arrastre						
Gases	<i>SG - M20</i>	---	---						
Composición %	<i>90% Ar / 10% CO2</i>	---	---						
Caudal	<i>20-25 LPM</i>	---	---						
Características eléctricas (según 4.13.8)		Otras variables (según 4.13.9)							
Tipo de corriente / polaridad		<i>CCEP - DC - CV</i>							
Corriente pulsada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Tamaño de tobera	<i>Ø 5/8"</i>						
Rango de amperaje	<i>VER TABLA 1</i>	Collet body	<input type="checkbox"/>	Gas lens <input type="checkbox"/>					
Rango de voltaje	<i>VER TABLA 1</i>	Técnica:	Oscilante <input type="checkbox"/>	Recta <input checked="" type="checkbox"/>					
Rango de alimentación de alambre	<i>VER TABLA 1</i>	Método de limpieza	<i>Amolado (raíz - backgouging)</i> <i>Escobillado (relleno + acabado)</i>						
Tamaño / tipo electrodo tungsteno	<i>N/A</i>	Número de electrodos / alambres	<i>1</i>						
Parámetros pulsados	---	Pasada única	<input type="checkbox"/>	o Multipase <input checked="" type="checkbox"/>					
Modo de transferencia	<i>Globular</i>	Stickout electrico	<i>3/8" a 1/2"</i>						
Otros:		Otros:							
Tabla 1 - Parámetros de soldadura									
Pase	Proceso	Metal de aporte		Parámetros eléctricos				Velocidad de avance (cm/min)	Heat input (KJ/mm)
		Clase AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)	Velocidad alim. Alambre (IPM)	Voltaje (V)		
<i>1</i>	<i>FCAW-G</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>145-160</i>	<i>250</i>	<i>20.2-20.6</i>	<i>12.4</i>	<i>1.3</i>
<i>2-3</i>	<i>FCAW-G</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>180-190</i>	<i>300-320</i>	<i>25.3-26</i>	<i>17-20.5</i>	<i>1.4</i>
<i>4-7</i>	<i>FCAW-G</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>180-200</i>	<i>323</i>	<i>24.9-25.3</i>	<i>19-21</i>	<i>1.2</i>
<i>8-9</i>	<i>FCAW-G</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>170-180</i>	<i>300</i>	<i>24.3-24.6</i>	<i>22.5-22.8</i>	<i>0.9</i>
<i>10</i>	<i>FCAW-G</i>	<i>E111T1-K3M-JH4</i>	<i>1.1</i>	<i>CCEP</i>	<i>180-190</i>	<i>300</i>	<i>24.3-24.6</i>	<i>4.2</i>	<i>1.2</i>
Elaborado por:		Revisado por:		Aprobado por:					
Oscar Carrera Escajadillo		Oscar Carrera Escajadillo		Oscar Carrera Escajadillo					
Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025					

Figura 98. PQR proceso FCAW. Segunda página

	REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) SEGÚN AWS B2.1 2014				Código	PQR-002
					Revisión	0
					Fecha	20/01/2025
					Página	3 de 3
Datos de soldador			Datos de prueba			
Nombre soldador	Geniel Sinuiri Guerra		Código de WPS	pWPS-002		
Código de estampa	GSG		Código de PQR	PQR-002		
Compañía	Ascendente		Fecha de soldeo de cupón	16/01/2025		
Resultados de ensayos no destructivos						
Tipo de prueba	Ensayista	Criterio de aceptación	Resultados	Observaciones		
Inspección Visual	O.C.	AWS B2.1/2.1M:2014	C	Presenta porosidad en zona a descartar <1mm		
Tintes penetrantes	O.C.	AWS B2.1/2.1M:2014	C	Presenta socavaciones no detectadas por VT		
Partículas magnéticas	M.C.	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---		
Radiografía	R.H.	AWS D1.1/1.1M:2020	C	Presenta porosidad vermicular en zona a descartar. Ensayo no requerido en calificación.		
Ultrasonido	---	---	---	---		
Resultados de ensayos destructivos - doblado						
Tipo de prueba	Ensayista	Tipo de probeta	Crit. Acept.	Resultados	Observaciones	
Doblado - probeta 1	R.H.	Doblado de cara	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---	
Doblado - probeta 2	R.H.	Doblado de cara	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---	
Doblado - probeta 3	R.H.	Doblado de raíz	AWS B2.1/2.1M:2014	NC	Falla por discontinuidad. Se realiza prueba adicional #05	
Doblado - probeta 4	R.H.	Doblado de raíz	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---	
Doblado - probeta 5	R.H.	Doblado de raíz	AWS B2.1/2.1M:2014	C	---	
Resultados de ensayos destructivos - tracción						
Tipo de prueba	Ensayista	Ancho	Espesor	Fluencia	Tracción	Resultados
Tracción - probeta 1	R.H.	38.05	10.02	---	800.34MPa	Conforme. Falla en el material base
Tracción - probeta 2	R.H.	38.13	10.07	---	809.47MPa	Conforme. Falla en el material base
Resultados de ensayos destructivos - impacto						
Tipo de prueba	Ensayista	Zona ensayada	Temperatura	Valor	Promedio	Resultado
Charpy - probeta 1	A.R.	Centro cordon	-20°C	51.84	81.11	Conforme
Charpy - probeta 2	A.R.	Centro cordon	-20°C	86.47		
Charpy - probeta 3	A.R.	Centro cordon	-20°C	105.01		
Charpy - probeta 1	A.R.	Zona ZAC	-20°C	99.96	90.89	Conforme
Charpy - probeta 2	A.R.	Zona ZAC	-20°C	94.16		
Charpy - probeta 3	A.R.	Zona ZAC	-20°C	78.56		

Nosotros, los firmantes, certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras fueron preparadas, soldadas y probadas en conformidad con los requisitos por AWS B2.1/2.1M 2014, Especificación para la calificación del procedimiento y del desempeño de la soldadura.

Elaborado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 20.07.2025	Revisado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 20.07.2025	Aprobado por: Oscar Carrera Escajadillo Fecha: 20.07.2025
---	--	--




Figura 99. PQR proceso FCAW. Tercera página. Resultado de ensayos.

3.12. Emisión de WPS aprobados – proceso FCAW-G

Se concluye que el proceso FCAW-G definido en el PQR cumple con los requisitos de la AWS B2.1 para calificación de proceso de soldadura, por lo que se procede a emitir un WPS firmado por personal calificado correspondiente (ver Figura 100 y Figura 101).



	CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) SEGÚN AWS B2.1 2014		Código	WPS-002			
			Revisión	0			
			Fecha	21/07/2025			
			Página	1 de 2			
Compañía	<u>PUCP</u>	Elaborado por:	<u>Oscar Carrera Escajadillo</u>				
Identificación WPS	<u>-</u>	Fecha	<u>21/07/2025</u>				
N° de rev	<u>0</u>	Fecha de rev.	<u>21/07/2025</u>				
PQR de respaldo	<u>WPS-002</u>	Tipo (s)	<u>Semiautomático</u>				
Procesos de soldadura	<u>FCAW-G</u>	<small>(Manual, Semiautomático, Mecanizado, Robotizado)</small>					
Diseño de junta (según 4.13.1)							
Diseño de junta	<u>A tope en V simple</u>						
Respaldo	Si <input type="checkbox"/>	No <input checked="" type="checkbox"/>					
Material del respaldo	<u>N/A</u>						
Ángulo de junta a soldar	<u>60°</u>						
Altura de talón (f)	<u>0-3 mm</u>						
Resane de raíz	Si <input checked="" type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>					
Método de resane de raíz	<u>Amolado (Grinding)</u>						
Metales base (según 4.13.2)							
M-No.	<u>No enlistado</u>	Grupo No.	<u>No enlistado</u>	Soldado a M-No.	<u>No enlistado</u>	Grupo No.	<u>No enlistado</u>
Especificación tipo y grado	<u>EN 10025-6 S690QL</u>		Especificación tipo y grado		<u>EN 10025-6 S690QL</u>		
Rango de espesores del material base:	A tope	<u>3/16" a 2T (1 1/2")</u>	Filete	<u>---</u>			
Metal depositado:	A tope	<u>---</u>	Filete	<u>---</u>			
Rango de diámetro de tubería	A tope	<u>---</u>	Filete	<u>---</u>			
Resistencia a la tracción	<u>847.63 MPa</u>		Documento de ref.	<u>---</u>			
Resistencia mínima especificada a la tracción	<u>690 MPa</u>		Documento de ref.	<u>EN 10025-6</u>			
Análisis químico - documento de referencia	<u>MAT-Lab-4.123</u>		Rev	<u>1</u>	Fecha	<u>12/06/2024</u>	
Carbono equivalente CE	<u>0.39%</u>		Documento de ref.	<u>---</u>			
Material de aporte (según 4.13.3)							
Proceso de soldadura	<u>FCAW-G</u>						
Especificación AWS	<u>AWS A5.29</u>						
Clasificación AWS	<u>E111T1-K3M-JH4</u>						
F-No.	<u>6</u>						
A-No.	<u>1</u>						
Diámetro metal de aporte	<u>.045" (1.1 mm)</u>						
Nombre comercial alambre	<u>UltraCore 111K3M-H Plus</u>						
Metal depositado	<u>20mm (3/4")</u>						
Nombre comercial fundente	<u>---</u>						
Inserto consumible	<u>---</u>						
Otro	<u>---</u>						
Elaborado por:	Revisado por	Aprobado por:					
Oscar Carrera Escajadillo	Oscar Carrera Escajadillo	Oscar Carrera Escajadillo					
Fecha: 20.07.2025	Fecha: 20.07.2025	Fecha: 20.07.2025					

Figura 100. WPS-002. Proceso FCAW-G. Primera página



	CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) SEGÚN AWS B2.1 2014			Código	PQR-002				
				Revisión	0				
				Fecha	20/01/2025				
				Página	2 de 2				
Posición de soldadura (según 4.13.4)		Pre calentamiento (según 4.13.5)							
Posición de soldadura a tope	<u>Vertical</u>	Temperatura de pre calentamiento (Mín.)	<u>140-210 °C</u>						
Posición de soldadura a filete	<u>---</u>	Temperatura de pre calentamiento	<u>140-210 °C</u>						
Progresión de soldadura	<u>Ascendente</u>	Temperatura de interpase (Máximo)	<u>230 °C</u>						
PWHT (según 4.13.6)		Distancia de verificación pre calentamiento	<u>Armado a 1"</u>						
Temperatura	<u>---</u>		<u>Soldeo a 3"</u>						
Tiempo	<u>---</u>								
Gas de protección (según 4.13.7)									
	Protección antorcha	Protección raíz - respaldo	Protección arrastre						
Gases	<u>SG - M20</u>	<u>---</u>	<u>---</u>						
Composición %	<u>90% Ar / 10% CO2</u>	<u>---</u>	<u>---</u>						
Caudal	<u>18-33.75 LPM</u>	<u>---</u>	<u>---</u>						
Características eléctricas (según 4.13.8)			Otras variables (según 4.13.9)						
Tipo de corriente / polaridad	<u>CCEP - DC - CV</u>		Tamaño de tobera	<u>Ø 5/8"</u>					
Corriente pulsada	Si <input type="checkbox"/>	No <input checked="" type="checkbox"/>	Collet body	<input type="checkbox"/>	Gas lens <input type="checkbox"/>				
Rango de amperaje	<u>VER TABLA 1</u>		Técnica:	Oscilante <input type="checkbox"/>	Recta <input checked="" type="checkbox"/>				
Rango de voltaje	<u>VER TABLA 1</u>		Método de limpieza	<u>Amolado (raíz - backgoughing)</u> <u>Escobillado (relleno + acabado)</u>					
Rango de alimentación de alambre	<u>VER TABLA 1</u>		Número de electrodos / alambres	<u>1</u>					
Tamaño / tipo electrodo tungsteno	<u>N/A</u>		Pasada única	<input type="checkbox"/>	o Multipase <input checked="" type="checkbox"/>				
Parámetros pulsados	<u>---</u>		Stickout electrico	<u>3/8" a 1/2"</u>					
Modo de transferencia	<u>Globular</u>		Otros:						
Otros:			Otros:						
Tabla 1 - Parámetros de soldadura									
Pase	Proceso	Metal de aporte		Parámetros eléctricos				Velocidad de avance (cm/min)	Heat input (KJ/mm)
		Clase AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)	Velocidad alim. Alambre (IPM)	Voltaje (V)		
1	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	122-183	200-300	19.0-24.4	10.0-14.8	1.3 máx.
2-3	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	148-222	240-372	20.6-30.8	15-22.5	1.4 máx.
4-7	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	152-228	259-387	20.1-30.1	16-24	1.2 máx.
8-9	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	140-210	240-360	19.6-29.3	18.2-27.1	0.9 máx.
10	FCAW-G	E111T1-K3M-JH4	1.1	CCEP	148-222	240-360	19.6-29.3	14.9-22.3	1.2 máx.
Elaborado por:		Revisado por:		Aprobado por:					
Oscar Carrera Escajadillo		Oscar Carrera Escajadillo		Oscar Carrera Escajadillo					
Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025		Fecha: 20.07.2025					

Figura 101. WPS-002. Proceso FCAW-G. Segunda página.

3.13. Discusión de resultados – proceso FCAW-G Hyperfill

Como resultados de la calificación del material para el proceso FCAW-G Hyperfill, se concluye que solamente para el proceso FCAW-G Hyperfill las variables esenciales y no esenciales definidas en el WPS preliminar y empleadas en la ejecución del PQR no son adecuadas para poder conseguir soldaduras conformes a lo especificado por el código de soldadura AWS B2.1. Si bien las pruebas de doblado, tracción y macrografía para FCAW-G Hyperfill fueron satisfactorias, llegando a conseguir la conformidad en cada una de los ensayos, se detectaron anomalías en el barrido de durezas y ensayo de impacto. Se busca que un cordón de soldadura sea igual o más resistente que el material base. No obstante, para la temperatura de impacto ensayada a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ la norma EN 10025-6 especifica que el valor de energía absorbida por impacto mínimo sea de 40 J, mientras que lo conseguido experimentalmente supera los 36 J. Este valor inferior de energía absorbida por impacto se justifica mediante lo obtenido en el barrido de durezas para el proceso FCAW-G Hyperfill: al existir una entalla metalográfica entre la zona ZAC y el baño de fusión ello genera una disminución de la tenacidad a la fractura del material.

Una de las causas que genera la disminución de la tenacidad a la fractura en la zona ZAC es la generación de altos valores de Heat Input inherentes al proceso Hyperfill sumados a la condición de soldadura vertical ascendente sin backing. Al momento de realizar el soldeo, el alto heat input generó que se fundiera el bisel en la raíz. Como consecuencia de ello, el soldador disminuyó la velocidad de avance para poder generar la superficie sólida, coloquialmente conocido como “cama de soldadura” para poder soportar los pases de relleno y para ello requirió ejecutar dos pases de raíz. Esta condición generó que se presentaran altos valores de Heat Input, entre 2-3 kJ/mm, generando la entalla metalográfica en la unión soldada.

Las estrategias para disminuir el Heat Input en la unión pueden ser dos: primera opción – disminuir voltaje y amperaje o segunda opción – aumentar la velocidad de avance. A diferencia de soldar en posición plana/horizontal, soldar en posición vertical ascendente limita dicha estrategia puesto que la antorcha avanza a medida que el baño de fusión va solidificando. La estrategia de aumentar la velocidad de avance no pudo ser aplicada por la limitación de la posición de la soldadura para el pase de raíz y por la ausencia de backing que permitiera soportar el baño de fusión. Cuando existe un backing para el diseño de junta, este sirve para 1) soportar el peso del metal que va solidificando y 2) parcialmente absorber el calor del baño de fusión y distribuirlo al medio ambiente y al material base más rápidamente, a fin de que este solidifique más rápido. Por ello mismo, el uso de backing puede ser utilizado como herramienta en futuras ejecuciones de uniones soldadas con Hyperfill para aumentar la velocidad de avance y poder obtener menores valores de Heat Input.

3.14. Análisis económico de los procesos de soldadura

- **Cálculo de tasa de deposición D (kg/h)**

Para el cálculo del valor de tasa de deposición para un cupón de 60 cm de largo con diseño de junta a tope en V con altura de talón de 2.5 mm y separación de 3 mm, se tomó en cuenta la forma final de los cordones. Ambos cordones de soldadura dejaron una sobremonta promedio en la cara y en la raíz de 2.5 y 2.0 mm correspondientemente. El esquema del diseño de junta con las dimensiones consideradas se muestra en la Figura 102. El valor final de la tasa de deposición se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33

Memoria de cálculo de tasa de deposición D (kg/h)

Variable	Descripción	Unidades	Fórmula	FCAW-G Hyperfill	FCAW-G
L	Largo de cupón de soldadura	m	---	0.6	0.6
A1	Area 1 de sección de soldadura	mm ²	---	42	42
A2	Area 2 de sección de soldadura	mm ²	---	215.34	215.34
A3	Area 3 de sección de soldadura	mm ²	---	17	17
S	Área de sección de soldadura	mm ²	---	274.34	274.34
Vsold	Volumen de soldadura	m ³	$S*L*1000$	1.65E-04	1.65E-04
p.acero	Densidad de acero	kg/m ³	---	7850	7850
Wsold	Peso cordón de soldadura	kg	$p.acero*Vsold$	1.29	1.29
t	Tiempo de arco encendido	h	---	0.37	0.465
D	Tasa de deposición	kg/h	$Wsold*t$	3.49	2.78

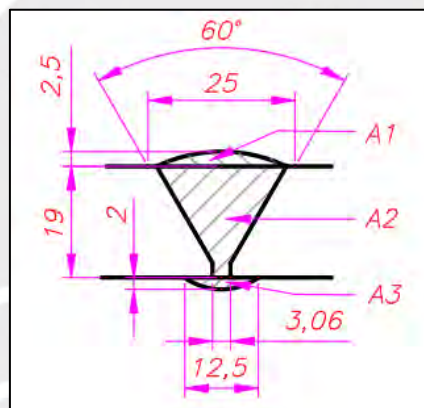


Figura 102. Esquema de cordón de soldadura generado con ambos procesos de soldadura

- **Costo de gas por unidad de peso de metal depositado C_{gas} (\$/kg)**

Para el cálculo de costo de gas ya que el balón de gas fue de préstamo, se define el valor de C_{gas} a 0 \$/kg, tal y como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34

Memoria de cálculo costo de gas por unidad de peso de metal depositado C_{gas} (\$/kg)

Variable	Descripción	Unidades	Fórmula	FCAW-G Hyperfill	FCAW-G
Cbotella	Costo de botella de gas	\$	---	0	0
Vol.botella	Volumen de botella	m ³	---	20	20
G	Costo de gas por unidad de volumen	\$/m ³	---	0	0
F	Caudal de gas	m ³ /h	---	20	20
D	Tasa de deposición	kg/h	---	3.49	2.78
Cgas	Costo de gas por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	$G * F / D$	0	0

- **Costo de energía por unidad de peso de metal depositado C_{power} (\$/kg)**

Para evaluar el costo de energía, se define un valor promedio de energía en 0.2\$/kWh. Este valor puede variar dependiendo del consumo de una planta metalmeccánica así como el tipo de tarifa eléctrica contratada. Se utilizaron además valores promedio de Voltaje y Amperaje registrados en los PQR para el cálculo. El valor final calculado se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35

Memoria de cálculo costo de energía por unidad de peso de metal depositado C_{power} (\$/kg)

Variable	Descripción	Unidades	Fórmula	FCAW-G Hyperfill	FCAW-G
P	Costo de energía	\$/kWh	---	0.2	0.2
V	Voltaje	V	---	23	24.5
A	Amperaje	A	---	226	187
D	Tasa de deposición	kg/h	---	3.49	2.78
Cpower	Costo de energía por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	$P * V * A / (1000 * D)$	0.30	0.33

- **Costo de material de aporte por unidad de peso de metal depositado $C_{material}$ (\$/kg)**

Cada alambre de 15 kg costó aproximadamente \$234.92 + IGV. Con dicho dato se procedió a calcular el costo Cmat. El valor final se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36

Memoria de cálculo costo de material de aporte por unidad de peso de metal depositado
Cmaterial (\$/kg)

Variable	Descripción	Unidades	Fórmula	FCAW-G Hyperfill	FCAW-G
Calam	Costo de alambre FCAW	\$	---	234.92	234.92
Walam	Kilos en un alambre	kg	---	15	15
M	Costo de material de aporte	\$/kg	Calam/Walam	15.66	15.66
E	Eficiencia de deposición	---	---	0.85	0.85
Cmat	Costo de material de aporte por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	M/E	18.43	18.43

De los cálculos anteriores se observa que el costo de material de aporte Cmat es indistinto tanto para proceso FCAW-G Hyperfill como para proceso FCAW-G. Esto se debe a que es un costo por peso de alambre por lo que es indistinto si se usa uno o dos carretes de soldadura al mismo tiempo.

- **Costos generales por unidad de peso de metal depositado Coh (\$/kg)**

Los costos generales por unidad de peso de metal depositado Coh se definen en 0 \$/kg (ver Tabla 37), a pesar de que se podrían incluir los costos prorrateados de herramientas de soldadura, puntas de contacto y toberas, EPPs y otros instrumentos. Esto se debe a que todo este equipamiento fue de préstamo.

Tabla 37

Memoria de cálculo costos generales por unidad de peso de metal depositado Coh (\$/kg)

Variable	Descripción	Unidades	Fórmula	FCAW-G Hyperfill	FCAW-G
Coh	Costos generales por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	---	0	0

- **Costo de mano de obra por unidad de peso de metal depositado Clabor (\$/kg)**

Para el cálculo de Clabor se incluyó el costo de hora máquina. Asimismo, se estima que las máquinas (fuente, alimentador, sistema de refrigeración, accesorios) contarán con una duración de vida útil de 7 años. El costo hora de máquina fue calculado a 200 horas mensuales que pueden ser consideradas para una máquina trabajando a 48 horas semanales por un soldador. No obstante, este costo puede variar y disminuir si se contempla jornadas de trabajo continuas (dos turnos de 12 horas o tres turnos de 8h). Se asume un factor de operación de Hyperfill del 40% y de FCAW simple al 25%.

El valor final de costo de mano de obra por unidad de peso de metal depositado se muestra en la Tabla 38.

- **Costos total de soldadura por unidad de peso de metal depositado (\$/Kg)**

Una vez calculados los costos anteriores, se procede a calcular el costo para generar (01) cordón de soldadura de 60cm tanto para el proceso FCAW-G como FCAW-G Hyperfill (ver Tabla 39). Este valor es referencial ya que se puede extrapolar el costo por unidad de kg de soldadura C_{tot} .kg no solamente para generar una soldadura de 60cm sino para un proyecto de gran envergadura de estructuras metálicas.

En materia de análisis de costos de soldadura, el costo para ejecutar un cordón con el material de aporte UltraCore® 111K3M-H Plus de diámetro 0.045” con proceso FCAW-G de 25.14 \$/kg de soldadura. El costo para el proceso FCAW-G Hyperfill es de 25.41 \$/kg soldadura. Se concluye que implementar Hyperfill solamente incrementaría el costo en 0.27 \$/kg cuando se contempla utilizar las máquinas trabajando a 200 horas hombre mensuales por un lapso de 7 años de vida útil. Esto representa un aumento de los costos de soldadura en un 1% por un aumento de la productividad de un 25% por lo que se concluye que el beneficio

productivo de disminución de tiempos y mayor capacidad de generar más productos soldados compensan el costo de soldadura.

Tabla 38

Memoria de cálculo costo de mano de obra por unidad de peso de metal depositado Clabor (\$/Kg)

Variable	Descripción	Unidades	Fórmula	FCAW-G Hyperfill	FCAW-G
Lmensual	Salario mensual de un soldador	\$	---	1080	1080
HH	Horas hombres mensuales	hh	---	200	200
L	Costo hora del operario	\$/h	Lmensual/HH	5.4	5.4
Cfuente	Costo de fuente POWER WAVE S500	\$	---	22000	22000
Calim	Costo de alimentador	\$	---	10000.00	6100.00
Crefrig	Costo sistema de refrigeración	\$	---	2200	0
Caccs	Costo accesorios	\$	---	5000.00	5000
Cmaqtot	Costo total máquina	\$	Cfuente+Calim+Crefrig+Caccs	39200.00	33100.00
Cdepr	Costo depreciación		$0.2 * Cmaqtot$	7840	6620
V	Vida útil	años	---	7.00	7
HHanual	Horas hombre anuales a 200HH mensuales	HH	$12 * 200$	2400	2400
Cmaq.hor	Costo hora máquina	\$/h	$(Cmaqtot + Cdepr) / (HHanual * V)$	2.8	2.36
K	Tasa de operación / Factor de operación	---		0.4	0.25
D	Tasa de deposición	kg/h		3.49	2.78
Clabor	Costo de mano de obra por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	$(L + Cmaq.hor) * K / D$	0.94	0.70

Tabla 39

Memoria de cálculo costos totales de soldadura por unidad de peso de metal depositado

(\$/kg)

Variable	Descripción	Unidades	Fórmula	FCAW-G Hyperfill	FCAW-G
Cgas	Costo de gas por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	---	0.00	0.00
Cpower	Costo de energía por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	---	0.30	0.33
Cmat	Costo de material de aporte por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	---	18.43	18.43
Clabor	Costo de mano de obra por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	---	0.94	0.70
Coh	Costos generales por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	---	0	0
Ctot.kg	Costos totales de soldadura por unidad de peso de metal depositado	\$/kg	---	19.66	19.45
Wsold	Peso de cordón de 60cm	kg	---	1.29	1.29
Ctot	Costo de ejecutar (01) cordón de 60cm	\$	---	25.41	25.14

CONCLUSIONES

Se concluye que el material caracterizado cumple con los requisitos de la norma EN 10025-6 S690QL en composición química, propiedades mecánicas, requisitos de impacto y estado de suministro (temple y revenido) validado a través de la metalografía.

Se concluye que el proceso de soldadura FCAW-G aplicado al acero estudiado S690QL en posición de soldadura vertical ascendente con junta a tope en V simple y con resane backgouging cumple con los criterios de aceptación de la norma AWS B2.1/B2.1M:2014 para Calificación de Procedimiento de Soldadura por lo que el WPS emitido en consecuencia de ello puede ser utilizado para calificación / homologación de soldadores, así como para soldadura de producción.

Se concluye que el proceso de soldadura FCAW-G Hyperfill aplicado al acero S690QL, en configuración de junta a tope en V simple con resane backgouging y en posición vertical ascendente, no cumple con los criterios de aceptación de la norma AWS B2.1/B2.1M:2014 de valores mínimos requeridos de tenacidad a la fractura de la unión soldada. Con Hyperfill en posición de soldadura vertical ascendente y sin el uso de backing se requirió aplicar dos pases de raíz a fin de generar una zona de refuerzo que soportara el baño de fusión de los siguientes pases de relleno sin que se fundiera el bisel en la raíz de la unión soldada. Como consecuencia de ello, y al no poder soldar la raíz con altas velocidades de avance, se generó valores de heat input de entre 2-3 kJ/mm para los dos primeros pases, ocasionando que disminuyera la tenacidad en la zona ZAC por sobreablandamiento en la microestructura de la unión soldada.

Se concluye que, en términos de tiempo, el proceso de soldadura FCAW-G Hyperfill resulta aproximadamente un 25 % más productivo que el proceso FCAW-G convencional al realizar soldaduras en posición vertical ascendente, específicamente en los pases de relleno y acabado.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

En caso se desee replicar la metodología presentada para obtener los valores de energía absorbida en el ensayo Charpy-V, se recomienda aumentar la cantidad de probetas de (03) a (05) para poder disminuir el error al conseguir resultados experimentales.

Se recalca que el acero EN 10025-6 S690QL es un acero con aplicaciones de alta tenacidad para bajas temperaturas. No obstante, si el requisito de tenacidad no es relevante para un futuro fabricante y no se pretende hacer cambios en el procedimiento de soldadura, se puede recomendar utilizar los parámetros eléctricos registrados en el PQR para Hyperfill para un acero equivalente que no requiera requisitos exigentes o requisito alguno de impacto. Como reemplazos al material seleccionado, se podría utilizar un acero EN 10025-6 S690Q cuya norma específica que la energía de impacto mínima a -20°C es de 30J y no 40J que requiere un acero S690QL. Asimismo, también se podría utilizar un acero EN 10149-2 S690MC, un acero laminado termomecánicamente y cuya designación también está incluida en la norma EN 10027-1. Dicho acero es comercializado en Perú y cuya norma no especifica requisitos de impacto en el material base.

Con la finalidad de poder emplear Hyperfill aplicado a un acero EN 10025-6 S690QL en futuras aplicaciones y empleando el mismo procedimiento de soldadura FCAW Hyperfill con ligeras variaciones, con el objetivo de lograr una unión soldada que pase las pruebas de tenacidad en la zona se recomienda (1) alternar los pases de soldadura y no concentrar el calor en un lugar de la soldadura a fin de no ablandar solamente un solo lado de la unión soldada en particular tal y como se observó en los resultados obtenidos (2) disminuir el heat input del proceso Hyperfill a través del voltaje y amperaje, lo cual podría generar una menor tasa de deposición y realizar el proceso más improductivo pero garantizando la calidad de la soldadura. 3) Utilizar un método de enfriamiento lento después de haber ejecutado el cupón de soldadura.

Uno de estos métodos sería mediante el uso de fuentes de cal temperadas para reducir

gradualmente la temperatura de la soldadura hasta la temperatura ambiente. En caso sea dificultoso el control de los parámetros de soldadura previamente empleados, se puede recomendar el uso de backing y aumentar la separación de raíz de 0-3 a 5 mm a fin de evitar el sobrecalentamiento en la raíz.

En caso un futuro fabricante desee eliminar el problema de la entalla metalográfica y homogenizar los valores de dureza en la microestructura de la unión soldada para el proceso FCAW-G Hyperfill, se recomienda 1) Utilizar un proceso mixto: emplear FCAW-G para soldar solamente la raíz y emplear FCAW-G Hyperfill para los pases de relleno y acabado o 2) Utilizar un backing removible cerámico o un backing permanente si es que el diseño de Ingeniería lo permite. De esta forma, no existiría riesgo de fundición de la raíz en los bordes de los biseles y se lograrían avances productivos más significativos, así como una disminución del tiempo global de ejecución de soldadura. 3) Realizar un tratamiento térmico de regeneración para disminuir la dureza en el centro del cordón. Estas modificaciones son variables esenciales por lo que requieren una calificación de procedimiento de soldadura desde cero en un cupón de soldadura nuevo.

BIBLIOGRAFÍA

- Academia Testek. (s.f.). *Capítulo 1: Introducción a los líquidos penetrantes*. En *NDTPedia: Líquidos penetrantes*. Recuperado el 17 de julio de 2025, en <https://academiatestek.net/ndtpedia-2/capitulo1-introduccion-a-los-liquidos-penetrantes/>
- American Welding Society. (2020). *AWS A3.0/A3.0M:2020 – Standard welding terms and definitions: Including terms for adhesive bonding, brazing, soldering, thermal cutting*.
- American Welding Society. (2020). *AWS D1.1/D1.1M:2020 – Structural Welding Code – Steel*.
- American Welding Society. (2018). *Welding handbook volume 1: Welding and Cutting Science and Technology* (10a ed., K. Sinnes, Ed.). American Welding Society.
- American Welding Society. (2004). *Welding handbook volume 2: Welding Processes Part 1* (9ª ed). American Welding Society.
- American Welding Society. (2011). *Welding handbook volume 4: Materials and Applications – Part 1* (9ª ed). American Welding Society.
- ASTM International. (2017). *ASTM E92-17: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. ASTM International.
- ASTM International. (2022). *ASTM E23-22: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
- ASTM International. (2020). *ASTM E18-20: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM E8/E8M-21: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.

ASTM International. (2021). *ASTM E709-21: Standard Guide for Magnetic Particle Testing*.

ASTM International.

Berg Engineering & Sales Company Inc. (s.f.). *Wilson Rockwell 2000 Automated Hardness*

Tester [página web]. Recuperado el 17 de julio de 2025, de

<https://www.bergeng.com/product/rockwell-2000-auto.html>

Blummer Ingeniería & Servicios Industriales S.A.C. (s.f.). *Radiografía industrial – RT*.

Recuperado el 17 de julio de 2025, de [https://www.blumersac.com/servicios-y-](https://www.blumersac.com/servicios-y-productos/ensayos-no-destructivos/radiografia-industrial-rt/)

[productos/ensayos-no-destructivos/radiografia-industrial-rt/](https://www.blumersac.com/servicios-y-productos/ensayos-no-destructivos/radiografia-industrial-rt/)

British Standards Institution. (2004). *BS EN 1011-2:2001. Welding – Recommendations for*

welding of metallic materials – Part 2: Arc welding of ferritic steels. BSI Standards

Publication.

British Standards Institution. (2016). *BS EN 10027-1:2016. Designation systems for steels –*

Part 1: Steel names. BSI Standards Publication.

CESOL. (2016). *Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura IWE*.

Módulo II. Tema 2.5. Comportamiento de los aceros estructurales en el soldeo por

fusión (Revisión 1). Enero 2016.

CESOL. (2016). *Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura IWE*.

Módulo II. Tema 2.9. Aceros estructurales (no asleados) (Revisión 7). Enero 2016.

DM STECH. (s.f.). *Partículas magnéticas fluorescentes MR 76F (aceite)*. Recuperado el 17 de

julio de 2025, de [https://dm-stech.pe/producto/particulas-magneticas-fluorescentes-](https://dm-stech.pe/producto/particulas-magneticas-fluorescentes-76f-aceite/)

[76f-aceite/](https://dm-stech.pe/producto/particulas-magneticas-fluorescentes-76f-aceite/)

Eddytronic. (s.f.). *Laboratorio de ensayos*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de

<https://www.eddytronic.cl/laboratorio-de-ensayos>

European Committee for Standardization (2019). *EN 10025-6:2019: Hot rolled products of structural steels – Part 6: Technical delivery conditions for high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition*. CEN.

European Committee for Standardization (2016). *EN 10027-1:2016: Designation systems for steels – Part 1: Steel names*. CEN.

Fosca, C. (2007). *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura* (7ª ed.). Pontificia Universidad Católica del Perú.

Fushun Special Steel Co. Ltd. (c. 2020). *Introduce Magnetic Particle Inspection (MPI) of Non-destructive testing (NDT)*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://www.fushunspecialsteel.com/magnetic-particle-inspection-mpi/>

International Organization for Standardization. (2011). *ISO 9015-1:2011. Destructive tests on welds in metallic materials – Hardness testing – Part 1: Hardness test on arc welded joints*. ISO.

Lincoln Electric. (s.f.). [*HyperFill® Solución FCAW de doble alambre*]. <https://ch-delivery.lincolnelectric.com/api/public/content/fb280d484fce4c71971abecf54c45058?v=1da1c9fd>

Lincoln Global Inc. (2019). [*HyperFill™*]. Recuperado el 7 de noviembre del 2025, de https://arctech.sk/wp-content/uploads/arctech_lincoln-electric_hyperfill_new02.pdf

Lincoln electric expands HyperFill line to include new flux-cored wire applications. (2023). *Canadian Metalworking*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://www.canadianmetalworking.com/canadianfabricatingandwelding/product/welding/lincoln-electric-expands-hyperfill-line-to-include-new-flux-cored-wire-applications>

Microscope Central. (s.f.). *Leica S6D stereo zoom microscope 6.3x-40x*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://microscopecentral.com/products/leica-s6d-stereo-zoom-microscope-6-3x-40x>

MX Industrial. (s.f.). *Magnaflux EV6000 LED UV lamp*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://www.mxindustrial.com/product/magnaflux-vibrance-ev5000-uv-led-black-light-certified-5-000-w-cm/>

NDT Supplies. (s.f.). *Magnaflux Y-8 115V/230V global charger DC cordless yoke kit*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://www.ndtsupplies.com/products/magnaflux-y-8-dc-cordless-yokes-and-kits-magnaflux-y-8-115v-230v-global-charger-dc-cordless-yoke-kit>

Nuñez, R. (2021). *Fenómenos de agrietamiento de las uniones soldadas: Fisuración en frío* [Clase no publicada]. Diplomatura de Especialización en Ingeniería de Soldadura, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Nuñez, R. (2021). *Fenómenos de agrietamiento de las uniones soldadas: Fisuración en caliente* [Clase no publicada]. Diplomatura de Especialización en Ingeniería de Soldadura, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Chiara, L. (2021). *FCAW Flux Cored Arc Welding* [Clase no publicada]. Diplomatura de Especialización en Ingeniería de Soldadura, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Lean, P. (2024). *Tema 2: Ensayos de materiales. En Diplomatura de Estudio de Fundamentos de Análisis de Falla en Componentes Mecánicos*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

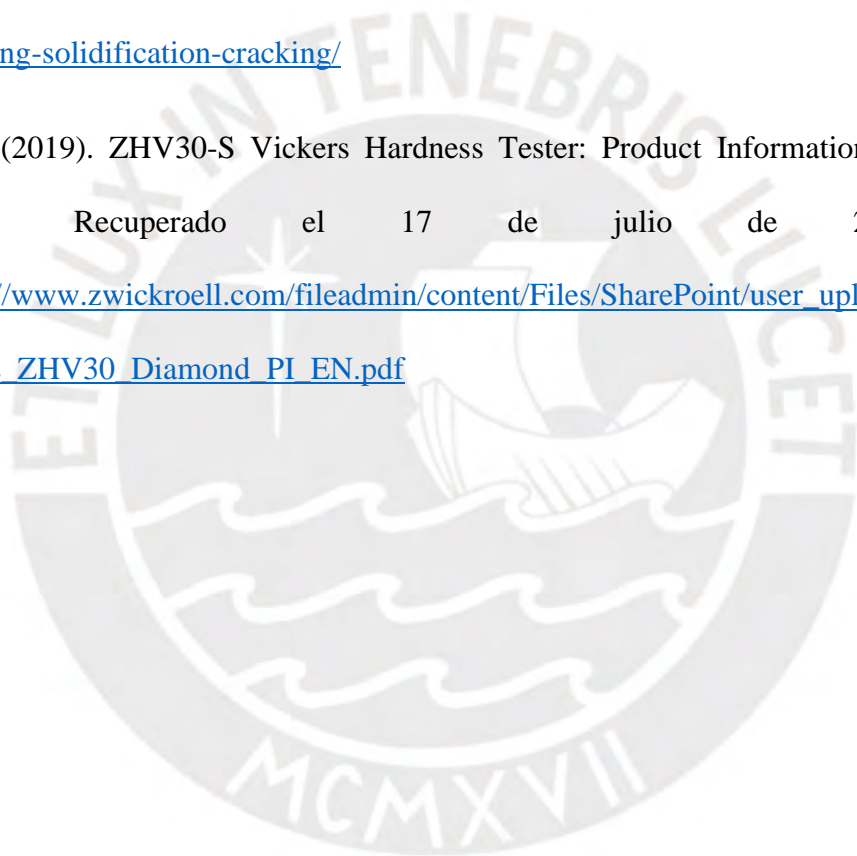
Proinstra S.A. (s.f.). *Espectrómetros de emisión óptica por chispa - Q8 Magellan*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://www.proinstra.com/producto/q8-magellan/>

Salvo Spa Soluciones Generales. (s.f.). *Tintes penetrantes Magnaflux*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de Salvo Spa Soluciones Generales. Sitio web: <https://www.salvospa.cl/lipiador>

Stuart Hunt & Associates Ltd. (s.f.). *Baltospot Ceram 35P*. Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://www.stuarthunt.com/store/product/baltospot-ceram-35p>

TWI. (2017). *What is hot cracking (solidification cracking)?* Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-hot-cracking-solidification-cracking/>

ZwickRoell. (2019). ZHV30-S Vickers Hardness Tester: Product Information [Folleto en PDF]. Recuperado el 17 de julio de 2025, de https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/15_942_ZHV30_Diamond_PI_EN.pdf



Anexo 1. Certificado de Calidad de alambre ULTRACORE 111K3M-H PLUS



THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY

22801 St. Clair Avenue
Cleveland, Ohio 44117-1199

Certified Material Test Report

The 0.045 inch UltraCore® 111K3M-H Plus electrode, Q2 Lot® 19158078 was manufactured under one lot control number per AWS A5.01, Class T4 and tested per Schedule I. This test report is in accordance with 3.1 per EN10204. Testing followed the requirements of AWS A5.29:2021 and ASME SFA-5.29 (E111T1-K3M-JH4).

The product stated herein was manufactured and supplied in accordance with the Quality System Program of the Lincoln Electric Company, Cleveland, Ohio, U.S.A. as outlined in our Quality Assurance Manual which meets the requirements of ISO 9001, NCA 4200, AWS A5.01, and other specifications, as appropriate. The Quality System Program has been approved by ASME, ABS, and VdTUV, and is certified to ISO 9001.

Operating Settings	E111T1-K3M-JH4 Requirement	Actual Lot Results
Electrode Size	Not Specified	.045" (1.1 mm)
Current Type/Polarity	DC+	DC+
Shielding Gas	75-80% Ar, balance CO2	75% Ar, 25% CO2
Wire Feed Speed, cm/min (in/min)		1016 (400)
Nominal Voltage, V		27.0
Nominal Current, A		210
Average Heat Input, kJ/mm (kJ/in)	(25 - 50)	1.4 (35.6)
Travel Speed, cm/min (in/min)		24 (9.6)
Contact Tip to Work Distance, mm (in)		19 (3/4)
Pass/Layers		16/8
Preheat Temperature, °C (°F)	(275 - 325)	150 (300)
Interpass Temperature, °C (°F)	(275 - 325)	150 (300)
Postweld Heat Treatment	As-welded	As-welded
Base Material		ASTMA514 steel
Mechanical properties of weld deposits		
Tensile Strength, MPa (ksi)	(110 - 130)	810 (117)
Yield Strength, 0.2% Offset, MPa (ksi)	(98 min.)	770 (111)
Elongation %	15 min.	20
Average Impact Energy	(20 min.)	65 (48)
Joules @ -51 °C (ft-lbs @ -60 °F)		59,66.69 (44,49.51)
Chemical composition of Weld Deposits (weight %)		
C	0.15 max.	0.06
Mn	0.75 - 2.25	1.68
Si	0.80 max.	0.33
S	0.030 max.	0.011
P	0.030 max.	0.008
Cr	0.15 max.	0.04
Ni	1.25 - 2.60	2.14
Mo	0.25 - 0.65	0.39
V	0.05 max.	0.00
B	Not Specified	0.0050
Diffusible Hydrogen (per AWS A4.3)		
Diffusible Hydrogen, mL/100g	4 max.	2
Abs. Humidity (gr moisture/lb dry air)		65

1. Radiographic Inspection: Met requirements.
2. The strength and elongation properties reported here were obtained from tensile specimens artificially aged at 105°C (220°F) for 48 hours.
3. Strength values in SI units are reported to the nearest 10 MPa converted from actual data. Preheat and interpass temperature values in SI units are reported to the nearest 5 degrees.


Note: The recording of false, fictitious or fraudulent statements or entries on this document may be punished as felony under Federal Statutes including Federal Law, Title 18, Chapter 47.

Certified Material Test Report Q2® Lot 19158078, Page 1 of 2



THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY
22801 St. Clair Avenue
Cleveland, Ohio 44117-1199

Certified Material Test Report


October 03, 2024
Ed Bunnell, Quality Assurance


October 03, 2024
Nicholas Del Monico, Specials Testing Coordinator

Note: The recording of false, fictitious or fraudulent statements or entries on this document may be punished as felony under Federal Statutes including Federal Law, Title 18, Chapter 47.

Certified Material Test Report Q2® Lot 19158078, Page 2 of 2

Anexo 2. Ficha técnica acero S690QL

PLANCHAS STRENX 700 QL ESTRUCTURAL DE MUY ALTA RESISTENCIA



Planchas de acero estructural micro aleado con altas propiedades mecánicas.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (máx)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.20	0.60	1.60	0.02	0.01	0.30
CR	Ni	Mo	B	CEV	
0.80	2.00	0.70	0.005	0.48/0.67	

PROPIEDADES MECÁNICAS

CALIDAD DEL MATERIAL	LÍMITE DE FLUENCIA MPa ≥	CARGA DE ROTURA MPa ≥	ELONGACIÓN % ≥
STRENX 700 QL	* 700	780 - 930	14

* Dependiendo del espesor 650 - 700 MPa

MARCAS EQUIVALENTES O APROXIMADAS: ASTM A 514, OPTIM 700 QL

DIMENSIONES ESTÁNDAR

DIMENSIONES mm	PESO TEÓRICO EN kg/plancha			CEV máximo
	1,280 x 5,800 mm	1,500 x 5,800 mm	1,500 x 6,000 mm	
12.0	699.34	819.54	847.80	0.49
16.0			1,130.40	0.49
20.0			1,413.00	0.49
25.0			1,766.25	0.49
32.0			2,260.80	0.52
38.0			2,684.70	0.52

TOLERANCIAS: Dimensiones EN 10029, Planitud EN 10029 Clase N, Acabado Superficial EN 10163-2 Clase 1

IMPACTO CHARPY: 69 J á - 40 °C

STRENX 700 E IMPACTO CHARPY: 69 J á - 40 °C

USOS: Grúas telescópicas, plataformas aéreas, bombas de hormigón, volquetes, manipuladores, etc.

Cumple los requisitos de EN 10025-6 para el Grado S 690.

www.comasa.com.pe