

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Estudio comparativo de propiedades mecánicas y microestructurales para una junta soldada en tubería de acero HSLA API5L grado X65 usada para líneas de transporte de hidrocarburos**

**Jose Cesar Tunarrosa Niampira**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica y Mecatrónica  
Bogotá, Colombia

2022



# **Estudio comparativo de propiedades mecánicas y microestructurales para una junta soldada en tubería de acero HSLA API5L grado X65 usada para líneas de transporte de hidrocarburos**

**Jose Cesar Tunarrosa Niampira**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería - Materiales y Procesos**

Director:

Ph.D., Jhon Jairo Olaya Flórez

Línea de Investigación:

Materiales y procesos de soldadura

Grupo de Investigación:

Soldadura y ensayos no destructivos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2022



*Entonces te digo; pregunta y te será dado, busca y lo encontrarás, toca y la puerta se abrirá para ti.*

*JESÚS*

## **Agradecimientos**

A DIOS por crearme, a mis padres por su guía y por ser un ejemplo de fortaleza, a mi familia por ser mi núcleo.

Al ingeniero Jhon Jairo Olaya Flórez por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto con su asesoría. Al ingeniero Juan Hernando Reyes por sus consejos, disponibilidad y guía.

A la Universidad Nacional de Colombia por ser mi alma máter.

## Resumen

### **Estudio comparativo de propiedades mecánicas y microestructurales para una junta soldada en tubería de acero HSLA API 5L grado X65 usada para líneas de transporte de hidrocarburos**

En este trabajo se realizó el análisis partiendo desde un requerimiento a nivel macro, como es la necesidad de expansión de sistemas para transporte y distribución de gas, hasta llegar al diseño y evaluación de juntas soldadas a tope para implementar en la construcción de estos sistemas. Análisis pasando por las etapas de selección de condiciones de operación, estudio de regulaciones locales, selección de materiales, diseño de juntas soldadas y análisis mecánicos, hasta llegar a un nivel micro con el análisis microestructural de cada junta soldada.

Se realizó el diseño de una junta a tope soldada por medio de los procesos SMAW, GTAW+SMAW y GMAW+FCAW-G, en tubería de acero al carbono HSLA API5L X65. El código de referencia empleado fue ASME B31.8 [34]. Se diseñó un WPS para cada proceso de soldadura a aplicar, con sus respectivos PQR y WPQ bajo el código ASME, sección IX [49].

A cada junta se le realizan ensayos de inspección visual, tensión, doblez guiado de cara y de raíz, dureza HRB, microdureza HV, microscopía óptica, microscopía SEM-SE, análisis de composición de elementos por SEM-BSE, medición de la ZAC y mediciones de tamaño de grano. Con los resultados se realiza la comparación entre procesos.

La junta soldada con el proceso mixto GMAW+FCAW presentó los mejores valores promedio de resistencia a la tensión, dureza HRB y microdureza HV. Junta que también

presento la ZAC más ancha que los otros procesos. El proceso SMAW presentó el menor valor de resistencia a la tensión y los valores más bajos de microdureza HV promedio. El proceso GTAW+SMAW obtuvo resistencia media respecto a los demás procesos aplicados.

Con los resultados obtenidos, los WPS diseñados para cada proceso pueden ser implementados para soldar líneas de transporte de gas.

**Palabras clave: API5LX65, gasoducto, soldadura, SMAW, GMAW, GTAW, GFAW, microestructura, WPS, PQR, WPQ.**



## Abstract

### **Comparative study of mechanical and microstructural properties for a welded joint in HSLA API5L grade X65 steel pipe used for hydrocarbon transportation lines**

In this work, the analysis was carried out starting from a requirement at the macro level, such as the need to expand systems for transport and distribution of gas, up to the design and evaluation of butt-welded joints to implement in the construction of these systems. Analysis going through the stages of selection of operating conditions, study of local regulations, selection of materials, design of welded joints and mechanical analysis, until reaching a micro level with the microstructural analysis of each welded joint.

The design of a welded butt joint was carried out by means of the SMAW, GTAW+SMAW and GMAW+FCAW-G processes, in carbon steel pipe HSLA API5L X65. The reference code used was ASME B31.8 [34]. A WPS was designed for each welding process to be applied, with their respective PQR and WPQ under the ASME code, section IX [49].

Each joint undergoes visual inspection tests, tension, face and root guided bending, HRB hardness, HV microhardness, optical microscopy, SEM-SE microscopy, element composition analysis by SEM-BSE, ZAC measurement and grain size measurements. With the results, the comparison between processes is made.

The joint welded with the GMAW+FCAW mixed process presented the best average values of tensile strength, HRB hardness and HV microhardness. Welded joint that also presented the ZAC wider than the other processes. The SMAW process presented the lowest tensile strength value and the lowest average HV microhardness values. The GTAW+SMAW process obtained medium resistance compared to the other applied processes.

With the results obtained, the WPS designed for each process can be implemented to weld gas transportation lines.

**Keywords:** API5LX65, pipeline, welding, SMAW, GMAW, GTAW, GFAW, microstructure, WPS, PQR, WPQ.

# Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras .....	XII
Lista de tablas .....	XVI
Lista de símbolos y abreviaturas.....	XIX
Introducción	1
<b>OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
<b>1. ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL.....</b>	<b>5</b>
1.1 Fundamento teórico .....	5
1.2 Ampliación del sistema de transporte de gas natural.....	5
1.3 Códigos, normas y estándares regulatorios para transporte de gas natural7	
1.3.1 Regulaciones nacionales.....	7
1.3.2 Regulaciones internacionales.....	8
1.4 Tubería empleada en sistemas de transporte y distribución de gas natural9	
1.5 Procesos de soldadura más empleados en gasoductos.....	9
1.6 Fallas en tuberías de transporte de hidrocarburos y sistemas soldados... 11	
1.7 Investigaciones comparando propiedades de la junta soldada con diferentes procesos de soldadura.....	12
1.8 Justificación.....	16
1.8.1 Identificación del problema.....	19
<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>20</b>
2.1 Fase I. Requerimiento, selección y especificación de la tubería a emplear. 22	
2.1.1 Requerimiento.....	22
2.1.2 Material .....	23
2.1.3 Diámetro.....	24
2.1.4 Presión de diseño.....	26
2.1.5 Espesor de tubería .....	27
2.2 Fase II: Selección de procesos de soldadura, realización de especificaciones de procedimientos, realización de las juntas soldadas con los niples de tubería, calificación de procedimientos y calificación de soldadores empleados para la realización de las juntas soldadas. ....	32
2.2.1 Especificaciones de procedimientos de soldadura (WPS) .....	34

1) WPS S_01 para el proceso SMAW.....	38
2) WPS GF_01 para el proceso mixto GMAW (MIG)+ FCAW .....	40
3) WPS TS_01 para el proceso mixto GTAW + SMAW.....	42
2.2.2 Realización de las juntas soldadas .....	44
2.2.3 Calificación de los procedimientos de soldadura.....	47
2.2.4 Calificación de habilidad del soldador .....	53
2.3 Fase III: Caracterización mecánica y microestructural de las juntas soldadas. 57	
<b>3. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
3.1 Análisis de composición química del material base .....	59
3.2 Calificación de procedimientos de soldadura (PQR) .....	62
3.2.1 PQR para el WPS S_01, proceso SMAW .....	63
3.2.2 PQR para el WPS TS_01, proceso mixto GTAW + SMAW .....	65
3.2.3 PQR para el WPS GF_01, proceso mixto GMAW + FCAW .....	68
3.3 Calificación de habilidad del soldador (WPQ) .....	70
3.3.1 WPQ para el WPS S_01, proceso SMAW .....	71
3.3.2 WPQ para el WPS TS_01, proceso mixto GTAW + SMAW .....	73
3.3.3 WPQ para el WPS GF_01, proceso mixto GMAW + FCAW.....	75
3.4 Microscopia Óptica .....	76
3.5 Microscopia electrónica de barrido -SEM-, por electrones secundarios (SE) 93	
3.6 Dimensiones de la ZAC .....	120
3.7 Resultados de los ensayos .....	124
3.7.1 Ensayos de tensión .....	125
3.7.2 Ensayos de doblez guiado, doblez de raíz y de cara .....	136
3.7.3 Ensayos de tenacidad.....	140
3.7.4 Inspección visual .....	143
3.7.5 Ensayos de dureza .....	146
3.7.6 Ensayos de Microdureza .....	152
3.7.7 Tamaño de grano .....	159
<b>4. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>175</b>
4.1 Conclusiones .....	175
4.2 Recomendaciones .....	178
<b>Bibliografía 180</b>	

# Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1. Frecuencia de diámetros empleados en gasoductos.....	25
Figura 2-2. Dimensiones sugeridas de bisel para juntas a tope por ASME Sección IX [49]. .....	37
Figura 2-3. Niples de tubería para soldar. API5L X65, 6” de diámetro, SCH 40. ....	45
Figura 2-4. Niples soldados con dos juntas para cada proceso.....	45
Figura 2-5. Equipos inversores para realización de soldaduras por procesos SMAW, GTAW, GMAW y FCAW. ....	46
Figura 2-6. Dimensiones de probetas para ensayos de: (a) tensión de sección reducida y (b) para probetas de doblez transversal de cara y de raíz. Tomada del código ASME sección IX [49]. ....	49
Figura 2-7. Formato QW-483 del código ASME sección IX [49] para PQR. ....	52
Figura 2-8. Ubicación de probetas para ensayos de doblez para WPQ. Tomada del código ASME sección IX [49]. .....	54
Figura 2-9. Formato QW-484A del código ASME sección IX [49] para WPQ.....	56
Figura 3-1. Micrografías por microscopía óptica del metal base, acero al carbono HSLA API 5L X65. ....	77
Figura 3-2. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta S1 probeta 1. ....	79
Figura 3-3. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta S1 probeta 2. ....	81
Figura 3-4. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta TS1 probeta 1. ....	84
Figura 3-5. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta TS2 probeta 2. ....	87
Figura 3-6. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta GF1 probeta 1. ....	90
Figura 3-7. Micrografías del MS y ZACGG de la junta GF2 probeta 1.....	92
Figura 3-8. Montaje de las probetas en el SEM.....	93

<b>Figura 3-9. Microscopia por SEM del MB, acero HSLA API 5LX65. Junta S1.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 3-10. Espectro por BSE de elementos en el MB, acero API 5LX65.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 3-11. Microscopia por SEM en el centro del MS, junta S1. ....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 3-12. Espectro por BSE de elementos en el MS, probeta S1. ....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 3-13. Microscopia por SEM de la ZAC, junta S1. ....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 3-14. Espectro por BSE de elementos en la ZAC. Probeta S1.....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 3-15. Espectro por BSE de elementos en la ZAC cercano a una inclusión. Probeta S1.....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 3-16. Microscopia por SEM del MS, cordón inferior, junta GF1.....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 3-17. Espectro por BSE de elementos en el MS, cordón inferior. Probeta GF1. .....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 3-18. Microscopia por SEM del MS, cordón superior, junta GF1.....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 3-19. Espectro por BSE de elementos en el MS, cordón superior. Probeta GF1. .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 3-20. Microscopia por SEM de la ZAC, junta GF1.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 3-21. Espectro por BSE de elementos en la ZAC. Probeta GF1. ....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 3-22. Microscopia por SEM del MS, cordón inferior, junta TS2. ....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 3-23. Espectro por BSE de elementos en el MS, cordón inferior. Probeta TS2. .....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 3-24. Microscopia por SEM del MS, cordón superior, junta TS2. ....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 3-25. Espectro por BSE de elementos en el MS, cordón superior. Probeta TS2. .....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 3-26. Microscopia por SEM de la ZAC, junta TS2. ....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 3-27. Espectro por BSE de elementos en la ZAC. Probeta TS2.....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 3-28. Espectro por BSE de elementos en la ZAC (b). Probeta TS2. ....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 3-29. Medición de la ZAC para las juntas soldadas. WPS S_01, probeta 1..</b>	<b>121</b>
<b>Figura 3-30. Comparación resistencia de probetas ensayadas Vs resistencia a la tensión mínima especificada del material base y promedios de cada WPS empleado.....</b>	<b>127</b>
<b>Figura 3-31. Diagrama de caja para esfuerzos máximos a la tensión de los procesos de soldadura mixtos aplicados.....</b>	<b>128</b>

<b>Figura 3-32. Curvas esfuerzo - deformación de las probetas ensayadas. Cuatro probetas por cada WPS diseñado.....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 3-33. Morfología y fractografías de las zonas de falla en las probetas de ensayos de tensión para cada WPS (a)(b)(c)(d).....</b>	<b>135</b>
<b>Figura 3-34. Probetas dobladas de cara y raíz del WPS GF_01 (GMAW + FCAW) cupón 2.....</b>	<b>138</b>
<b>Figura 3-35. Probeta S2_DR2 con doblez de raíz. (a) Discontinuidades abiertas. (b) Medición de discontinuidades (c) Dimensiones de discontinuidades abiertas. ....</b>	<b>139</b>
<b>Figura 3-36. Probeta GF1_DC1 con doblez de cara y que presenta discontinuidad. ....</b>	<b>139</b>
<b>Figura 3-37. Probeta GF1_DC1, rechazada. Antes y después del ensayo. ....</b>	<b>140</b>
<b>Figura 3-38 Indentaciones de dureza HRB realizadas por cada zona de la junta soldada. ....</b>	<b>148</b>
<b>Figura 3-39. Curva de durezas HRB de probetas realizada por cada WPS S_01, TS_01, GF_01.....</b>	<b>149</b>
<b>Figura 3-41. Ubicación de indentaciones para dureza HRB en la ZAC de grano grueso (GG) y en la ZAC de grano fino (GF). ....</b>	<b>150</b>
<b>Figura 3-40. Durezas promedio HRB en la ZAC de grano fino (GF) y en la ZAC de grano grueso (GG) por cada probeta de los WPS.....</b>	<b>151</b>
<b>Figura 3-42. Ubicación de indentaciones realizadas para medición de microdureza Vickers HV. ....</b>	<b>153</b>
<b>Figura 3-43. Microdureza Vickers HV por cada WPS empleado. Se realizan dos juntas o probetas por WPS.....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 3-44. Comparación directa de microdureza para cada probeta soldada por WPS.....</b>	<b>155</b>
<b>Figura 3-45. Microdureza HV promedio Vs resistencia a la tensión de los WPS diseñados. ....</b>	<b>157</b>
<b>Figura 3-46. Relación de microdureza HV frente a la dimensión de la ZAC y la entrada de calor. ....</b>	<b>158</b>
<b>Figura 3-47. Zonas de la probeta S1R.....</b>	<b>161</b>
<b>Figura 3-48. Zonas de la probeta GF1 R. ....</b>	<b>161</b>
<b>Figura 3-49. Zonas de la probeta TS1 R. ....</b>	<b>162</b>
<b>Figura 3-50. Tamaño de grano en Metal Base y en las ZAC.....</b>	<b>164</b>
<b>Figura 3-51. Diámetro promedio de grano Vs microdureza. ....</b>	<b>166</b>

---

<b>Figura 3-52. Relación tamaño de grano/ esfuerzo de fluencia para juntas soldadas.</b> .....	<b>167</b>
<b>Figura 3-53. Huella, en <math>\mu\text{m}</math>, generada por el indentador para el ensayo de microdureza HV(a). Zona afectada por la indentación (b).</b> .....	<b>168</b>
<b>Figura 3-54. Micrografías “TS2 R_MB-500X” (a) y “TS2 R_MB-1000X” (b) tomadas en zonas del metal base con deformación plástica por procesos de laminado.....</b>	<b>171</b>
<b>Figura 3-55. Composiciones químicas de diferentes investigaciones para una misma especificación del acero API5L X65. ....</b>	<b>172</b>
<b>Figura 3-56. Composición química y propiedades mecánicas del acero API5L X65 empleado por J. Capelle et al. [73]. ....</b>	<b>173</b>
<b>Figura 3-57. Composición química del acero API5L X65 empleado por Dabir et al [71]. .....</b>	<b>174</b>

# Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1. Desarrollo experimental. Fases I, II, III del flujo de trabajo.....	21
Tabla 2-2. Fase I del flujo de trabajo. Selección del material, diámetro, presión y espesor de tubería. ....	22
Tabla 2-a. Características generales del acero API5LX65.....	24
Tabla 2-3. Líneas de gasoductos de la empresa TGI [59].....	25
Tabla 2-4. Frecuencia del empleo de tubería de 6” de diámetro en redes de gasoductos.....	25
Tabla 2-5. Parámetros para hallar el espesor de pared nominal o la máxima presión de diseño para tubería según ASME B31.8 [34].....	29
Tabla 2-6. Valores de los parámetros para cálculo de espesor de la tubería. ....	30
Tabla 2-7. Espesor de pared para tubería de 6” de diámetro nominal según el apartado de la Tabla 1 del código ASME B36.10 [63].....	31
Tabla 2-8. Características principales de la tubería a emplear. ....	32
Tabla 2-9. Fase II del flujo de trabajo. Realización de los WPS, juntas soldadas, PQR y WPQ para cada proceso de soldadura empleado.....	33
Tabla 2-10. Procesos de soldadura por fusión con arco eléctrico y material de protección, sin adición de presión.....	34
Tabla 2-11. Requerimientos de ensayos para calificación de procedimientos de soldadura. Tomada del código ASME Sección IX [49].....	48
Tabla 2-12. Tipo y número de ensayos requeridos para calificación de soldadores. Tomada del código ASME sección IX [49].....	54
Tabla 2-13. Fase III del flujo de trabajo. Caracterización mecánica y caracterización microestructural por metalografía de las juntas soldadas.....	57
Tabla 3-1. Composición química del material base: Tubo API 5L X65 .....	60



<b>Tabla 3-2. Dimensiones de la ZAC para cada proceso de soldadura empleado. ....</b>	<b>121</b>
<b>Tabla 3-3. Parámetros de soldadura y entrada de calor para cada WPS.....</b>	<b>123</b>
<b>Tabla 3-4. Ensayos requeridos por ASME sección IX para calificación de procedimientos de soldadura y para calificación de soldadores en juntas soldadas a tope [49]......</b>	<b>124</b>
<b>Tabla 3-5. Resistencias de probetas ensayadas. Esfuerzos máximos a la tensión, de fluencia, de rotura. % de alargamiento y módulo elástico por cada WPS. ....</b>	<b>126</b>
<b>Tabla 3-6. Tabla de resistencias a la tensión indicando cumplimiento del código ASME Sección IX [49]. Ensayos para los PQR y WPQ según cada WPS. ....</b>	<b>128</b>
<b>Tabla 3-7. Valores medidos de resistencia a la tensión, fluencia y rotura del material base empleado API5LX65. ....</b>	<b>130</b>
<b>Tabla 3-8 Resultado de los ensayos de doblez guiado de cara y de raíz para los PQR y WPQ. WPS S_01, TS_01, GF_01. Dos cupones soldados por cada WPS. ....</b>	<b>137</b>
<b>Tabla 3-9. Resultado de la inspección visual de las juntas soldadas. Según ASME Sección IX Artículo 1, QW-194 [49]......</b>	<b>144</b>
<b>Tabla 3-10. Relación entre dureza y resistencia a la tensión aproximada para aceros no austeníticos. Tabla 3 de ASTM A370 [65]. ....</b>	<b>147</b>
<b>Tabla 3-11. Dureza HRB de las zonas MB, ZAC,MS, de cada probeta extraída de los cupones soldados. ....</b>	<b>148</b>
<b>Tabla 3-12. Dureza HRB promedio de cada probeta para los WPS S_01, TS_01, GF_01. ....</b>	<b>149</b>
<b>Tabla 3-13. Durezas HRB promedio en la ZAC-GF y en la ZAC-GG por cada WPS.</b>	<b>151</b>
<b>Tabla 3-14. Microdureza HV promedio para cada zona de la junta soldada (a), por cada probeta realiza y cada WPS diseñado (b). ....</b>	<b>153</b>
<b>Tabla 3-15. Microdureza y resistencia a la tensión promedios por WPS. ....</b>	<b>156</b>
<b>Tabla 3-16. Microdureza HV promedio, dimensiones de la ZAC y entrada de calor. ....</b>	<b>158</b>
<b>Tabla 3-17. Relación del tamaño de grano con el No G. Tabla 4 tomada del estándar ASTM E112 [67]......</b>	<b>160</b>
<b>Tabla 3-18. Diámetro promedio de grano del metal base acero API5L X65 y el correspondiente número G.....</b>	<b>160</b>
<b>Tabla 3-19. Diámetro promedio de grano en la ZAC y el correspondiente número G. Probeta S1R. ....</b>	<b>161</b>

<b>Tabla 3-20. Diámetro promedio de grano en la ZAC y el correspondiente número G. Probeta GF1R .....</b>	<b>161</b>
<b>Tabla 3-21. Diámetro promedio de grano en la ZAC y el correspondiente número G. Probeta TS1R.....</b>	<b>162</b>
<b>Tabla 3-22. Diámetro promedio de grano del metal base acero API5L X65 y el correspondiente número G. ....</b>	<b>163</b>
<b>Tabla 3-23. Diámetro promedio de grano por zona de la junta soldada Vs microdureza.....</b>	<b>165</b>
<b>Tabla 3-24. Variables de la relación Hall Petch: Tamaño de grano y esfuerzo de fluencia del material para cada junta soldada.....</b>	<b>166</b>
<b>Tabla 3-25. Microdureza HV promedio por zona, ancho de la ZAC realizada por medición directa y entrada de calor promedio. ....</b>	<b>169</b>

## Lista de símbolos y abreviaturas

API:	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME:	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AWS:	<i>American Welding Society</i>
BPVC:	<i>Boiler and Pressure Vessel Code</i>
CE:	Carbono equivalente
FCAW:	<i>Flux cored arc welding</i>
gf:	Gramos fuerza
GMAW:	<i>Gas metal arc welding</i>
GTAW:	<i>Gas tungsten arc welding</i>
HFV:	<i>High-frequency electric welding process for pipe during manufacturing</i>
HRB:	Dureza en escala Rockwell B
HSLA:	<i>High strength low alloy Steel</i>
HV:	Microdureza Vickers
LFV:	<i>Low-frequency electric welding process for pipe during manufacturing</i>
LW:	<i>Laser welding process for pipe during manufacturing</i>
M:	Metro
MAG:	<i>Metal active gas (GMAW)</i>

**XX** Estudio comparativo de propiedades mecánicas y microestructurales para una junta soldada en tubería de acero HSLA API5L grado X65 usada para líneas de transporte de hidrocarburos

---

MB:	Metal base
MIG:	<i>Metal Inert Gas (GMAW)</i>
mm:	Milímetro
MS:	Metal de soldadura
NPS:	<i>Nominal pipe size</i>
NTC:	Norma Técnica Colombiana.
PQR:	<i>Procedure qualification record</i>
Psi:	Libras por pulgada cuadrada
PSL:	<i>Product specification level</i> (Nivel de especificación del producto)
SAW:	<i>Submerged arc welding</i>
Schedule:	Asignación para espesor de tubería bajo el código ASME B36.10
SEM:	<i>Scanning electron microscope</i>
SEM - BSE:	<i>Scanning electron microscope - backscattered electrons</i>
SEM - SE:	<i>Scanning electron microscope - secondary electron</i>
SMAW:	<i>Shielded metal arc welding</i>
SMLS:	<i>Seamless pipe</i>
STD:	Estándar
WPQ:	<i>Welder performance qualification</i>
WPS:	<i>Welding procedure specification</i>
ZAC:	Zona afectada por el calor
ZAC-GG:	Zona afectada por el calor de grano grueso
ZAC-GF:	Zona afectada por el calor de grano fino

- 5G: Posición para prueba de soldador empleando posiciones de soldadura plana, vertical y sobre cabeza.
- Ø: Diámetro
- ": Pulgadas



# Introducción

En los últimos años el consumo de productos derivados del petróleo y del gas natural ha venido en crecimiento. La demanda frente a la oferta ha hecho que se busquen nuevas alternativas para atender el creciente consumo de estos productos y las facilidades para transportarlos.

Dentro de las alternativas para la atención de la demanda surge el requerimiento de expansión de líneas para transporte de hidrocarburos, como oleoductos y gasoductos. La expansión de estas facilidades de transporte hace necesario la implementación de procesos constructivos aplicables, confiables y óptimos. Dentro de los procesos para construcción de estas líneas se encuentran los procesos de soldadura para la unión de tubería y accesorios, procesos que son de gran relevancia por su aporte en confiabilidad de operación.

Las condiciones de operación, el lugar de instalación, el tipo de fluido a transportar, y las regulaciones locales, son las principales consideraciones que se deben tener en cuenta para diseñar líneas de transporte de hidrocarburos y los procesos de fabricación involucrados.

Los gasoductos, debido a las altas presiones de operación y al manejo de gas, son facilidades de transporte que tienen mayores niveles de exigencia en los controles de calidad para la fabricación.

El diseño de juntas soldadas cobra especial importancia para garantizar operaciones bajo la exigencia requerida para transporte de gas. Se debe analizar las normas asociadas al diseño, construcción y operación de gasoductos para realizar una adecuada selección del material a emplear en una junta. Se debe analizar las regulaciones nacionales de obligatorio cumplimiento, así como las normas y códigos internacionales aplicables a gasoductos.

El código de referencia más empleado para el diseño y fabricación de sistemas de tubería para transporte y distribución de gas es el código ASME B31.8 [34], que hace parte del código para tuberías a presión B31 de ASME.

El extenso abanico de procesos de soldadura existentes según la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) [3], genera la necesidad de conocer con exactitud las características de cada proceso. Esto con el fin de realizar la selección adecuada del proceso que garantice una junta soldada, cumpliendo los requerimientos mecánicos de calidad y aportando en la construcción de líneas de transporte confiables, que soporte las condiciones de operación a la cual está diseñada y minimizando los riesgos de falla con las consecuencias asociadas.

En este trabajo de investigación se realiza el diseño de juntas soldadas a tope, iniciando con la selección del material y diámetro de la tubería a emplear basado en la especificación API 5L [35] y el código ASME B31.8 [34], aplicable a redes de gasoductos. Se calcula bajo este mismo código el espesor mínimo requerido en la tubería para resistir los esfuerzos causados por las máximas presiones de operación indicadas en la resolución CREG-054-2007 [45]. El espesor final seleccionado es el espesor comercial ofertado por fabricantes de tubería según el código ASME B36.10 [63].

Para el estudio se realizan juntas soldadas en tubería de acero al carbono de alta resistencia y baja aleación (HSLA) API 5LX65, seleccionando procesos de soldadura, comúnmente empleados en la construcción de gasoductos, para generar procesos mixtos. Los procesos empleados son: soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW), soldadura por arco con electrodo metálico con gas de protección (GMAW) combinado con soldadura por arco con núcleo fundente y gas de protección (FCAW-G), soldadura por arco con electrodo de Tungsteno con gas de protección (GTAW) combinado con soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW).

Dentro de los procesos de aseguramiento de la calidad para uniones soldadas se debe realizar especificaciones de procedimientos de soldadura (WPS) empleando los procesos mixtos seleccionados. Se realiza la calificación de los procedimientos de soldadura (PQR) y la calificación de soldadores (WPQ) siguiendo los lineamientos y ensayos requeridos en la sección IX [49] del código de calderas y recipientes a presión (BPVC) de ASME, el cual



---

es mandatorio por el código ASME B31.8 [34] para requerimientos de soldadura en gasoductos.

Por cada proceso mixto empleado se realizan dos cupones o juntas soldadas para el análisis desde el nivel macro hasta un nivel microestructural. Se realizan ensayos de inspección visual, tensión, doblado guiado de cara y de raíz, dureza HRB, microdureza HV, microscopía óptica, microscopía SEM-SE, análisis de composición de elementos por SEM-BSE, medición de la ZAC y mediciones de tamaño de grano. Con los resultados se compara cada proceso aplicado para identificar el proceso con mejores características mecánicas a nivel macro y a nivel micro.

Cada actividad está enfocada en generar procesos confiables que puedan ser aplicados directamente en las líneas de producción para la construcción de gasoductos.

El presente trabajo servirá de guía a los ingenieros interesados en resolver problemas asociados a selección, control de calidad y aplicación de procesos de soldadura en la construcción de gasoductos, encaminados en cumplimiento de normatividad vigente, sustentado en estándares y códigos internacionales aplicables en cualquier país.

Además del entendimiento en requerimientos y cumplimiento de normatividad para juntas soldadas en gasoductos, este trabajo busca que el ingeniero diseñador de redes de transporte de hidrocarburos u otros fluidos, comprenda las características que se deben analizar a nivel macro y los pasos a seguir para realizar análisis y caracterización a nivel microestructural de las zonas presentes en una junta soldada. Análisis que lo llevará a un conocimiento más profundo del comportamiento del material a nivel microscópico.

Este trabajo permite comprender como se realiza un análisis de forma estructurada llevando la investigación desde un requerimiento industrial a nivel macro hasta un análisis a nivel micro.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Realizar un estudio comparativo de propiedades mecánicas y microestructurales para un diseño de junta soldada a tope en tubería de acero de alta resistencia y baja aleación HSLA, especificación API5L grado X65, usada para líneas de transporte de hidrocarburos, aplicando procesos de soldadura mixtos con SMAW, GMAW, GTAW, FCAW.

### Objetivos específicos

- Diseñar por medio del código ASME BPVC (*Boiler and Pressure Vessel Code*) Sección IX [49] una junta a tope en tubería especificación API 5L grado X65 (No.P-1 Grupo No 2) [49] con espesor de pared 40 (Schedule STD) [63], un WPS (*Welding Procedure Specification* por sus siglas en inglés), un PQR (*Procedure Qualification Record*) y un WPQ (*Welders Performance Qualification*) para cada uno de los procesos a emplear.
- Emplear procesos como: Soldadura por Arco con Electrodo Revestido (SMAW), Soldadura por Arco con Electrodo Metálico con Gas de protección (GMAW - MIG), Soldadura por Arco con Electrodo de Tungsteno con Gas de protección (GTAW), Soldadura por Arco con Núcleo de Fundente (FCAW), para la obtención de las juntas soldadas diseñadas.
- Realizar los ensayos mecánicos comparativos de tensión, doblez, sanidad, exigidos por el Código ASME BPVC Sección IX [49] para la caracterización física de las juntas soldadas, para cada uno de los procesos aplicados.
- Analizar las propiedades, el comportamiento microestructural y los cambios de fase generados en el depósito de soldadura y en la zona afectada por el calor en las uniones soldadas de los procesos de soldadura aplicados, mediante microdureza, dureza, microscopía óptica, y microscopía electrónica de barrido.

# 1. ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL

## 1.1 Fundamento teórico

La necesidad de requerimientos de infraestructura a nivel macro, por ejemplo, para transporte de gas, conlleva requerimientos a nivel micro como el análisis de microestructuras que resistan las condiciones de operación y servicio. En el presente estudio, se contempla el análisis a partir de una necesidad a nivel macro, haciendo un recorrido general de estos requerimientos para llegar paulatinamente a un requerimiento a nivel micro en donde se centrará este estudio.

A nivel macro, se analizarán requerimientos de producción de gas para cubrir la demanda actual y requerimientos de transporte por medio de gasoductos del gas producido, con selección de diámetros de tubería, análisis de presiones de operación y cálculos de espesores de pared que resistan la operación. Luego, se llegará al análisis a nivel micro enfocado en los procesos de soldadura que se estudiarán para la unión de tubería que transporta gas natural a altas presiones.

## 1.2 Ampliación del sistema de transporte de gas natural

La necesidad del aumento en la capacidad de distribución y transporte de gas natural es incuestionable debido a la creciente demanda de este producto y a los balances a nivel nacional y regional presentados por la Unidad de Planeación Minero-Energética del Ministerio de Minas y Energía (UPME) en el documento *Estudio Técnico para el Plan de Abastecimiento de Gas Natural* [1], donde se indica que:

- En la última década (2008-2019), el promedio de producción de gas fue de 1052 GBTUD [1].
- Al analizar diferentes escenarios entre los años 2019 y 2028, se presentaría un punto de corte con déficit de producción de gas frente a la demanda requerida en el año 2024 [1], que sería en promedio de 1500 GBTUD aproximadamente.
- Al año 2020, el sistema de transporte de gas natural suma 2961 Km de gasoductos construidos con capacidad de transporte de 3906 MPCD [1].

Así como en Colombia, en cualquier país que produzca petróleo y gas la demanda está siendo mayor que la oferta [5], por lo cual la ampliación de sistemas de producción, distribución y transporte de gas está siendo proyectada e implementada con el fin de abastecer los requerimientos de consumo.

Por lo anterior, es necesario contar con una red de distribución y transporte de gas implementando la introducción de nuevos campos de producción, la ampliación de las plantas compresoras existentes en el país y la construcción de nuevas redes de gasoductos, debido a las limitaciones y baja capacidad de transporte actual bajo condiciones de muy alta demanda. Si llegara a ejecutarse, esta ampliación favorecería el abastecimiento nacional [1] que debe ser garantizado según el artículo 4° del decreto colombiano 2345 del año 2015 [2].

En el país, la ampliación de la red de transporte de gas natural por medio de gasoductos es apremiante debido al crecimiento de la demanda y a que en el artículo 4° del Decreto 2100 del año 2011 [4] se indica que la producción de gas debe tener como prioridad atender el consumo interno del país, contrario a lo que se venía haciendo con la exportación de gas como prioridad. El *Estudio Técnico para el Plan de Abastecimiento de Gas Natural* [1] está promoviendo la inversión en infraestructura de confiabilidad para el suministro de gas a nivel nacional, que incluye plantas de almacenamiento y regasificación de gas y el complemento y construcción de gasoductos que aseguren una capacidad de transporte adicional de 1113 MPCD de gas natural (Millones de Pies Cúbicos por Día) [1].

Teniendo en cuenta las inversiones proyectadas por la UPME [1], el aumento en la capacidad de transporte de gas y la necesidad de ejecutar este tipo de proyectos de infraestructura se pueden alcanzar ampliando las líneas de gasoductos existentes, en conjunto con la construcción de nuevas líneas dentro de la red de transporte y distribución nacional, donde se emplean tuberías que van desde 2" hasta 30" de diámetro.

La expansión de la red de gasoductos, el mejoramiento de las estaciones de compresión, y la construcción de facilidades para almacenamiento y regasificación, requieren la unión de líneas de tubería por medio de procesos de soldadura, tanto en taller para la instalación final en campo como –en la gran mayoría de los casos– la construcción total de la línea del gasoducto en el sitio de instalación en campo, bajo condiciones locativas y ambientales muchas veces variables y adversas [5]. Por esto, los procesos de soldadura aplicados cobran gran importancia ya que deben ser confiables en su aplicación y operación para evitar riesgos debido a imperfecciones en las juntas soldadas o inadecuada selección de procedimientos que puedan causar fallas en la tubería debido a las grandes presiones en las que operan los gasoductos.

## **1.3 Códigos, normas y estándares regulatorios para transporte de gas natural**

### **1.3.1 Regulaciones nacionales**

Existen regulaciones nacionales para el transporte de gas natural en Colombia, que están formuladas en Normas Técnicas Colombianas (NTC) como:

- NTC 2505: Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales [39].
- NTC 3728: Gasoductos. Líneas de transporte y redes de distribución de gas [40].
- NTC 3838: Gasoductos. Presiones de operación permisibles para el transporte, distribución y suministro de gases combustibles [41].
- NTC 4282: Instalaciones para suministro de gas destinadas a usos industriales [42].
- NTC 5747: Gestión de integridad de gasoductos [43].

Se encuentran así mismo regulaciones legales dadas por el Ministerio de Minas y Energía por medio de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Algunas de estas son:

- Resolución No.071 de 1999: “Por la cual se establece el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural - (RUT)” [44].
- Resolución No.054 de 2007: “Por la cual se complementan las especificaciones de calidad del gas natural inyectado al Sistema Nacional de Transporte, definidas por la Resolución CREG 071 de 1999” [45].
- Resolución No. 131 de 2009: “Por la cual se modifica el numeral 6.3.2 del Reglamento Único de Transporte de Gas Natural, modificado mediante la resolución CREG 054 de 2007” [46].
- Decreto 2100 del 2011: “Por el cual se establecen mecanismos para promover el aseguramiento del abastecimiento nacional de gas natural y se dictan otras disposiciones [4].

Para el diseño de sistemas tubería para transporte y distribución de gas, las normas colombianas NTC 3728 [40] y NTC 3838 [41] de gasoductos hacen referencia al código internacional ASME B31.8 [34] “Sistemas de Tubería para Transporte y Distribución de Gas” que a su vez integra el *Código para Tuberías a Presión ASME B31*.

### 1.3.2 Regulaciones internacionales

Aunque las Normas Técnicas Colombianas NTC son normas nacionales que deben cumplir los fabricantes de gasoductos en el país, el código estadounidense ASME B31.8 [34] es exigido por la mayoría de las empresas para la fabricación de líneas de transporte de gas a nivel nacional e internacional [37] [47] [48], ya que es el código en que se basan las normas NTC 3728 [40] y NTC 3838 [41]. Este código se ha tomado como punto de referencia porque indica los requisitos para líneas de gas, incluyendo soldadura, además de ser más exigente y un referente internacional aplicable a nivel mundial.

El código ASME B31.8 [34] hace referencia al código ASME BPVC Sección IX [49], el cual contiene las reglas y directrices relacionadas con la calificación de soldadura y *brazing* (soldadura fuerte), requeridos en otras secciones del BPVC (*Boiler and Pressure Vessel Code*, por sus siglas en inglés). La sección IX cubre las directrices relativas al desarrollo y calificación de procedimientos de soldadura y a la calificación y recalificación de soldadores

y operadores de soldadura. También incluye las variables esenciales y no esenciales para tener en cuenta en los procesos de soldadura específicos.

## 1.4 Tubería empleada en sistemas de transporte y distribución de gas natural

Según el código ASME B31,8 [34], para la construcción de gasoductos se pueden emplear tuberías de acero bajo las siguientes especificaciones: API 5L, ASTM A53/ A53M, ASTM A106/ A106M, ASTM A134, ASTM A135/A135M, ASTM A139/A139M, ASTM A333/A333M, ASTM A381, ASTM A671, ASTM A672, ASTM A691, ASTM A984, ASTM A1005, ASTM A1006. El código también acepta el empleo de tubería en hierro dúctil y tubería plástica; polietileno, resinas epóxicas reforzadas y termoplásticos.

En el país y en varias partes del mundo, las redes para transporte y distribución de gas se están construyendo en su gran mayoría con tubería de alta resistencia y baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés *High-Strength Low-Alloy*), como la tubería fabricada bajo la especificación API 5L [35].

La tubería fabricada bajo la especificación API 5L es ampliamente empleada en los sistemas de transporte y distribución de gas [36] [37] [38] [10] [47] [48] debido a su alta resistencia y menor requerimiento de espesor de pared. Esto hace que la construcción, manipulación e instalación de gasoductos con este tipo de tubería sea más sencilla y económica por su menor peso en comparación con otros materiales de tubería para la misma aplicación.

## 1.5 Procesos de soldadura más empleados en gasoductos

El código ASME B31.8 [34] es el código de referencia empleado en Colombia para la construcción de sistemas de tubería para transmisión y distribución de gas. Este código contiene información referente a soldadura como los requerimientos para procedimientos de soldadores, calificación de procedimientos, calificación de soldadores y requerimientos de inspección y validación, con base en el código ASME BPVC - Sección IX [49], para

calificación de soldadura y soldadura fuerte, y el estándar API 1104 [55] para soldadura de tuberías y sus instalaciones relacionadas.

El código ASME B31.8 [34] indica que las juntas en tubería por medio de soldadura pueden realizarse por cualquier proceso o combinación de procesos que produzcan soldaduras y cumplan los requerimientos de calificación de procedimientos exigidos por el código, por lo tanto, no hay una limitación a procesos de soldadura puntuales que deban ser empleados.

La especificación API 5L [35] indica todos los procesos aceptables con los cuales se pueden fabricar las tuberías en acero con costura, tanto de forma longitudinal como de forma helicoidal. Los procesos de soldadura más empleados en fabricación de tubería son [35] [5]:

- Soldadura sin aporte de material: proceso por soldadura eléctrica de baja o alta frecuencia (LFW o HFW por sus siglas en inglés) y procesos por soldadura láser (LW).

- Soldadura con aporte de material: proceso de soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés), por arco con gas de protección (GMAW) y proceso combinado de soldadura por arco con gas de protección y arco sumergido (GMAW+SAW). Estos son procesos aceptados para la fabricación de tubería con costura. Para la construcción de gasoductos que implican el empalme por medio de juntas soldadas de los tramos de tubería, tanto en taller como ensamble en campo sobre los derechos de vía, los procesos de soldadura más comúnmente empleados son:

- *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)

- *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)

- *Flux Cored Arc Welding* (FCAW)

- *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW)



## 1.6 Fallas en tuberías de transporte de hidrocarburos y sistemas soldados

Las fallas presentadas en sistemas de transporte y distribución de crudo y gas por medio de oleoductos y gasoductos se pueden filtrar en seis categorías [15]: fallas del material, corrosión, fuerzas externas, clima y desastres naturales, error de operadores, y otras. Las fallas en líneas de tuberías debido a fallas del material y mecánicas presentan los mayores porcentajes de causa de accidentes en sistemas de producción y transporte de gas. Dentro de las fallas del material, se incluyen las fallas en soldadura, las cuales siempre están presentes en las estadísticas de falla [15] [16] y en la naturaleza de riesgos presentes en la tubería de transporte de gas natural [17].

Las fallas relacionadas con soldadura en tubería que transporta gas e hidrocarburos involucran defectos en la zona de metal de aporte y la zona afectada por el calor [8]. Por ejemplo, la corrosión por *pitting* es más sensible en la Zona Afectada por el Calor (ZAC). Con composiciones químicas semejantes en las tres zonas (zona de soldadura, zona afectada por el calor y metal base), la influencia del tamaño de grano es menor con respecto a la influencia de los defectos microestructurales que son más numerosos y agrupados en la ZAC y que generan mayor cantidad de nichos para el inicio del *pitting* [18]. Las fallas presentadas debido a agrietamiento por fatiga pueden iniciar en la línea de fusión entre el metal base y el material de aporte, que es la zona donde inicia el refuerzo de la junta soldada y se presentan concentradores de esfuerzos [20], fallas debido a defectos por procedimiento de fabricación inadecuado en juntas soldadas a tope como factor responsable de agrietamiento por corrosión esfuerzo [21], y fallas presentadas debido a socavados en el cordón de soldadura por aplicación inadecuada que genera agrietamientos durante pruebas hidrostáticas [19]. Las fallas presentadas en la zona de metal de aporte y la zona afectada por el calor han sido estudiadas por varios autores a través de diferentes factores que pueden causar averías en tuberías, como diseño inadecuado, corrosión, fatiga, *pitting* [18] [22] [23].

De acuerdo con el código ASME B31.8S [24], que trata sobre la gestión de integridad de sistemas de gasoductos, cabe resaltar que dentro de las amenazas potenciales a un gasoducto se encuentran, entre otras, las siguientes relacionadas con la soldadura:

- Amenazas dependientes del tiempo: corrosión interna, corrosión externa, agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC, por sus siglas del inglés *Stress Corrosion Cracking*).
- Amenazas por fabricación: costura longitudinal defectuosa.
- Amenazas potenciales relacionadas con soldadura/fabricación: soldadura circunferencial defectuosa, soldadura de fabricación defectuosa.

Todas las anteriores son amenazas que se aplican a juntas soldadas en tubería de acero. Algunos aspectos que minimizan las fallas en soldaduras son la realización de procedimientos de soldadura adecuados, la calificación de procedimientos, la calificación de soldadores, el conocimiento del comportamiento y las características de las juntas soldadas, así como una correcta gestión de calidad.

## **1.7 Investigaciones comparando propiedades de la junta soldada con diferentes procesos de soldadura**

Existen investigaciones en las cuales se analizan los efectos en el comportamiento de las soldaduras en tuberías empleadas en oleoductos y gasoductos en diferentes entornos. Por ejemplo, en un solo proceso de soldadura SMAW pero con variaciones en los materiales de aporte (E6010 y E7018), en pruebas de resistencia a la corrosión donde la junta soldada en un acero API 5L X52 empleó solo el electrodo E7018 en todos los pases, se presentó mayor resistencia a la corrosión en el ambiente corrosivo de prueba que era agua sedimentada de crudo de petróleo [11]. Además se varió la composición química de elementos fundentes empleados en el proceso de soldadura SAW para material API 5L X70; en este caso se varió la cantidad de titanio en el material fundente que interviene en el proceso y se encontró que la adición de titanio podría promover la formación de ferrita acicular, que es la morfología de microestructura óptima para fabricantes de acero para tuberías por la mejor combinación de resistencia - tenacidad que da este tipo de microestructura [12]. Al variar valores del proceso SMAW para unión de 6 juntas de tubería API 5L-X60, empleando diferentes diámetros, diferentes espesores de pared, diferentes pases de soldadura con diferentes tipo de electrodo, se encontró que la ZAC es donde se

presenta mayor complejidad en la microestructura y en el tipo de fases, debido a la cantidad de ciclos térmicos en que se ve involucrada esta zona y que la hacen más propensa a la fragilidad debido a la formación de zonas frágiles locales (LBZ). Todas las probetas analizadas en este estudio de ejemplo encontraron zonas frágiles locales en la ZAC [13].

Como los anteriores ejemplos, se puede encontrar bastante literatura sobre análisis de características en juntas soldadas empleando un solo proceso de soldadura en diferentes tipos de material API 5L. En la mayoría de los casos se emplea el proceso SMAW, ya que es el proceso más aplicado en la construcción de gasoductos y oleoductos [14]. El caso contrario ocurre con la cantidad de literatura encontrada y que se basa en comparar juntas soldadas empleando procesos de soldadura mixtos, para un solo tipo de diseño de junta, en un mismo material como la tubería API5L grado X65 aplicada a transporte de gas natural. Existen procesos de soldadura mixtos, manuales o semiautomáticos, direccionados hacia el desarrollo de nuevas y más eficientes formas para aplicación de soldadura, tanto en taller como en campo, para la construcción de gasoductos [14].

Diferentes autores han realizado investigaciones en términos de comparación y caracterización en juntas soldadas empleando procesos mixtos de soldadura o diferentes procesos simples para un mismo material. Los resultados generales de algunas de estas investigaciones se describen a continuación:

- En el análisis de soldabilidad de aceros microaleados en tuberías de alta presión empleando los procesos SMAW y GMAW, combinado con FCAW-S (autoprotegido), en dos muestras de acero API 5LX65, cada una con diferentes porcentajes de elementos microaleantes, el autor determinó que el proceso combinado GMAW+FCAW-S obtiene los mayores valores de energía absorbida en el metal de aporte en pruebas de impacto Charpy-V a 20 y -20°C para los dos tipos de aceros empleados [30]. Con el mismo diseño de procesos de soldadura, el autor analizó el efecto del procedimiento sobre las propiedades de las uniones soldadas de aceros microaleados y encontró que, independientemente del tipo de microaleantes considerados en el ensayo, con una temperatura de precalentamiento de 75°C no se observan fisuras en los ensayos de soldabilidad Tekken. También se indica que, tomando como referencia la tubería API 5L,

el acero microaleado con Nb-V-Ti presenta mejores especificaciones de resistencia a la tensión que el acero con componentes aleantes como Nb-Ti-Cu-Ni [31].

- En la caracterización de depósitos ferríticos puros (material de aporte puro) de alta resistencia soldados por SMAW, MCAW, FCAW y SAW, el autor analizó las características mecánicas y metalográficas de materiales de aporte puro, sin combinación de procesos, pero variando componentes de aleación y variables para cada uno de los procesos indicados. Se encontró que para cumplir con los requerimientos de AWS se debe prestar atención a los factores que perjudican la tenacidad. Además, al buscar la composición de elementos aleantes para cumplir con los requerimientos de impacto hubo menor dificultad que para cumplir con los valores de tracción. Se presentan resultados puntuales de la influencia con adición o no de elementos aleantes para cumplir con los requerimientos de las AWS para metales de aporte puro [29].

- En la evaluación de la susceptibilidad a la fisuración en frío en soldaduras empleando SMAW y SMAW combinado con FCAW, sin protección gaseosa, sobre acero API 5LX70, el autor encontró que la temperatura óptima de precalentamiento para SMAW varía entre 75 y 100°C, mientras que a temperatura ambiente (25°C) en el proceso FCAW no se observan fisuras al tomar esta temperatura como óptima. Con la obtención de la temperatura óptima de precalentamiento se busca minimizar los mecanismos de fisuración por hidrógeno en uniones soldadas [32].

- En el estudio de la influencia de la entrada de calor en las características mecánicas y microestructurales finales de la zona afectada por el calor (ZAC) en uniones soldadas en tubería para transporte de hidrocarburos, empleando los procesos de soldadura SMAW, GMAW, FCAW, y la combinación entre ellos para soldar tubería API 5LX65. El autor evidenció que la entrada de calor influye en el comportamiento de la junta soldada. Se encontró además que el proceso combinado SMAW+GMAW aportó la menor entrada de calor lo que conlleva una menor zona afectada por el calor (ZAC). En términos de microdureza, los mayores valores se obtuvieron con los procesos combinados SMAW+FCAW y GMAW+FCAW, mientras el proceso SMAW no combinado obtuvo los menores valores de microdureza. En este mismo estudio, se analizaron las diferentes

---

microestructuras presentes en las zonas afectadas por el calor generadas por los procesos de soldadura aplicados [33].

- En la caracterización de juntas soldadas por procesos láser, GTAW y GMAW, en acero de fase dual DP780, el autor comparó la dureza, la resistencia a la tensión y resistencia a la fatiga de cada proceso empleado. Se encontró que el tamaño de la zona soldada incrementa con la mayor entrada de calor, mientras que la dureza del metal de aporte y de la zona afectada por el calor aumenta con la velocidad de enfriamiento. El mayor aporte de calor generado fue por el proceso GMAW, seguido por GTAW, y finalmente el proceso de soldadura por láser entregó el menor aporte de calor con la menor zona afectada por el calor y el menor tamaño de metal de soldadura. La mayor dureza fue para el proceso de soldadura por láser, seguido por el proceso GTAW y el proceso GMAW. La resistencia a la fatiga fue menor que la del metal base en todas las zonas soldadas. La vida a la fatiga del acero soldado con GMAW fue menor que en los otros dos procesos [28].

Así como se encuentran investigaciones que involucran materiales de tubería como las anteriormente expuestas, en otras investigaciones se encuentra que los autores realizan comparación de procesos en materiales diferentes a aceros y que son comúnmente empleados en la industria. Algunas de estas investigaciones son:

- Caracterización de los modos de falla para diferentes procesos de soldadura por arco en aceros inoxidable AISI/SAE 304 empleando los procesos SMAW, GMAW y FCAW [25].
- Comparación de las propiedades mecánicas de juntas soldadas en cobre puro por medio de los procesos de soldadura *Friction Stir Welding* (FSW) y GTAW [26].
- Caracterización del comportamiento de soldaduras en aleaciones de Titanio empleando los procesos de *Laser Beam Welding* (LBW), *Electron Beam Welding* (EBW) y *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) [27].

## 1.8 Justificación

Debido al crecimiento de redes para transporte de gas natural –gasoductos– proyectado en Colombia [1], así como en otros países productores de hidrocarburos, se hace necesaria la implementación de procesos óptimos que permitan mejorar la eficiencia en la construcción de estas redes, cumpliendo los requerimientos mecánicos y de compatibilidad de materiales para la segura operación de los sistemas. Entre los procesos de construcción de gasoductos que tienen más impacto por sus costos de implementación y la confiabilidad que deben tener están los procesos de soldadura. Estos procesos deben cumplir requerimientos como tiempos de ejecución, calidad de implementación y confiabilidad en operación. Por ser tan críticos en la fabricación y montaje de tubería que conforman la red de gasoductos, se debe realizar una selección precisa del tipo de proceso a emplear cuando se realizan las uniones, por ello, se debe tener total claridad de las características resultantes de una junta soldada aplicando determinado proceso de soldadura.

Debido a lo anterior, es importante conocer las características mecánicas y microestructurales que se logran con cada uno de los procesos de soldadura más empleados en la realización de uniones en tubería de acero al carbono para gasoductos. Se busca realizar el análisis en tubería para transporte de gas al ser las presiones de operación más elevadas y críticas que las presiones de operación en líneas de transporte de gasolina o transporte de crudo.

Con el conocimiento de las características de juntas soldadas el departamento de ingeniería, por medio del diseñador, puede predecir hasta cierto nivel el comportamiento bajo presión, bajo cargas cíclicas y bajo ciertas condiciones particulares de operación de la junta soldada. Así mismo, los departamentos de mantenimiento y de integridad podrán realizar análisis que determinen el estado actual de una junta soldada, enfocados en operatividad, confiabilidad y cumplimiento de la vida útil esperada del sistema diseñado. En Colombia generalmente los diseños se realizan para 20 años de vida útil y en Estados Unidos para 30 años [17], teniendo en cuenta las respectivas rutinas de mantenimiento de las líneas construidas.

Actualmente, para reducir los costos de construcción y montaje de tubería los diseñadores y constructores de gasoductos emplean tubería de acero al carbono con características de alta resistencia y baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés). Así, obtienen menores espesores de pared del tubo y disminuyen los costos de instalación, ya que se requiere menor tiempo en preparación de las juntas, menor cantidad de material de aporte, menores tiempos en procesos de soldadura así como menos tonelaje de material para manipular [54].

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe contar con información confiable, exacta y clara del comportamiento de las juntas soldadas, por medio de los procesos de soldadura más utilizados en materiales de tubería empleados comúnmente en construcciones de gasoductos. En el presente estudio se analizarán, caracterizarán y se compararán las propiedades mecánicas y microestructurales de juntas soldadas por los procesos de soldadura más empleados en la industria para instalación de tubería empleada en gasoductos y poliductos.

De la amplia gama de procesos de soldadura existentes, los procesos que se analizarán y compararán son mixtos por arco eléctrico con aporte de material como: SMAW, soldadura por arco con gas de protección y transferencia por tensión superficial (GMAW-STT – *Gas Metal Arc Welding and Surface Tension Transfer*), soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas de protección (GTAW - gas tungsten arc welding) y soldadura por arco con electrodo tubular y núcleo fundente (FCAW - flux cored arc welding). Todos los procesos están dados y son aceptados por el estándar API 1104 [55] y por la sección IX del código ASME [49].

La descripción general de los procesos a emplear en la realización de las juntas soldadas objeto de esta investigación se presentan a continuación y se basan en términos del estándar AWS A3.0 [3] de la American Welding Society (AWS). Cada uno de los procesos se genera por arco eléctrico entre un electrodo y el charco de soldadura sobre el metal base y sin la aplicación de presión [6] [7] [8] [9]:

GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) o soldadura por arco con electrodo de Tungsteno con gas de protección: es un proceso de soldadura por arco eléctrico generado entre un electrodo de tungsteno no consumible y el charco de soldadura en el metal base. El proceso puede realizarse con o sin aplicación de metal de aporte no continuo. Para el

objetivo de esta tesis, se empleó material de aporte. La protección del arco se realiza con gas de protección externo y es un proceso que no genera escoria [3].

SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) o soldadura por arco con electrodo revestido: es un proceso de soldadura por arco eléctrico generado entre un electrodo metálico de aporte consumible, revestido, no continuo, y el charco de soldadura en el metal base. La protección del arco se realiza por medio de la descomposición del material fundente que recubre el electrodo, generando gases que protegen el arco y material para protección del charco en el proceso de solidificación, lo cual genera escoria [3].

GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) o soldadura por arco con electrodo metálico con gas de protección: es un proceso de soldadura por arco eléctrico generado entre un electrodo de metal de aporte consumible, continuo, y el charco de soldadura en el metal base. La protección del arco se realiza con gas de protección externo. Es un proceso que no genera escoria [3].

Durante el proceso de soldadura GMAW, la transferencia del metal de aporte al charco de soldadura se puede realizar por varios métodos como transferencia por corto circuito [50], transferencia globular, transferencia por aspersion o spray [51].

En la actualidad, los mayores desarrollos en sistemas de transferencia de metal de aporte se han realizado en el sistema de transferencia por corto circuito [51] donde se han presentado variantes como el primer sistema comercial de transferencia por tensión superficial (STT - *Surface Tension Transfer*) [52]. Este sistema puede ser empleado en el pase de raíz para uniones de tubería y tiene ventajas como control preciso del arco de soldadura, buena penetración, bajo aporte de calor, reducción en las salpicaduras y en la emisión de humos, así como mayor velocidad de aplicación [53]. Debido a que es un proceso actual y moderno, se tendrá en cuenta este sistema de transferencia en la aplicación del proceso de soldadura GMAW.

FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) o soldadura por arco con núcleo fundente: es un proceso de soldadura por arco eléctrico generado entre un electrodo de metal de aporte



consumible, continuo, y el charco de soldadura en el metal base. El electrodo tiene configuración tubular y dentro su núcleo contiene el material fundente que al quemarse forma los gases de protección del arco y aporta el material de protección del charco en el proceso de solidificación. Es un proceso que genera escoria y se puede aplicar con o sin gas de protección adicional externo [3].

### **1.8.1 Identificación del problema**

En el país se cuenta con pocos estudios completos que proporcionen datos exactos de caracterización mecánica y microestructural de juntas soldadas por medio de procesos de soldadura mixtos. Es necesario conocer el comportamiento y las principales diferencias al emplear los procesos SMAW, GTAW, GMAW y FCAW, implementando un mismo diseño de junta para todas las soldaduras. Las juntas soldadas a tope (*butt weld*) es el tipo de junta más utilizado en la instalación y montaje de líneas para transporte de gas y se aplica de acuerdo con la especificación API 5L. Es importante contar con datos confiables, repetibles y certeros para que los diseñadores y fabricantes de gasoductos puedan realizar una selección óptima y confiable de un proceso de soldadura y sus respectivos parámetros en pro de obtener los mejores resultados en confiabilidad, operatividad y vida útil esperada de las juntas soldadas.

## 2.DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo de esta tesis se dividió en tres fases con el fin de plantear un flujo de trabajo para la selección adecuada y sustentada de especificación del material de tubería, presiones de operación, espesores de pared para soportar la presión seleccionada, procedimientos de soldadura, calificación de procedimientos de soldadura, calificación de soldadores, análisis mecánico y microestructural de las juntas soldadas en tubería para gasoductos. Estas tres fases tienen el objetivo de realizar un análisis desde el nivel macro (Fase I) de la necesidad de ampliación de redes de transporte de gas, selección de presiones de operación y selección de especificaciones de tubería hasta el nivel micro (Fase III) de caracterización mecánica y microestructural de materiales. El flujo de trabajo se muestra en la tabla 2-1 y las tres fases planteadas se resumen a continuación:

**Fase I:** Requerimiento, selección y especificación de la tubería a emplear.

**Fase II:** Selección de procesos de soldadura, realización de especificaciones de procedimientos, realización de las juntas soldadas con los niples de tubería, calificación de procedimientos y calificación de soldadores empleados para la realización de las juntas soldadas.

**Fase III:** Caracterización mecánica y caracterización microestructural de las juntas soldadas.

Tabla 2-1. Desarrollo experimental. Fases I, II, III del flujo de trabajo.

FASE I			
Selección del material de tubería para transporte de gas natural	Selección del diámetro de tubería	Selección de presión de operación de tubería	Cálculo de espesor de pared de tubería

FASE II					
Realización de especificaciones de procedimientos de soldadura (WPS)	Realización de las juntas soldadas	Calificación de los procedimientos de soldadura (PQR)		Calificación de soldadores (WPQ)	
SMAW  GMAW + FCAW  GTAW + SMAW	SMAW  GMAW + FCAW  GTAW + SMAW	SMAW  GMAW + FCAW  GTAW + SMAW	Inspección visual	SMAW  GMAW + FCAW  GTAW + SMAW	Inspección visual
			Pruebas de doblez de raíz		Pruebas de doblez de raíz
			Pruebas de doblez de cara		Pruebas de doblez de cara
			Pruebas de tensión *		Pruebas de tensión no se requieren para un WPQ

FASE III					
Caracterización mecánica			Caracterización metalográfica		
SMAW	Análisis de composición química del material base		SMAW	Análisis de fases por microscopía óptica	Metal de soldadura
	Pruebas de tensión **				ZAC de grano grueso
GMAW + FCAW	Pruebas de dureza por indentación	Metal de soldadura	GMAW + FCAW	Análisis de fases por microscopía electrónica de barrido	ZAC de grano fino
		ZAC de grano grueso			Metal base
GTAW + SMAW	Pruebas de microdureza Vickers	ZAC de grano fino	GTAW + SMAW	Espectro atómico por microscopía electrónica de barrido	Metal de soldadura
		Metal base			ZAC
		Metal de soldadura			Metal base
		ZAC de grano grueso			Metal de soldadura
		ZAC de grano fino			ZAC
		Metal base			Metal base

\*\* Realizadas en la calificación de procedimiento y calificación de soldadores. Serán empleadas también para caracterización mecánica de los procesos de soldadura aplicados.

## 2.1 Fase I. Requerimiento, selección y especificación de la tubería a emplear.

En la fase I de este trabajo se realizará la selección del material de tubería, así como los parámetros de diámetro y espesor del material. Basado en datos de procesos para transporte de gas como lo es la presión de operación. Presión que depende de las regulaciones locales asociadas a transporte de gas.

En la tabla 2-2 se observa el flujo de trabajo para esta primera fase.

FASE I			
Selección del material de tubería para transporte de gas natural	Selección del diámetro de tubería	Selección de presión de operación de tubería	Cálculo de espesor de pared de tubería

Tabla 2-2. Fase I del flujo de trabajo. Selección del material, diámetro, presión y espesor de tubería.

### 2.1.1 Requerimiento

En busca de la necesidad de desarrollos en Colombia, como se sustenta en el capítulo 1, las ampliaciones a nivel nacional en infraestructura para transporte de hidrocarburos son necesarias para cumplir con la demanda que el país tiene proyectada para el año 2028. El documento *Estudio Técnico para el Plan de Abastecimiento de Gas Natural* [1] desarrollado por la Unidad de Planeación Minero Energética del Ministerio de Minas y Energía de Colombia está promoviendo la inversión en infraestructura de confiabilidad para el suministro de gas a nivel nacional, lo cual implica plantas de almacenamiento y regasificación de gas complementadas con la construcción de gasoductos que aseguren una capacidad de transporte adicional de 1113 MPCD (millones de pies cúbicos por día) de gas natural [1].

Debido a lo anterior, esta tesis trabajará en facilidades para el transporte de gas natural como los gasoductos. Como se indicó en el Capítulo 1, la ampliación de gasoductos es una necesidad actual no solo en el país, sino también en otras partes del mundo [5]. Estos

sistemas están compuestos por tuberías de diferentes materiales, por lo cual se seleccionará el material comúnmente empleado en líneas para transporte de gas.

## 2.1.2 Material

De los catorce tipos de tubería en acero al carbón aceptados por el código ASME B31.8 [34] para construcción de gasoductos, la tubería de alta resistencia y baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés) de especificación API 5L [35] es ampliamente empleada en la construcción de estos sistemas de transporte. Los grados del acero API 5L son A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, X90, X100, X120, los cuales aumentan la resistencia a la tensión a medida que aumenta el grado de la tubería. Entre los grados más empleados se encuentran el X42, X52 y X65.

Esta investigación trabajará con la especificación API 5L X65, ya que es tubería de acero al carbón tipo HSLA, con una resistencia que cubre la mayoría de las presiones empleadas en transporte de gas, como se verá más adelante. En la tabla 2-a se presenta un resumen de las características generales del material API 5L grado X65, empleado para la fabricación de tubería, junto con la referencia cada norma asociada a la característica indicada de interés para esta investigación.

Características Acero API 5L X 65 por estándar [35]	
Estándar	API
Especificación	5L
Edición	46
Grado	X65
PSL (Nivel de especificación del producto)	PSL2
Material	Acero al carbono
Resistencia a la fluencia mínima especificada (PSI)	65000
Resistencia a la tensión mínima (Psi)	77000
Tipo de acero:	HSLA
Composición nominal	C-Mn
Especificaciones dimensionales	ASME B63,10
con costura / sin costura	con costura
Proceso de manufactura	ERW <i>Electric Resistance Welded, Type E.</i> (Soldadura por Resistencia eléctrica - sin metal de aporte), aceptado por API 5L y ASME B31.8 sección 804.7.3.

campo de aplicación	Transporte de gas, aceptado por ASME B31.8 sección 804.7.3 y sección 814.1.1. Transporte de petróleo, agua.
Industria	Manejo de hidrocarburos
Por ASME SECCION IX (Tabla QW/QB-422) [49]	
Especificación No.	API 5L
Grado	X65
P No. (Grupo de metal base para calificación)	1
Grupo No.	2
Forma del producto	Tubería con costura
Composición Nominal	C-Mn
Resistencia a la tensión mínima especificada- Ksi (Mpa)	78 (540)
Por ASME B31.8, Apéndice D [34]	
Resistencia a la fluencia mínima especificada (PSI)	65000

Tabla 2-a. Características generales del acero API5LX65

### 2.1.3 Diámetro

Una vez definido el tipo de material a emplear (API 5L X65), se selecciona el diámetro que se utilizará en esta investigación. Los diámetros empleados para transporte de gas a nivel nacional van desde 2" hasta 24". Los diámetros de 4", 6" y 8" son comúnmente empleados en redes de transporte y distribución como se observa en la tabla 2-3 [59]. A nivel internacional se pueden encontrar diámetros de tubería para transporte de gas que van desde 4" hasta 30" [17].

En esta investigación se empleará tubería de 6" de diámetro para realizar el análisis de espesor de tubería, debido a que este diámetro está presente en la mayoría de los gasoductos, como se observa en la tabla 2-4, en la cual se tiene en cuenta la frecuencia del empleo de tubería de 6" de diámetro en gasoductos según la tabla 2-3, pero no la longitud de tubería instalada para cada diámetro indicado. Esta tabla registra las líneas de gasoductos de la *Transportadora de gas internacional* (TGI), que es la empresa con mayor longitud instalada del sistema de transporte de gas en Colombia con más de 3900 Km de gasoductos instalados [58].

INFRAESTRUCTURA TGI		
GASODUCTO	DIÁMETROS	CAPACIDAD
<b>BALLENA - BARRANCABERMEJA</b> Longitud: 771 Kms	18	260
<b>CENTRO ORIENTE</b> (Incluye gasoductos del Sur de Bolívar) Longitud: 1.051 Kms troncal + 92,41 Kms loops	22, 20, 14, 12, 6	230, 209, 195, 15
<b>MARIQUITA - CALI</b> Longitud: 760 Kms	20, 8, 6, 4	170
<b>BOYACÁ SANTANDER</b> Longitud: 305 Kms	10, 8, 6, 4, 2	64
<b>CUSIANA - LA BELLEZA</b> Longitud: 220 Kms troncal + 185,88 Kms loops	20, 6, 4, 2	392
<b>MORICHAL - YOPAL</b> Longitud: 13 Kms	4	5
<b>CUSIANA - APIAY - USME</b> Longitud: 409 Kms	12, 10, 6	33, 17
<b>DE LA SABANA</b> Longitud: 150 Kms	20, 14, 10, 6, 4, 2	140
<b>PROYECTO BUENAVENTURA - YUMBO</b> Longitud: 102 Kms		

Tabla 2-3. Líneas de gasoductos de la empresa TGI [59]

Diámetro (in)	2	4	6	8	10	12	14	18	20	22
Frecuencia en tabla 2-3	3	5	6	2	3	2	2	1	4	1

Tabla 2-4. Frecuencia del empleo de tubería de 6" de diámetro en redes de gasoductos.

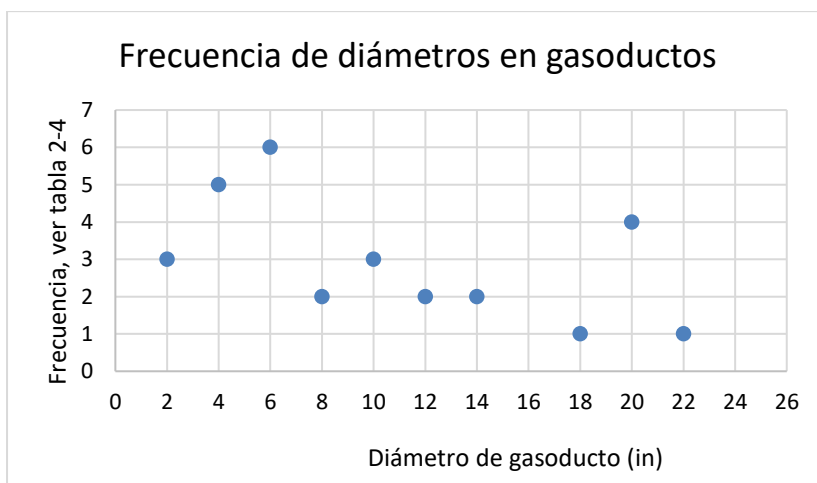


Figura 2-1. Frecuencia de diámetros empleados en gasoductos.

#### 2.1.4 Presión de diseño.

La presión máxima de operación en los puntos de entrada a gasoductos se indica en el ítem 6.3 del *Reglamento único de transporte de gas natural* de la resolución *CREG 071 de 1999* [44]. Esta presión está regulada hasta los 1200 psi, que es la presión exigida en los requerimientos de operación y calidad de gas del reglamento.

Los gasoductos operan a diferentes presiones a lo largo del recorrido, las cuales que pueden variar desde los 400 Psi hasta por debajo de la presión máxima exigida en los puntos de entrada (1200 Psi). Las presiones de operación de diferentes gasoductos se indican en el *Estudio técnico para el plan de abastecimiento de gas natural* [1] del año 2020 publicado por el Ministerio de Minas y Energía. A nivel internacional se presentan rangos de presión que van desde menos de 100 Psi hasta más de 1000 Psi [17].

En esta investigación, para el cálculo del espesor de tubería, se trabajará con la máxima presión de operación exigida en los puntos de entrada a gasoductos que es 1200 Psi, multiplicado por el factor para pruebas de presión hidrostática. Esta prueba es requerida para validar y liberar la construcción de gasoductos.

Se empleará el valor de presión para prueba hidrostática por ser el valor más crítico al cual estará sometida la tubería de gasoductos. Para ASME B31.8 [34], la presión de prueba debe ser 1.25 veces la máxima presión de operación. Este factor también es exigido por la norma ICONTEC NTC 3728 [40].

$$\text{Presión de prueba} = 1.25 * \text{máxima presión de operación.} \quad (\text{Ec 2.1})$$

$$\text{Presión de prueba} = 1.25 * 1200 \text{ Psi} = 1500 \text{ Psi.}$$

Por lo anterior, 1500 Psi será la presión de diseño que se empleará. Luego de conocer la presión, el material y el diámetro a emplear, se realiza el cálculo del espesor de tubería requerido.



## 2.1.5 Espesor de tubería

En todos los procesos de transporte de fluidos empleados en la industria *oil & gas*, ya sea transporte de agua, lodos, petróleo, derivados del petróleo o gas, se debe calcular el espesor de pared de la tubería empleada. Con este cálculo se asegura que la tubería soportará las condiciones de presión de diseño del proceso y que contará con los factores de sobre espesor por corrosión.

El espesor es un factor para tener en cuenta debido a que en la mayoría de los casos la tubería no cuenta con algún tipo de recubrimiento en la pared interna, lo cual permite el contacto directo del material con el fluido transportado. Con el paso del tiempo, este contacto genera corrosión y desgaste por erosión debido al arrastre del mismo fluido y a pequeñas partículas presentes en el mismo.

Para el cálculo del espesor de pared de tubería, en la industria *oil & gas* se emplean los siguientes códigos:

- ASME B31.8: Sistemas de tubería para transporte y distribución de gas [34].
- ASME B31.4: Sistemas de transporte de hidrocarburos líquidos y otros líquidos por oleoducto [60].
- ASME B31.3: Tuberías de proceso [61].
- ASME B31.1: Tuberías de potencia [62].

En el caso de cálculo para el espesor de pared en la tubería empleada para transporte de gas, se emplea el código ASME B31.8 [34]. En la sección 805.2.3 del código, se indica que el esfuerzo circunferencial (*hoop stress*,  $S_H$ , por sus siglas en inglés), es aquel que actúa circunferencialmente en la pared de tubería y es determinado por la fórmula Barlow's así:

En el sistema de medidas de E.U.:

$$S_H = \frac{PD}{2t} \quad (Ec\ 2.2)$$

En unidades del sistema internacional:

$$S_H = \frac{PD}{2000t} \quad (Ec\ 2.3)$$

donde:

t: Espesor de pared de la tubería.

P: Presión del fluido transportado

D: Diámetro de la tubería

SH: Esfuerzo circunferencial

Esta fórmula no tiene en cuenta factores exigidos por el Código ASME B31.8 [34], que se verán más adelante para el cálculo exacto del espesor  $t$  de tubería fabricada en acero para gasoductos.

En el diseño de sistemas de gasoductos, el esfuerzo circunferencial “SH” para un material determinado será el máximo permitido por el Código ASME B31.8 [34]. Para el cálculo del espesor de pared  $t$ , se trabaja con el esfuerzo circunferencial  $S_H$  presente en la pared de tubería, debido a que los esfuerzos longitudinales  $S_p$  generados por presiones internas, suelen ser la mitad del esfuerzo circunferencial, como se indica en la sección 833.2 del código ASME B31.8 [34] dado por la siguiente fórmula, considerando que los extremos de la tubería no están restringidos:

$$s_p = 0.5 * S_H \quad (Ec\ 2.4)$$

Si se considera que los extremos de la tubería están restringidos, el esfuerzo longitudinal  $S_p$  debido a la presión interna será menor que la tercera parte del esfuerzo circunferencial  $S_H$ , como se indica en la sección 833.2 del código ASME B31.8 [34]. El esfuerzo longitudinal está dado por la fórmula:

$$s_p = 0.3 * S_H \quad (Ec\ 2.5)$$

donde:

$S_p$ : Esfuerzo longitudinal en la pared de tubería debido a la presión interna del fluido.

$S_H$ : Esfuerzo circunferencial en la pared de tubería debido a la presión interna del fluido.

Según el código ASME B31.8 [34], para el cálculo exacto del espesor de pared de tubería en acero, se deben tener en cuenta varios factores que el código relaciona en la fórmula

dada en la sección 841.1.1. Con esta fórmula, se puede determinar el espesor de pared nominal o la presión de diseño:

$$P = \frac{2St}{D} FET \quad (Ec 2.6)$$

En la tabla 2-5, se indica el significado de cada parámetro y las correspondientes unidades. Las tablas asociadas a cada parámetro y el apéndice D se encuentran en el código ASME B31.8 [34].

PARAMETRO	SIMBOLO	UNIDAD
Espesor de pared nominal de la tubería	t	in
Presión de operación	Po	Psig
Presión de diseño	P	Psig
Diámetro exterior de la tubería	D	in
Esfuerzo de fluencia mínimo especificado (SMYS) (Apéndice D)	S	Psi
Factor de diseño por tipo de locación (Tabla 841.1.6-1)	F	adimensional
Factor de junta longitudinal (Tabla 841.1.7-1)	E	adimensional
Factor de temperatura (Tabla 841.1.8-1)	T	adimensional

Tabla 2-5. Parámetros para hallar el espesor de pared nominal o la máxima presión de diseño para tubería según ASME B31.8 [34]

Como ya se seleccionó el tipo de material, el diámetro y la presión de diseño de la tubería del gasoducto, se debe encontrar el espesor de pared requerido por la tubería para soportar la presión. Despejando el espesor “t” de la ecuación 2.6 anterior, se obtiene:

$$t = \frac{PD}{2SFET} \quad (Ec 2.7)$$

Empleando las tablas indicadas del código, se seleccionan los valores para cada uno de los parámetros de la fórmula (tabla 2-6):

Parámetro	Valor	Unidad	Observaciones
Po	1200	Psi	Se tomará la presión de operación como la máxima presión en puntos de entrada a gasoductos permisible por la CREG 071 de 1999 [44].
P	1500	Psi	Se tomará la presión de diseño como la presión de prueba hidrostática (1,25 veces la presión de operación), de acuerdo con la ASME B31.8 [34] y la NTC 3728 de ICONTEC [40].
D	6,625	in	El diámetro exterior para tubería será de 6", según ASME B36.10 [63].
S	65000	Psi	Se usa SMYS para el material API 5L X65, de acuerdo con la Tabla D-1 del código ASME B31.8 [34]
F	0,80	adimensional	El factor de diseño por tipo de locación se toma como una locación clase 1 Div. 1 al considerarse factor para gasoductos, tuberías principales y líneas de servicio. Por tablas 841.1.6-1 y 841.1.6-2 del código ASME B31.8 [34]
E	1,00	adimensional	El factor de junta longitudinal para tubería API 5L se selecciona teniendo en cuenta que es tubería fabricada por soldadura eléctrica (Tabla 841.1.7-1 del código ASME B31.8) [34].
T	0,867	adimensional	Para el factor de temperatura, se toma el menor valor (232 °C o menos) para cubrir todo el rango de temperaturas indicadas en la tabla 841.1.8-1 del código ASME B31.8 [34].

Tabla 2-6. Valores de los parámetros para cálculo de espesor de la tubería.

Al reemplazar en la ecuación 2.7 , se obtiene el espesor de tubería  $t$  así:

$$t = \frac{1500 \frac{Lb}{in^2} * 6,625 \text{ in}}{2 * 65000 \frac{Lb}{in^2} * 0,80 * 1,00 * 0,867} = 0,110 \text{ in } (2,794 \text{ mm}) \text{ (Ec 2.8)}$$

Al valor  $t$  del espesor calculado, en la práctica usualmente se le aplica un factor de sobre espesor para tener en cuenta factores por corrosión. Este valor oscila entre 1/16" y 1/8" y en esta investigación se empleará 1/8", por ser el más conservativo.

$$t + \text{factor por corrosión} = 0,110 \text{ in} + 0,125 \text{ in} = 0,235 \text{ in} (5,969 \text{ mm}) \quad (\text{Ec } 2.9)$$

El espesor mínimo de la tubería teniendo en cuenta la presión de diseño y el sobre espesor por corrosión debe ser 0.235". Con este valor, en la tabla 1 de dimensiones de tubería del código ASME B36.10 [63], se busca el espesor más cercano para tubería de 6" de diámetro, siempre por encima del valor calculado (tabla 2-7).

El valor más cercano al espesor requerido es 0.250", que no es comercial y se fabrica bajo pedido especial, lo cual aumenta los costos y los tiempos de fabricación. Por esto, se debe seleccionar el siguiente espesor comercial de la tabla 1 del código ASME B36.10 [63]. El espesor comercial más cercano por encima del mínimo calculado, como se observa en la tabla 2-7, es el espesor estándar Schedule 40: 0.280" (7.11 mm).

**Table 1 Dimensions and Weights of Welded and Seamless Wrought Steel Pipe (Cont'd)**

NPS [Note (1)]	Customary Units			Identification [Standard (STD), Extra-Strong (XS), or Double Extra Strong (XXS)]	Schedule No.	DN [Note (2)]	SI Units		
	Outside Diameter, in.	Wall Thickness, in.	Plain End Weight, lb/ft				Outside Diameter, mm	Wall Thickness, mm	Plain End Mass, kg/m
6	6.625	0.141	9.77	...	...	150	168.3	3.58	14.54
6	6.625	0.156	10.79	...	...	150	168.3	3.96	16.05
6	6.625	0.172	11.87	...	...	150	168.3	4.37	17.67
6	6.625	0.188	12.94	...	...	150	168.3	4.78	19.28
6	6.625	0.203	13.94	...	...	150	168.3	5.16	20.76
6	6.625	0.219	15.00	...	...	150	168.3	5.56	22.31
Valor mas cercano	6	6.625	0.250	...	...	150	168.3	6.35	25.36
Espesor comercial	6	6.625	0.280	STD	40	150	168.3	7.11	28.26

Tabla 2-7. Espesor de pared para tubería de 6" de diámetro nominal según el apartado de la Tabla 1 del código ASME B36.10 [63].

En resumen, las características de la tubería que se empleará en esta investigación se indican en la tabla 2-8:

Parámetro	Valor
Material (especificación)	API 5L
Grado del material	X65
Diámetro nominal	6 in
Espesor de pared	0.280 in (7,11 mm) (STD, SCH 40)
Diámetro exterior	6.625 in

Tabla 2-8. Características principales de la tubería a emplear.

## **2.2 Fase II: Selección de procesos de soldadura, realización de especificaciones de procedimientos, realización de las juntas soldadas con los niples de tubería, calificación de procedimientos y calificación de soldadores empleados para la realización de las juntas soldadas.**

En la fase II de este trabajo se realizarán las siguientes etapas: realización de especificación de procedimientos de soldadura (WPS), realización de las juntas soldadas, realización de la calificación de procedimientos de soldadura (PQR) y la calificación de soldadores (WPQ). Cada una de las etapas basadas en la sección IX del código ASME [49] que contiene los requerimientos para calificación de procesos de soldadura y de soldadores para tuberías bajo el código B31 de ASME, como lo es la sección B31.8 [34] que contiene los requerimientos para sistemas de tubería para transporte y distribución de gas.

En la tabla 2-9 se observa el flujo de trabajo para esta segunda fase.

FASE II					
Realización de especificaciones de procedimientos de soldadura (WPS):	Realización de las juntas soldadas.	Calificación de los procedimientos de soldadura (PQR):		Calificación de soldadores (WPQ):	
<b>SMAW</b>	<b>SMAW</b>	<b>SMAW</b>	Inspección visual	<b>SMAW</b>	Inspección visual
<b>GMAW + FCAW</b>	<b>GMAW + FCAW</b>	<b>GMAW + FCAW</b>	Pruebas de doblez de raíz	<b>GMAW + FCAW</b>	Pruebas de doblez de raíz
<b>GTAW + SMAW</b>	<b>GTAW + SMAW</b>	<b>GTAW + SMAW</b>	Pruebas de doblez de cara	<b>GTAW + SMAW</b>	Pruebas de doblez de cara
			Pruebas de tensión	<b>GTAW + SMAW</b>	Pruebas de tensión*

\* Pruebas de tensión no se requieren para un WPQ según tabla QW-452.1(a) de ASME Sección IX [49], para PQR son exigidas. En esta investigación se realizarán para los dos casos.

Tabla 2-9. Fase II del flujo de trabajo. Realización de los WPS, juntas soldadas, PQR y WPQ para cada proceso de soldadura empleado.

El flujo de trabajo para calificar y dar confiabilidad a una junta soldada que cumpla con los criterios de diseño, operación y vida útil, en cualquier proceso de construcción de oleoductos y gasoductos, se realiza en cuatro pasos iniciales:

- Realización del documento: especificación del procedimiento de soldadura (WPS, por sus siglas en inglés).
- Realización de las juntas soldadas, siguiendo los parámetros indicados en el procedimiento de soldadura.
- Realización de pruebas en las juntas soldadas, con su respectivo documento trazable: calificación del procedimiento de soldadura (PQR, por sus siglas en inglés)
- Realización de pruebas de soldadores, con su respectivo documento trazable: calificación de soldadores (WPQ, por sus siglas en inglés).

Estos pasos son de estricto cumplimiento en procesos de sistemas de gestión de calidad y obligatorios para cualquier proceso de soldadura que se implemente en la construcción de gasoductos bajo el código ASME B31.8 [34].

## 2.2.1 Especificaciones de procedimientos de soldadura (WPS)

### Procesos de soldadura a emplear:

Como se indicó en el capítulo Estado del Arte, de la amplia gama de procesos de soldadura por fusión indicados en el estándar AWS A3.0M [3], luego de filtrar los procesos por arco eléctrico y material de protección, sin adición de presión, se tienen los indicados en la tabla 2-10:

Tipo de protección (Shielding)	Proceso de soldadura	Designación
Gas	<i>gas tungsten arc welding</i>	GTAW
	<i>gas metal arc welding</i>	GMAW
	<i>plasma arc welding</i>	PAW
	<i>electrogas welding</i>	EGW
Fundente (Flux)	<i>shielded metal arc welding</i>	SMAW
	<i>submerged arc welding</i>	SAW
	<i>flux cored arc welding</i>	FCAW
	<i>electrogas welding</i>	EGW
Sin protección	<i>carbon arc welding *</i>	CAW
	<i>bare metal arc welding *</i>	BMAW

\* Proceso obsoleto según tabla A.5 de la AWS A3.0 [3].

Tabla 2-10. Procesos de soldadura por fusión con arco eléctrico y material de protección, sin adición de presión.

De los procesos referenciados en la tabla 2-10, los procesos GTAW, GMAW, SMAW y FCAW, son ampliamente utilizados en la construcción de gasoductos. Estos procesos serán empleados para el desarrollo de la presente investigación y se combinarán con el objetivo de buscar procesos mixtos de soldadura y evaluar el comportamiento mecánico y microestructural de las juntas soldadas.

Dentro del marco del código ASME B31.8 [34], en la sección 821.2 del código se acepta soldar tubería mediante cualquier proceso o combinación de procesos, siempre y cuando estos cumplan los requerimientos de calificación del procedimiento –PQR– indicados en el código. El código ASME, Sección IX [49], en el apartado QW-200.4, también acepta la combinación de procedimientos de soldadura. La combinación de procesos que se emplearán en esta investigación es:



- SMAW (soldadura por Arco Metálico Protegido).
- GTAW + SMAW (soldadura por arco de tungsteno con gas de protección + soldadura por arco metálico protegido).
- GMAW (MIG) + FCAW (soldadura por arco metálico con gas de protección - MIG + soldadura por arco con núcleo fundente).

### Especificación de procedimientos de soldadura - WPS:

El código ASME B31.8 [34] trata sobre los requerimientos de sistemas de tubería para transporte y distribución de gas y en la sección 823.2 indica los códigos aceptables para la calificación de procedimientos de soldadura y calificación de soldadores. Según la sección 823.2.1, los estándares o códigos aceptados para la calificación de procedimientos de soldadura son la sección IX de código ASME BPVC (*Boiler and Pressure Vessel Code*) [49] o el estándar API 1104 [55], teniendo en cuenta que son tuberías para implementar en nuevas facilidades de transporte de gas, fuera de servicio, y que trabajen a esfuerzos tipo Hopp (esfuerzos circunferenciales SH) del 20% o más de la resistencia a la fluencia mínima especificada del material. En este caso, el esfuerzo circunferencial es de 17746 Psi > al 20% del MSYS (65000 Psi).

Para tuberías en servicio, las calificaciones de procedimientos y de soldadores deben ser realizadas de acuerdo con el apéndice B de API 1104 [55]. En esta investigación, al considerarse soldaduras en facilidades nuevas y fuera de servicio, se implementará el código ASME Sección IX [49] para la calificación de procedimientos de soldadura y de soldadores.

La sección IX del código ASME [49] hace parte del Código para calderas y recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos de Estados Unidos. En este código, se encuentran las reglas para la calificación de procedimientos de soldadura y calificación de soldadores. Se encuentran también las variables esenciales y no esenciales para la realización de procedimientos de soldadura empleados en cada proceso.

Las secciones QW-101 y QW-200.1 del código indican los requerimientos generales para la realización de especificaciones de procedimientos de soldadura. La especificación del procedimiento de soldadura - WPS es un documento en el cual se indican las variables esenciales, no esenciales y suplementarias esenciales para cada proceso de soldadura. En el artículo IV del código ASME, sección IX [49], se describen cada una de las variables para procedimientos de soldadura.

El WPS es un documento guía para los soldadores, quienes deben cumplir con los parámetros indicados en el procedimiento para la realización de la junta soldada. Este procedimiento suministra el direccionamiento para realizar soldaduras de producción que cumplan con los requerimientos del código. Es también un documento de apoyo que soporta la calificación del procedimiento de soldadura - PQR.

Una variable esencial y una variable esencial suplementaria se consideran aquellas en las cuales si hay un cambio en el valor de la variable, este afectará las propiedades mecánicas de la soldadura y el WPS requerirá una recalificación por medio de un nuevo PQR. El cambio de una variable no esencial en el WPS no requiere recalificación.

Las tablas QW-252 a QW-267 del código ASME, sección IX [49], indican las variables esenciales, no esenciales y las variables suplementarias esenciales para cada proceso de soldadura por arco eléctrico. Las tablas también indican el tipo de cambio para cada variable, las cuales se deben tener en cuenta para la realización de los WPS de cada proceso mixto que se empleará en esta investigación.

Las tablas del código, donde se indican los tipos de variables para los procesos de soldadura que se implementarán, son tabla QW-253 para SMAW, tabla QW-256 para GTAW y tabla QW-255 para GMAW y FCAW.

Con la selección del tipo de variables para cada proceso de soldadura, según las tablas referenciadas anteriormente, se realizan las especificaciones de procedimientos de soldadura -WPS- para cada proceso.

En los WPS se presenta la designación de posición 5G, esta es la designación que realiza el código ASME, sección IX [49], para la posición del cupón de prueba, en tubería, para calificar la habilidad del soldador en las posiciones plana, vertical y sobre cabeza.

En la figura QW-469.2 de la sección QW-310.3 del código ASME Sección IX [49] se sugieren las dimensiones de bisel para juntas a tope como se indica en la figura 2-2. Este diseño de junta se empleará para el diseño de WPS, para calificación de los procedimientos y para calificación de soldadores.

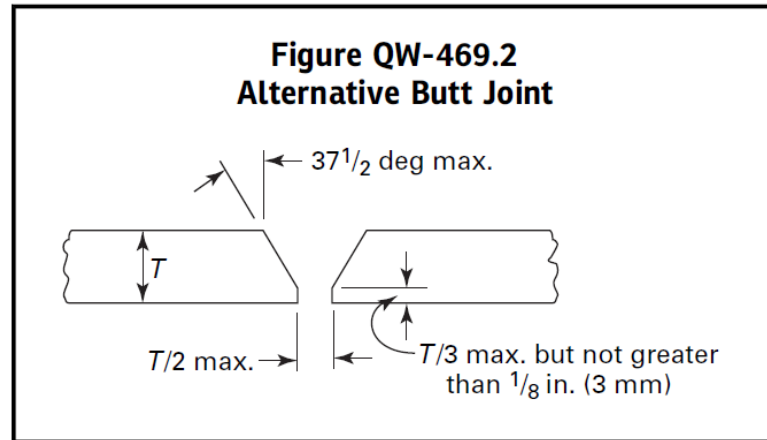


Figura 2-2. Dimensiones sugeridas de bisel para juntas a tope por ASME Sección IX [49].

Los WPS realizados en esta investigación, para cada proceso mixto, son:

- 1) WPS S\_01 para el proceso SMAW.
- 2) WPS GF\_01 para el proceso mixto GMAW (MIG)+ FCAW.
- 3) WPS TS\_01 para el proceso mixto GTAW + SMAW.

Se presenta a continuación cada WPS diligenciado en el formato QW-482 sugerido por ASME, sección IX [49]:

## 1) WPS S\_01 para el proceso SMAW

ASME BPVC.IX

**FORM QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS)**  
(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)

---

Organization Name UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA By CESAR TUNARROSA  
Welding Procedure Specification No. S\_01 Date 01-SEP-17 Supporting PQR No.(s) PQR S\_01  
Revision No. 00 Date 01-SEP-17

[E] Welding Process(es) SMAW [NE] Type(s) MANUAL  
(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Automatic)

---

**JOINTS (QW-402)**

[NE] Joint Design TOPE, BISEL EN V SIMPLE, VER ESQUEMA  
[NE] Root Spacing 1/16" - 1/8"  
[NE] Backing: Yes        No X  
Backing Material (Type) NA  
(Refer to both backing and retainers)

Metal  Nonfusing Metal  
 Nonmetallic  Other

Sketches, Production Drawings, Weld Symbols, or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the details of weld groove may be specified.

Sketches may be attached to illustrate joint design, weld layers, and bead sequence (e.g., for notch toughness procedures, for multiple process procedures, etc.)

Details

---

**\*BASE METALS (QW-403)**

[E] P-No. 1 [SE] Group No. 2 to [E] P-No. 1 [SE] Group No. 2  
OR  
Specification and type/grade or UNS Number API 5L X65 PSL 2  
to Specification and type/grade or UNS Number API 5L X65 PSL 2  
OR  
Chem. Analysis and Mech. Prop. ---  
to Chem. Analysis and Mech. Prop. ---

[E] Thickness Range:  
Base Metal: Groove 0.280 in [7,11 mm] Fillet NA  
[E] Maximum Pass Thickness  $\leq 1/2$  in. (13 mm) (Yes) X (No)         
Other DIAMETRO NOMINAL DE TUBERÍA 6" SCH 40 (STD) POR ASME B36.10

---

**\*FILLER METALS (QW-404)**

	1 - SMAW	2
Spec. No. (SFA)	5.5	
[NE] AWS No. (Class)	E8010-G	
[E] F-No.	3	
[E] A-No.	1	
[NE] Size of Filler Metals	1/8" , 5/32"	
Filler Metal Product Form	ELECTRODO REVESTIDO	
Supplemental Filler Metal	NA	
Weld Metal		
[E] Deposited Thickness:		
Groove	Max. 4 mm / pase	
Fillet	NA	
Electrode-Flux (Class)	NA	
Flux Type	NA	
Flux Trade Name	NA	
Consumable Insert	NA	
Other		

\*Each base metal-filler metal combination should be specified individually.

## ASME BPVC.IX

FORM QW-482 (Back)										
WPS No. <u>S_01</u> Rev. <u>00</u>										
<b>POSITIONS (QW-405)</b>				<b>[E] POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)</b>						
[NE] Position(s) of Groove <u>5G</u>				[SE] Temperature Range <u>NA</u>						
[NE] Welding Progression: <u>Up_X</u> Down <u>    </u>				[SE] Time Range <u>NA</u>						
Position(s) of Fillet <u>PLANA, VERTICAL, SOBRECABEZA</u>				Other <u>NA</u>						
Other <u>NA</u>										
<b>PREHEAT (QW-406)</b>				<b>GAS (QW-408)</b>						
[E] Preheat Temperature, Minimum <u>N.A</u>				Percent Composition						
[SE] Interpass Temperature, Maximum <u>LA DE SOLDADURA</u>				Gas(es) (Mixture) Flow Rate						
[NE] Preheat Maintenance <u>hasta completar la junta</u>				Shielding <u>NA</u> <u>NA</u> <u>NA</u>						
Other <u>NA</u>				Trailing <u>NA</u> <u>NA</u> <u>NA</u>						
(Continuous or special heating, where applicable, should be specified)				Backing <u>NA</u> <u>NA</u> <u>NA</u>						
				Other <u>NA</u> <u>NA</u> <u>NA</u>						
<b>ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)</b>										
Weld Pass(es)	[E] Process	Filler Metal		[NE] Current Type and Polarity	Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range)	Energy or Power (Range)	[NE] Volts (Range)	Travel Speed (Range) in/min	Other (e.g., Remarks, Comments, Hot Wire Addition, Technique, Process Torch Angle, etc.)
		Classification	[NE] Diameter							
1, 2, 3, 4	SMAW	E8010-G	1/8" 5/32"	DCEP	75-130 110-170	NA		20-30		
Amps and volts, or power or energy range, should be specified for each electrode size, position, and thickness, etc.										
Pulsing Current <u>NA</u> [SE] Heat Input (max.) <u>J/mm</u>										
Tungsten Electrode Size and Type <u>NA</u> (Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)										
Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) <u>NA</u> (Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)										
Other <u>NA</u>										
<b>TECHNIQUE (QW-410)</b>										
[NE] String or Weave Bead <u>AMBOS</u>										
Orifice, Nozzle, or Gas Cup Size <u>NA</u>										
[NE] Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc.) <u>CEPILLO GRATA DISCO ABRASIVO O DE ECORTE</u>										
[NE] Method of Back Gouging <u>CEPILLO GRATA DISCO ABRASIVO O DE ECORTE</u>										
Oscillation <u>NA</u>										
Contact Tube to Work Distance <u>NA</u>										
[NE] Multiple or Single Pass (Per Side) <u>MULTIPLES PASES</u>										
Multiple or Single Electrodes <u>ELECTRODO SIMPLE</u>										
Electrode Spacing <u>NA</u>										
[NE] Peening <u>NO PERMITIDO</u>										
Other <u>NA</u>										

2) WPS GF\_01 para el proceso mixto GMAW (MIG)+ FCAW

ASME BPVC.IX

**FORM QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS)**  
(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)

---

Organization Name UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA By CESAR TUNARROSA  
 Welding Procedure Specification No. GF\_01 Date 01-SEP-17 Supporting PQR No.(s) PQR GF\_01  
 Revision No. 00 Date 01-SEP-17

[E] Welding Process(es) GMAW + FCAW G [NE] Type(s) SEMIAUTOMATICO  
(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Automatic)

---

**JOINTS (QW-402)**  
 [NE] Joint Design TOPE, BISEL EN V SIMPLE, VER ESQUEMA  
 [NE] Root Spacing 1/16" - 1/8"  
 [NE] Backing: Yes        No X  
 Backing Material (Type) NA  
(Refer to both backing and retainers [NE])

Metal  Nonfusing Metal  
 Nonmetallic  Other

Sketches, Production Drawings, Weld Symbols, or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the details of weld groove may be specified.

Sketches may be attached to illustrate joint design, weld layers, and bead sequence (e.g., for notch toughness procedures, for multiple process procedures, etc.)]

Details

1:GMAW - 2 3 : FCAW-G

---

**\*BASE METALS (QW-403)**  
 [E] P-No. 1 [SE] Group No. 2 to [E] P-No. 1 [SE] Group No. 2  
 OR  
 Specification and type/grade or UNS Number API 5L X65 PSL 2  
 to Specification and type/grade or UNS Number API 5L X65 PSL 2  
 OR  
 Chem. Analysis and Mech. Prop. ---  
 to Chem. Analysis and Mech. Prop. ---

[E] Thickness Range:  
 Base Metal: Groove 0.280 in [7.11 mm] Fillet NA  
 [E] Maximum Pass Thickness ≤ 1/2 in. (13 mm) (Yes) X (No)         
 Other DIAMETRO NOMINAL DE TUBERÍA 6" SCH 40 (STD) POR ASME B36.10

---

**\*FILLER METALS (QW-404)**

	1 - GMAW	2 - FCAW G
[SE] Spec. No. (SFA)	5.18	5.29
[SE ó NE] AWS No. (Class)	ER70S-6	E81T1-Ni1M-JH4
[E] F-No.	6	6
[E] A-No.	*	**
[NE] Size of Filler Metals	1.2 mm	0.045" (1.1 mm)
[E] Filler Metal Product Form	ALAMBRE SOLIDO	ELECTRODO TUBULAR NUCLEO FUNDENTE
[E] Supplemental Filler Metal	NA	NA
Weld Metal		
[E] Deposited Thickness:		
Groove	Max. 4 mm / pase	Max. 4 - 5 mm / pase
Fillet	NA	NA
Electrode-Flux (Class)	NA	NA
Flux Type	NA	NA
Flux Trade Name	NA	NA
Consumable Insert	NA	NA
Other		

\* GMAW: MAX: %C 0.06 - 0.15 - %Mn 1.40 - 1.85 - %Si 0.50 - 1.15 - %P 0.025 - %S 0.035 - %Ni 0.15 - %Cr 0.15 - %Mo 0.15 - %V 0.03 - %Cu 0.50  
 \*\* FCAW G: MAX: %C 0.12 - %Mn 1.50 - %Si 0.5 - %P 0.03 - %S 0.03 - %Ni 0.8 - 1.10 - %Cr 0.15 - %Mo 0.35 - %V 0.05 - %Al 1.5

\*Each base metal-filler metal combination should be specified individually.

ASME BPVC.IX

FORM QW-482 (Back)

WPS No. GF\_01 Rev. 00

<b>POSITIONS (QW-405)</b> [SE ó NE] Position(s) of Groove <u>5G</u> [NE] Welding Progression: <u>Up_X_Down__</u> Position(s) of Fillet <u>PLANA, VERTICAL, SOBRECABEZA</u> Other <u>NA</u>				<b>[E] POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)</b> [SE] Temperature Range <u>NA</u> [SE] Time Range <u>NA</u> Other <u>NA</u>															
<b>PREHEAT (QW-406)</b> [E] Preheat Temperature, Minimum <u>NA</u> [SE] Interpass Temperature, Maximum <u>LA DE SOLDADURA</u> [NE] Preheat Maintenance <u>hasta completar la junta</u> Other <u>NA</u> <small>(Continuous or special heating, where applicable, should be specified)</small>				<b>GAS (QW-408)</b> Percent Composition <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>[E] Gas(es)</th> <th>[E] (Mixture)</th> <th>[NE] Flow Rate</th> </tr> <tr> <td>[E] Shielding <u>Ar + CO2</u></td> <td><u>75/25 %</u></td> <td><u>25-35 cfh</u></td> </tr> <tr> <td>[NE] Trailing <u>NA</u></td> <td><u>NA</u></td> <td><u>NA</u></td> </tr> <tr> <td>[NE] Backing <u>NA</u></td> <td><u>NA</u></td> <td><u>NA</u></td> </tr> </table> Other <u>GAS SHIELDING TO GMAW (MIG) AND FCAW</u>				[E] Gas(es)	[E] (Mixture)	[NE] Flow Rate	[E] Shielding <u>Ar + CO2</u>	<u>75/25 %</u>	<u>25-35 cfh</u>	[NE] Trailing <u>NA</u>	<u>NA</u>	<u>NA</u>	[NE] Backing <u>NA</u>	<u>NA</u>	<u>NA</u>
[E] Gas(es)	[E] (Mixture)	[NE] Flow Rate																	
[E] Shielding <u>Ar + CO2</u>	<u>75/25 %</u>	<u>25-35 cfh</u>																	
[NE] Trailing <u>NA</u>	<u>NA</u>	<u>NA</u>																	
[NE] Backing <u>NA</u>	<u>NA</u>	<u>NA</u>																	

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)**

Weld Pass(es)	[E] Process	Filler Metal		[SE ó NE] Current Type and Polarity	[NE] Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range) in/min	Energy or Power (Range)	[NE] Volts (Range)	Travel Speed (Range) in/min	Other (e.g., Remarks, Comments, Hot Wire Addition, Technique, Process Torch Angle, etc.)
		Classification	Diameter							
1	GMAW	ER70S-6	1,2mm	DCEP	100-150	100-200		10-20		
2 , 3	FCAW	E81T1-Ni1	1,1 mm	DCEP	150-200	250-350		20-30		

Amps and volts, or power or energy range, should be specified for each electrode size, position, and thickness, etc.

Pulsing Current SI [SE] Heat Input (max.) J/in

Tungsten Electrode Size and Type NA  
(Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)

[E] Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) S T T  
(Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)

Other NA

**TECHNIQUE (QW-410)**

[NE] String or Weave Bead AMBOS

[NE] Orifice, Nozzle, or Gas Cup Size 1/2"

[NE] Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc.) CEPILLO GRATA DISCO ABRASIVO

[NE] Method of Back Gouging CEPILLO GRATA DISCO ABRASIVO

[NE] Oscillation NA

[NE] Contact Tube to Work Distance GMAW: para ø1,2mm: 1/2" - 3/4" , FCAW-G: para ø0.045" (1.1 mm):1"

[SE ó NE] Multiple or Single Pass (Per Side) MULTIPLES PASES

[SE ó NE] Multiple or Single Electrodes ELECTRODO SIMPLE

[NE] Electrode Spacing NA

[NE] Peening NO PERMITIDO

Other NA

## 3) WPS TS\_01 para el proceso mixto GTAW + SMAW

ASME BPVC.IX

**FORM QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS)**  
(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)

---

Organization Name UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA By CESAR TUNARROSA  
Welding Procedure Specification No. TS\_01 Date 01-SEP-17 Supporting PQR No.(s) PQR TS\_01  
Revision No. 00 Date 01-SEP-17

[E] Welding Process(es) GTAW + SMAW [NE] Type(s) MANUAL  
(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Automatic)

---

**JOINTS (QW-402)**

[NE] Joint Design TOPE, BISEL EN V SIMPLE, VER ESQUEMA  
[NE] Root Spacing 1/16" - 1/8"  
[NE] Backing: Yes  No  X  
Backing Material (Type) NA  
(Refer to both backing and retainers [NE])

Metal  Nonfusing Metal  
 Nonmetallic  Other

Sketches, Production Drawings, Weld Symbols, or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the details of weld groove may be specified.

Sketches may be attached to illustrate joint design, weld layers, and bead sequence (e.g., for notch toughness procedures, for multiple process procedures, etc.)]

Details

1:GTAW - 2 3 4: SMAW

---

**\*BASE METALS (QW-403)**

[E] P-No. 1 [SE] Group No. 2 to [E] P-No. 1 [SE] Group No. 2  
OR  
Specification and type/grade or UNS Number API 5L X65 PSL 2  
to Specification and type/grade or UNS Number API 5L X65 PSL 2  
OR  
Chem. Analysis and Mech. Prop. ---  
to Chem. Analysis and Mech. Prop. ---

[E] Thickness Range:  
Base Metal: Groove 0.280 in [7.11 mm] Fillet NA  
[E] Maximum Pass Thickness  $\leq 1/2$  in. (13 mm) (Yes)  X (No)   
Other DIAMETRO NOMINAL DE TUBERÍA 6" SCH 40 (STD) POR ASME B36.10

---

**\*[E] FILLER METALS (QW-404)**

	1 - GTAW	2 - SMAW
[SE] Spec. No. (SFA)	5.28	5.5
[SE ó NE] AWS No. (Class)	ER80S-Ni1	E8010-G
[E] F-No.	6	3
[E] A-No.	10	1
[NE] Size of Filler Metals	3/32" (2.4 mm)	1/8" , 5/32"
[E] Filler Metal Product Form	VARILLA SOLIDA	ELECTRODO REVESTIDO
Supplemental Filler Metal	NA	NA
Weld Metal		
[E] Deposited Thickness:		
Groove	Max. 4mm / pase	Max. 4mm / pase
Fillet	NA	NA
[NE] Electrode-Flux (Class)	NA	NA
Flux Type	NA	NA
Flux Trade Name	NA	NA
[NE] Consumable Insert	NA	NA
Other		

\*Each base metal-filler metal combination should be specified individually.



ASME BPVC.IX

FORM QW-482 (Back)

WPS No. TS\_01 Rev. 00

<b>POSITIONS (QW-405)</b>	<b>[E] POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)</b>
[SE ó NE] Position(s) of Groove <u>5G</u>	[SE] Temperature Range <u>NA</u>
[NE] Welding Progression: <u>Up_X_Down</u>	[SE] Time Range <u>NA</u>
Position(s) of Fillet <u>PLANA, VERTICAL, SOBRECABEZA</u>	Other <u>NA</u>
Other <u>NA</u>	

<b>PREHEAT (QW-406)</b>	<b>[E] GAS (QW-408)</b>
[E] Preheat Temperature, Minimum <u>NA</u>	Percent Composition
[SE] Interpass Temperature, Maximum <u>LA DE SOLDADURA</u>	[E] Gas(es) [E] (Mixture) [NE] Flow Rate
[NE] Preheat Maintenance <u>hasta completar la junta</u>	[E] Shielding <u>Ar</u> <u>100%</u> <u>20-30 cfh</u>
Other <u>NA</u>	[NE] Trailing <u>NA</u> <u>NA</u> <u>NA</u>
	[NE] Backing <u>NA</u> <u>NA</u> <u>NA</u>
	Other <u>GAS SHIELDING SOLO PARA GTAW (GAS INERTE)</u>

(Continuous or special heating, where applicable, should be specified)

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)**

Weld Pass(es)	[E] Process	Filler Metal		[SE ó NE] Current Type and Polarity	[NE] Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range)	Energy or Power (Range)	[NE] Volts (Range)	Travel Speed (Range) in/min	Other (e.g., Remarks, Comments, Hot Wire Addition, Technique, Process Torch Angle, etc.)
		Classification	Diameter							
1	GTAW	ER80S-Ni	3/32"	DCEN	100-150			10-20		
2, 3, 4	SMAW	E8010-G	1/8" 5/32"	DCEP	75-130 110-170	NA		20 - 30		

Amps and volts, or power or energy range, should be specified for each electrode size, position, and thickness, etc.

[NE] Pulsing Current NA [SE] Heat Input (max.) J/mm

[NE] Tungsten Electrode Size and Type 1/16" EW-Th2  
(Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)

Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) NA  
(Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)

Other NA

**TECHNIQUE (QW-410)**

[NE] String or Weave Bead AMBOS

[NE] Orifice, Nozzle, or Gas Cup Size 3/8 in

[NE] Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc.) CEPILLO GRATA DISCO ABRASIVO O DE CORTE

[NE] Method of Back Gouging CEPILLO GRATA DISCO ABRASIVO O DE CORTE

[NE] Oscillation NA

Contact Tube to Work Distance NA

[SE ó NE] Multiple or Single Pass (Per Side) MULTIPLES PASES

[SE ó NE] Multiple or Single Electrodes SIMPLE

[NE] Electrode Spacing NA

[NE] Peening NO PERMITIDO

Other \_\_\_\_\_

## 2.2.2 Realización de las juntas soldadas

Una vez definidos los WPS para cada proceso mixto, se procede a la consecución de la tubería con la especificación dada en la tabla 2-8 indicada en la sección “Espesor de tubería” y que se muestra de nuevo a continuación:

Parámetro	Valor
Material (especificación)	API 5L
Grado del material	X65
Diámetro nominal	6 in
Espesor de pared	0,280 in (7,11 mm) (STD, SCH 40)
Diámetro exterior	6,625 in

Tabla 2-8 (repetida) . Características principales de la tubería a emplear.

La tubería con las especificaciones indicadas se emplea para proyectos especiales, generalmente en proyectos *oil & gas* por empresas petroleras, para constructoras y operadoras de oleoductos, gasoductos y estaciones de proceso, ya que es tubería importada y bajo pedido. En este caso, la tubería con especificación API5L X65 de 6” de diámetro, con espesor de pared de estándar de 7.11 mm, se logra conseguir por medio de ECOPEL, del proyecto Chichimene expansión 100K, en el municipio de Acacias-Meta.

La tubería fue alistada para cortar niples con dimensiones de por lo menos de un diámetro de longitud. Se alistan 12 niples cuya longitud es 1.5 veces su diámetro (9” de longitud). Adicionalmente, se cortan dos niples más como reserva.

En la Figura 2-3 se observan los niples de tubería cortados, con el alistamiento del perfil de la junta según el WPS. También se observa un recubrimiento plástico tricapa para protección externa contra la corrosión. Este recubrimiento se retira para soldar los niples.



Figura 2-3. Niples de tubería para soldar. API5L X65, 6" de diámetro, SCH 40.

En cada proceso de soldadura se realizan dos uniones o juntas soldadas, como muestreo para cada proceso: En SMAW, GMAW (MIG)+ FCAW y GTAW + SMAW se emplearon cuatro niples para realizar dos juntas. En total, se realizaron seis juntas soldadas, es decir, dos juntas por proceso. Los niples soldados se observan en la figura 2-4.



Figura 2-4. Niples soldados con dos juntas para cada proceso.

Los equipos empleados para realizar las juntas soldadas por proceso son:

**SMAW:** Soldador inversor de CD CC/CV multiproceso, modelo FLEXTEC 450, marca Lincoln Electric.

**GTAW + SMAW:** Soldador inversor de CD CC/CV multiproceso, modelo FLEXTEC 450, marca Lincoln Electric, con gas de protección argón 100% para GTAW.

**GMAW (MIG)+ FCAW:** para GMAW (MIG) se utilizó un equipo inversor, modelo *Power Wave S 350 STT*, código LSC-801-92-03, marca Lincoln Electric; pistola Magnum 200; boquilla Magnum KP22-30 de 12.7 mm; gas AGA Mix 25 a 350 Psi y *power feed* de 10M. Para FCAW se utilizó un soldador inversor FLEXTEC 450, marca Lincoln Electric y alimentador de alambre modelo LN-10 marca Lincoln Electric.

En la Figura 2-5 se observan los equipos de soldadura empleados en la escuela de soldadura Lincoln Electric, ubicada en el complejo industrial San Cayetano - Bogotá, donde se realizó la soldadura de las probetas.

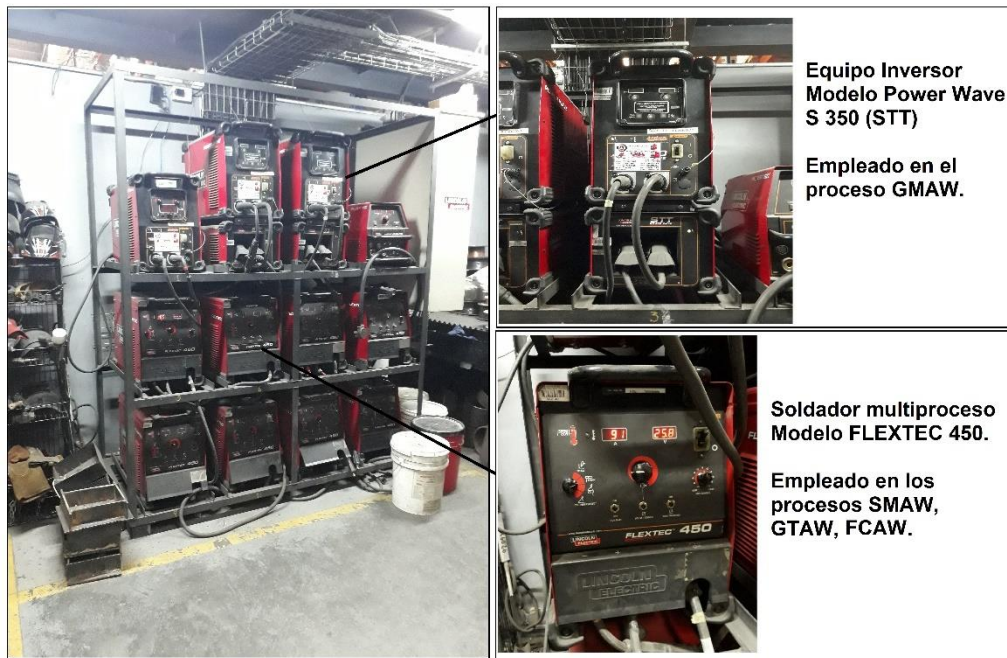


Figura 2-5. Equipos inversores para realización de soldaduras por procesos SMAW, GTAW, GMAW y FCAW.

El soldador Dani Cantor realizó las soldaduras objeto de esta investigación. Es un soldador calificado. Al soldador, se le realizarán las pruebas para calificación de soldador WPQ.

---

### 2.2.3 Calificación de los procedimientos de soldadura

El registro de calificación del procedimiento de soldadura (PQR) es un documento escrito donde se consignan, como mínimo, todas las variables esenciales y las variables esenciales suplementarias empleadas durante la soldadura de los cupones de prueba con sus respectivos valores. Se registran también los resultados de los ensayos de las probetas extraídas de los cupones de prueba. La calificación de procedimientos de soldadura está direccionada por el artículo II del código ASME Sección IX [49], donde se presentan los requerimientos para la calificación, el contenido del PQR y las pruebas requeridas.

La parte QW-202.2 del código indica que la calificación del WPS para soldaduras a tope debe realizarse empleando especímenes para ensayos de tensión y dobléz guiado. Las pruebas de tenacidad se realizarán solo si son requeridas por otras secciones del código [49].

La tabla QW-451.1 del código indica el tipo y la cantidad de pruebas requeridas para la calificación del procedimiento teniendo en cuenta el espesor del cupón (en este caso el espesor de la tubería). Para el espesor de tubería seleccionado de 7.11mm, la tabla indica dos ensayos de tensión, dos ensayos de dobléz guiado de cara y dos ensayos de dobléz guiado de raíz. Para esta investigación aplicada a gasoductos con el espesor de pared seleccionado, el código ASME B31.8 [34] no exige pruebas de tenacidad. Para mayor información, ver tabla 2-11 donde se presentan los requerimientos de ensayos para calificación del procedimiento de soldadura según código ASME sección IX [49].

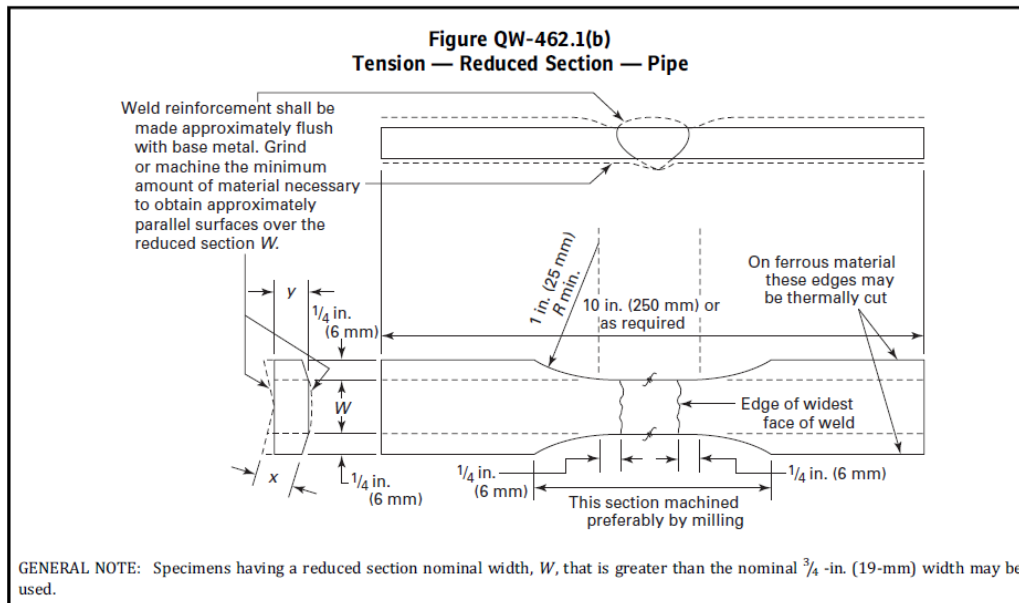
**QW-451 PROCEDURE QUALIFICATION THICKNESS LIMITS AND TEST SPECIMENS**

<b>Table QW-451.1 Groove-Weld Tension Tests and Transverse-Bend Tests</b>							
Thickness <i>T</i> of Test Coupon, Welded, in. (mm)	Range of Thickness <i>T</i> of Base Metal, Qualified, in. (mm) [Note (1)] and [Note (2)]		Maximum Thickness <i>t</i> of Deposited Weld Metal, Qualified, in. (mm) [Note (1)] and [Note (2)]	Type and Number of Tests Required (Tension and Guided-Bend Tests) [Note (2)]			
	Min.	Max.		Tension, QW-150	Side Bend, QW-160	Face Bend, QW-160	Root Bend, QW-160
Less than $\frac{1}{16}$ (1.5)	<i>T</i>	2 <i>T</i>	2 <i>t</i>	2	...	2	2
$\frac{1}{16}$ to $\frac{3}{8}$ (1.5 to 10), incl.	$\frac{1}{16}$ (1.5)	2 <i>T</i>	2 <i>t</i>	2	[Note (5)]	2	2
Over $\frac{3}{8}$ (10), but less than $\frac{3}{4}$ (19)	$\frac{3}{16}$ (5)	2 <i>T</i>	2 <i>t</i>	2	[Note (5)]	2	2
$\frac{3}{4}$ (19) to less than $1\frac{1}{2}$ (38)	$\frac{3}{16}$ (5)	2 <i>T</i>	2 <i>t</i> when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
$\frac{3}{4}$ (19) to less than $1\frac{1}{2}$ (38)	$\frac{3}{16}$ (5)	2 <i>T</i>	2 <i>T</i> when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
$1\frac{1}{2}$ (38) to 6 (150), incl.	$\frac{3}{16}$ (5)	8 (200) [Note (3)]	2 <i>t</i> when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
$1\frac{1}{2}$ (38) to 6 (150), incl.	$\frac{3}{16}$ (5)	8 (200) [Note (3)]	8 (200) [Note (3)] when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
Over 6 (150) [Note (6)]	$\frac{3}{16}$ (5)	1.33 <i>T</i>	2 <i>t</i> when $t < \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...
Over 6 (150) [Note (6)]	$\frac{3}{16}$ (5)	1.33 <i>T</i>	1.33 <i>T</i> when $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2 [Note (4)]	4	...	...

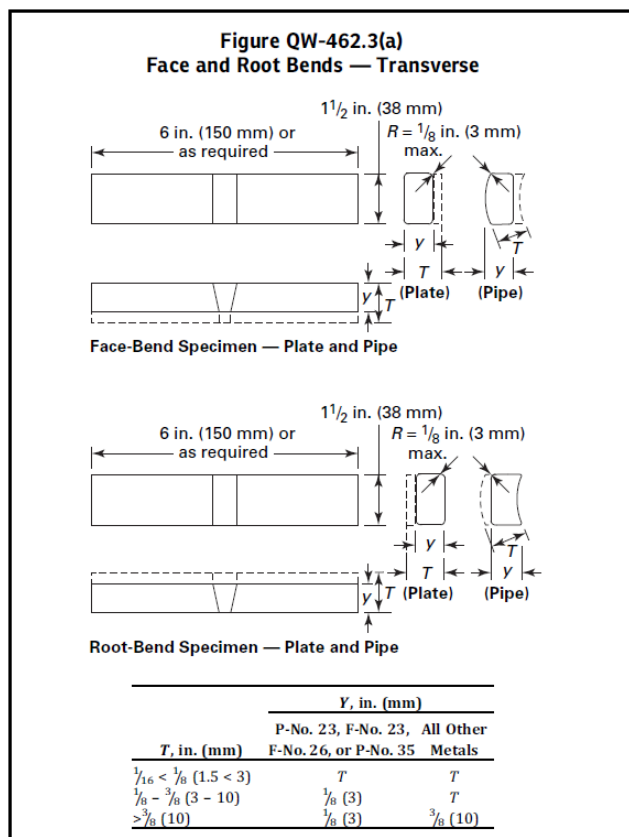
NOTES:  
 (1) The following variables further restrict the limits shown in this table when they are referenced in QW-250 for the process under consideration: QW-403.9, QW-403.10, and QW-404.32. Also, QW-202.2, QW-202.3, and QW-202.4 provide exemptions that supersede the limits of this table.  
 (2) For combination of welding procedures, see QW-200.4.  
 (3) For the SMAW, SAW, GMAW, PAW, LLBW, and GTAW welding processes only; otherwise per Note (1) or 2*T*, or 2*t*, whichever is applicable.  
 (4) see QW-151.1, QW-151.2, and QW-151.3 for details on multiple specimens when coupon thicknesses are over 1 in. (25 mm).  
 (5) Four side-bend tests may be substituted for the required face- and root-bend tests, when thickness *T* is  $\frac{3}{8}$  in. (10 mm) and over.  
 (6) For test coupons over 6 in. (150 mm) thick, the full thickness of the test coupon shall be welded.

Tabla 2-11. Requerimientos de ensayos para calificación de procedimientos de soldadura. Tomada del código ASME Sección IX [49].

La preparación de probetas para ensayos de tensión se realizó según la figura QW-462.1(b) y para los ensayos de doblez transversal de cara y de raíz según la figura QW-462.3(a) del código ASME, sección IX [49]. En la figura 2-6, se observan las dimensiones empleadas para la preparación de las probetas.



(a)



(b)

Figura 2-6. Dimensiones de probetas para ensayos de: (a) tensión de sección reducida y (b) para probetas de doblez transversal de cara y de raíz. Tomada del código ASME sección IX [49].

Los criterios de aceptación o rechazo para cada ensayo están formulados en el artículo I del código ASME, sección IX [49]. Los criterios para los ensayos de tensión se indican en QW-135.1, mientras que para los ensayos de doblez transversal de cara y de raíz se indican en QW-163 del código. Los criterios y los resultados de los ensayos para la calificación del procedimiento de soldadura (PQR) se presentan en el capítulo 3 “Análisis y resultados”.

El apéndice B no mandatorio del código sugiere el formato QW-483 para el registro de la calificación de procedimiento de soldadura (PQR), ver figura 2-7.



**FORM QW-483 SUGGESTED FORMAT FOR PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR)**  
 (See QW-200.2, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)  
**Record Actual Variables Used to Weld Test Coupon**

Organization Name \_\_\_\_\_  
 Procedure Qualification Record No. \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_  
 WPS No. \_\_\_\_\_  
 Welding Process(es) \_\_\_\_\_  
 Types (Manual, Automatic, Semi-Automatic) \_\_\_\_\_

JOINTS (QW-402)

Groove Design of Test Coupon  
 (For combination qualifications, the deposited weld metal thickness shall be recorded for each filler metal and process used.)

**BASE METALS (QW-403)**  
 Material Spec. \_\_\_\_\_  
 Type or Grade, or UNS Number \_\_\_\_\_  
 P-No. \_\_\_\_\_ Group No. \_\_\_\_\_ to P-No. \_\_\_\_\_ Group No. \_\_\_\_\_  
 Thickness of Test Coupon \_\_\_\_\_  
 Diameter of Test Coupon \_\_\_\_\_  
 Maximum Pass Thickness \_\_\_\_\_  
 Other \_\_\_\_\_

**POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)**  
 Temperature \_\_\_\_\_  
 Time \_\_\_\_\_  
 Other \_\_\_\_\_

FILLER METALS (QW-404)	1	2
SFA Specification _____		
AWS Classification _____		
Filler Metal F-No. _____		
Weld Metal Analysis A-No. _____		
Size of Filler Metal _____		
Filler Metal Product Form _____		
Supplemental Filler Metal _____		
Electrode Flux Classification _____		
Flux Type _____		
Flux Trade Name _____		
Weld Metal Thickness _____		
Other _____		

**GAS (QW-408)**

	Percent Composition		
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate
Shielding _____			
Trailing _____			
Backing _____			
Other _____			

**POSITION (QW-405)**  
 Position(s) \_\_\_\_\_  
 Weld Progression (Uphill, Downhill) \_\_\_\_\_  
 Other \_\_\_\_\_

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)**  
 Current \_\_\_\_\_  
 Polarity \_\_\_\_\_  
 Amps. \_\_\_\_\_ Volts \_\_\_\_\_  
 Waveform Control \_\_\_\_\_  
 Power or Energy \_\_\_\_\_  
 Arc Time \_\_\_\_\_  
 Weld Bead Length \_\_\_\_\_  
 Tungsten Electrode Size \_\_\_\_\_  
 Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) \_\_\_\_\_  
 Heat Input \_\_\_\_\_  
 Other \_\_\_\_\_

**PREHEAT (QW-406)**  
 Preheat Temperature \_\_\_\_\_  
 Interpass Temperature \_\_\_\_\_  
 Other \_\_\_\_\_

**TECHNIQUE (QW-410)**  
 Travel Speed \_\_\_\_\_  
 String or Weave Bead \_\_\_\_\_  
 Oscillation \_\_\_\_\_  
 Multipass or Single Pass (Per Side) \_\_\_\_\_  
 Single or Multiple Electrodes \_\_\_\_\_  
 Other \_\_\_\_\_

**FORM QW-483 (Back)**

**Tensile Test (QW-150)** PQR No. \_\_\_\_\_

Specimen No.	Width	Thickness	Area	Ultimate Total Load	Ultimate Unit Stress, (psi or MPa)	Type of Failure and Location

Alternative Tension Specimen Specification (QW-462) \_\_\_\_\_

**Guided-Bend Tests (QW-160)**

Type and Figure No.	Result

**Toughness Tests (QW-170)**

Specimen No.	Notch Location	Specimen Size	Test Temperature	Toughness Values			Drop Weight Break (Y/N)
				ft-lb or J	% Shear	Mils (in.) or mm	

Comments \_\_\_\_\_

**Fillet-Weld Test (QW-180)**

Result — Satisfactory: Yes \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ Penetration into Parent Metal: Yes \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

Macro — Results \_\_\_\_\_

**Other Tests**

Type of Test \_\_\_\_\_

Deposit Analysis \_\_\_\_\_

Other \_\_\_\_\_

.....

Welder's Name \_\_\_\_\_ Clock No. \_\_\_\_\_ Stamp No. \_\_\_\_\_

Tests Conducted by \_\_\_\_\_ Laboratory Test No. \_\_\_\_\_

We certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

Organization \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_ Certified by \_\_\_\_\_

(Detail of record of tests are illustrative only and may be modified to conform to the type and number of tests required by the Code.)

(07/19)

Figura 2-7. Formato QW-483 del código ASME sección IX [49] para PQR.

## 2.2.4 Calificación de habilidad del soldador

La calificación de habilidad del soldador (WPQ) es el proceso en el cual se genera un documento escrito donde se registran las variables esenciales del procedimiento de soldadura que el soldador empleó para realizar el cupón de prueba. También se registran los resultados de los ensayos requeridos para evaluar la junta soldada y los resultados de las pruebas de las probetas extraídas del cupón. Con el WPQ se busca establecer que el soldador tiene la habilidad para realizar soldaduras sanas, siempre en concordancia con el WPS calificado.

La calificación de habilidad de soldadores o de operarios de soldadura está regulada por el artículo III del código ASME, sección IX [49], donde se presentan los requerimientos para la calificación, el contenido del WPQ y las pruebas requeridas. La parte QW-302 del código indica el tipo de ensayos requeridos para soldaduras a tope.

La tabla QW-452.1(a) del código indica el tipo y la cantidad de pruebas requeridas para la calificación de la habilidad del soldador teniendo en cuenta el espesor del cupón de prueba, en este caso, el espesor de la tubería. Para el espesor de tubería seleccionado de 7.11 mm, la tabla indica los siguientes ensayos: inspección visual, un ensayo de doblez guiado de cara y un ensayo de doblez guiado de raíz. En la Nota (1), la tabla hace la aclaración que para pruebas de soldadura en posición 5G se requieren cuatro ensayos de doblez: dos de cara y dos de raíz. Para los WPQ, no se requieren pruebas de tenacidad para ningún espesor.

La parte QW-304.1 del código ASME, sección IX [49], indica que la habilidad del soldador puede ser calificada por medio de inspección visual y pruebas mecánicas o por medio de inspección volumétrica por ensayos no destructivos (NDE). En esta investigación, se calificará la habilidad del soldador por medio de inspección visual y pruebas mecánicas.

La tabla 2-12 presenta los requerimientos del código ASME, sección IX [49], con respecto a ensayos requeridos para calificación de la habilidad del soldador (WPQ).

**Table QW-452.1(a)  
Test Specimens**

Thickness of Weld Metal, in. (mm)	Type and Number of Examinations and Test Specimens Required			
	Visual Examination per QW-302.4	Side Bend QW-462.2 [Note (1)]	Face Bend QW-462.3(a) or QW-462.3(b) [Note (1)], [Note (2)]	Root Bend QW-462.3(a) or QW-462.3(b) [Note (1)], [Note (2)]
Less than $\frac{3}{8}$ (10)	X	...	1	1
$\frac{3}{8}$ (10) to less than $\frac{3}{4}$ (19)	X	2 [Note (3)]	...	...
$\frac{3}{4}$ (19) and over	X	2	...	...

GENERAL NOTE: The "Thickness of Weld Metal" is the total weld metal thickness deposited by all welders and all processes in the test coupon exclusive of the weld reinforcement.

NOTES:

- (1) To qualify using positions 5G or 6G, a total of four bend specimens are required. To qualify using a combination of 2G and 5G in a single test coupon, a total of six bend specimens are required. see QW-302.3. The type of bend test shall be based on weld metal thickness.
- (2) Coupons tested by face and root bends shall be limited to weld deposit made by one welder with one or two processes or two welders with one process each. Weld deposit by each welder and each process shall be present on the convex surface of the appropriate bent specimen.
- (3) One face and root bend may be substituted for the two side bends. For a test coupon welded in the 5G or 6G position, two face and two root bends may be substituted for the four side bends in accordance with Figure QW-463.2(d). For a test coupon welded using a combination of 2G and 5G positions, three face and three root bends may be substituted for the six side bends in accordance with Figure QW-463.2(f) or Figure QW-463.2(g).

Tabla 2-12. Tipo y número de ensayos requeridos para calificación de soldadores. Tomada del código ASME sección IX [49].

La ubicación en el cupón de soldadura para la extracción de las probetas de doblez se indica en la Figura QW-463.2(d) del código (figura 2-8). La preparación de probetas para ensayos de doblez transversal de cara y de raíz se realizó según la figura QW-462.3(a) del código ASME, sección IX [49], figura 2-6 (b) del apartado anterior.

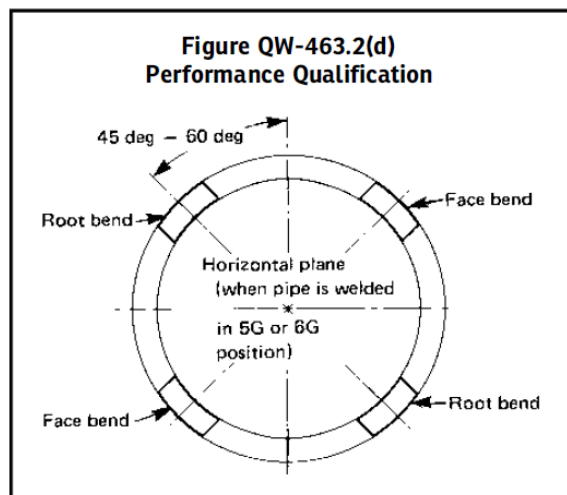


Figura 2-8. Ubicación de probetas para ensayos de doblez para WPQ. Tomada del código ASME sección IX [49].

Los criterios de aceptación o rechazo para cada ensayo se plantean en el artículo I del código ASME, sección IX [49]. Los criterios para inspección visual se indican en QW-194 y para los ensayos de doblez transversal de cara y de raíz se indican en QW-163. Los criterios y los resultados de los ensayos para la calificación de la habilidad del soldador (WPQ) se presentan en el capítulo 3 “Análisis y resultados”.

El apéndice B no mandatorio del código sugiere el formato QW-484A para el registro de la calificación de la habilidad del soldador (WPQ), ver figura 2-9.

**FORM QW-484A SUGGESTED FORMAT A FOR WELDER PERFORMANCE QUALIFICATIONS (WPO)**  
(See QW-301, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)

---

Welder's name \_\_\_\_\_ Identification no. \_\_\_\_\_

**Test Description**

Identification of WPS followed \_\_\_\_\_  Test coupon  Production weld Date welded \_\_\_\_\_

Specification and type/grade or UNS Number of base metal(s) \_\_\_\_\_ Thickness \_\_\_\_\_

**Testing Variables and Qualification Limits**

Welding Variables (QW-350)	Actual Values	Range Qualified
Welding process(es)	_____	_____
Type (i.e.; manual, semi-automatic) used	_____	_____
Backing (with/without)	_____	_____
<input type="checkbox"/> Plate <input type="checkbox"/> Pipe (enter diameter if pipe or tube)	_____	_____
Base metal P-Number to P-Number	_____	_____
Filler metal or electrode specification(s) (SFA) (info. only)	_____	_____
Filler metal or electrode classification(s) (info. only)	_____	_____
Filler metal F-Number(s)	_____	_____
Consumable insert (GTAW or PAW)	_____	_____
Filler Metal Product Form (QW-404.23) (GTAW or PAW)	_____	_____
Deposit thickness for each process	_____	_____
Process 1 _____ 3 layers minimum <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No	_____	_____
Process 2 _____ 3 layers minimum <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No	_____	_____
Position(s)	_____	_____
Vertical progression (uphill or downhill)	_____	_____
Type of fuel gas (OPW)	_____	_____
Use of backing gas (GTAW, PAW, GMAW)	_____	_____
Transfer mode (spray, globular, or pulse to short circuit-GMAW)	_____	_____
GTAW current type and polarity (AC, DCEP, DCEN)	_____	_____

---

**RESULTS**

Visual examination of completed weld (QW-302.4) \_\_\_\_\_

Transverse face and root bends [QW-462.3(a)]  Longitudinal bends [QW-462.3(b)]  Side bends (QW-462.2)

Pipe bend specimen, corrosion-resistant weld metal overlay [QW-462.5(c)]

Plate bend specimen, corrosion-resistant weld metal overlay [QW-462.5(d)]

Pipe specimen, macro test for fusion [QW-462.5(b)]  Plate specimen, macro test for fusion [QW-462.5(e)]

Type	Result	Type	Result	Type	Result

Alternative Volumetric Examination Results (QW-191): \_\_\_\_\_ RT  or UT  (check one)

Fillet weld — fracture test (QW-181.2) \_\_\_\_\_ Length and percent of defects \_\_\_\_\_

Fillet welds in plate [QW-462.4(b)]  Fillet welds in pipe [QW-462.4(c)]

Macro examination (QW-184) \_\_\_\_\_ Fillet size (in.) \_\_\_\_\_ × \_\_\_\_\_ Concavity or convexity (in.) \_\_\_\_\_

Other tests \_\_\_\_\_

Film or specimens evaluated by \_\_\_\_\_ Company \_\_\_\_\_

Mechanical tests conducted by \_\_\_\_\_ Laboratory test no. \_\_\_\_\_

Welding supervised by \_\_\_\_\_

We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE.

Organization \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_ Certified by \_\_\_\_\_

(07/17)

Figura 2-9. Formato QW-484A del código ASME sección IX [49] para WPQ.

## 2.3 Fase III: Caracterización mecánica y microestructural de las juntas soldadas.

En la fase III de este trabajo se realizarán las siguientes etapas: caracterización mecánica y caracterización microestructura por metalografía de las juntas soldadas. Se realizará el análisis en las zonas del metal base, de la zona afectada por el calor y en el metal de soldadura de cada junta soldada por medio de los procesos mixtos aplicados.

En la tabla 2-13 se observa el flujo de trabajo para esta tercera fase.

FASE III						
Caracterización mecánica			Caracterización metalográfica			
<b>SMAW</b>	Análisis de composición química del material base		<b>SMAW</b>	Análisis de fases por microscopía óptica	Metal de soldadura	
	Pruebas de tensión				ZAC de grano grueso	
	Pruebas de dobléz				ZAC de grano fino	
<b>GMAW + FCAW</b>	Pruebas de dureza por indentación	Metal de soldadura		<b>GMAW + FCAW</b>	Análisis de fases por microscopía electrónica de barrido	Metal base
		ZAC de grano grueso				Metal de soldadura
		ZAC de grano fino				ZAC
<b>GTAW + SMAW</b>	Pruebas de microdureza Vickers	Metal base	<b>GTAW + SMAW</b>		Espectro atómico por microscopía electrónica de barrido	Metal base
		Metal de soldadura				Metal de soldadura
		ZAC de grano grueso			ZAC	
		ZAC de grano fino		Metal base		
		Metal base				

Tabla 2-13. Fase III del flujo de trabajo. Caracterización mecánica y caracterización microestructural por metalográfica de las juntas soldadas.

Los resultados de las caracterizaciones se presentarán y analizarán en el capítulo 3 de esta investigación.





## 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se exponen y discuten los resultados de la calificación de procedimientos de soldadura (PQR) empleando los procesos SMAW, GTAW+SMAW, GMAW+FCAW, la calificación del desempeño del soldador (WPQ) y los resultados de los diferentes ensayos realizados según la metodología del capítulo 2. Se discuten los resultados obtenidos por cada ensayo ejecutado, observando el comportamiento mecánico y microestructural de las juntas soldadas por cada proceso de soldadura.

### 3.1 Análisis de composición química del material base

En la tabla 3-1 se presenta la comparación de la composición química del material base, acero API 5LX65, tomando en cuenta las siguientes caracterizaciones:

- La realizada en el laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional (probetas 3311 y 3312).
- El certificado de calidad del fabricante de la tubería: IPSCO TUBULARS INC No.264587-1.
- La composición química requerida por las tablas 4 y 5 de la especificación API 5L [35] para el grado X65.

Elemento	Composición química por Laboratorio UNAL % en peso		Composición química por certificado de calidad del fabricante % Peso		Especificación API 5L % máximo	
	Muestra (3 chispas), <b>Muestra 3311</b>	Muestra (3 chispas), <b>Muestra 3312</b>	<i>Product ID</i>		<i>Welded</i>	
			<b>YL-821C</b>	<b>YL-821C</b>	<b>PSL 1</b>	<b>PSL 2</b>
Fe	97,963	97,942	No indica	No indica	No indica	No indica
C	0,038	0,037	0,04	0,04	0,26	0,12
Mn	1,304	1,322	1,32	1,33	1,45	1,60
P	0,010	0,013	0,011	0,010	0,030	0,025
S	0,004	0,005	0,003	0,003	0,030	0,015
Si	0,236	0,239	0,22	0,22	No indica	0,45
Cu	0,125	0,129	0,11	0,11	0,50	0,50
Ni	0,043	0,044	0,04	0,04	0,50	0,50
Cr	0,064	0,063	0,06	0,06	0,50	0,50
V	0,043	0,043	0,041	0,041	F	G
Mo	0,029	0,026	0,014	0,014	0,15	0,50
W	0,003	0,001	No indica	No indica	No indica	No indica
Co	0,007	0,007	No indica	No indica	No indica	No indica
Ti	0,010	0,010	0,009	0,000	F	G
Sn	0,006	0,007	0,009	0,009	No indica	No indica
Al	0,031	0,028	0,017	0,018	No indica	No indica
Nb	0,070	0,072	No indica	No indica	F	G
B	0,0005	0,0006	0,0003	0,0100	0,001	0,001
Pb	0,011	0,012	No indica	No indica	No indica	No indica
Mg	0,000	0,000	No indica	No indica	No indica	No indica
Cb	No indica	No indica	0,052	0,052	No indica	No indica
PCM	No indica	No indica	0,13	0,18	No indica	No indica
otros	No indica	No indica	No indica	No indica	No indica	H, L

Tabla 3-1. Composición química del material base: Tubo API 5L X65

Para las notas F y G de la tabla 3-1 la especificación API 5L[35] indica: “Nb + V + Ti ≤ 0.15%”. La suma de estos elementos da 0.123% y 0.125% para las probetas analizadas 3311 y 3312 respectivamente. Las notas H y L en la especificación indican el contenido máximo aceptado para los elementos Cu, Ni, Cr, Mo y B indicados en la tabla. El acero empleado cumple con los límites dados en las notas F,G,H y L.

Observando los porcentajes máximos exigidos para cada elemento según la especificación API5L [35], la tubería con costura empleada en esta investigación cumple los requisitos de composición química exigidos para el grado X65. Por lo tanto, se confirma que la tubería empleada es acero al carbono API 5L X65.

Para tuberías PSL 2, el porcentaje máximo de carbono equivalente ( $CE_{Pcm}$ ) según la tabla 5 de la especificación API 5L[35] debe ser 0,25%. La ecuación 3.1, desarrollada por Ito-Bessyo, es empleada por la especificación para calcular el  $CE_{Pcm}$  de aceros con contenidos de carbono  $\leq 0,12\%$  como lo es la tubería empleada en esta investigación. Para aceros con contenidos de carbono mayores al 0.12% se aplica el cálculo del carbono equivalente  $CE_{IIW}$  dado por el *Instituto Internacional de Soldadura -IIW-*.

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (Ec 3.1)$$

CE: Carbono equivalente, Pcm: *Critical metal parameter*.

Reemplazando en la ecuación 3.1 los porcentajes dados en la Tabla 3-1 para cada elemento, obtenidos en el ensayo por laboratorio, el  $CE_{Pcm}$  de las probetas 3311 y 3312 es:

Muestra 3311:

$$\begin{aligned} CE_{Pcm} &= 0.038 + \frac{0.236}{30} + \frac{1.304}{20} + \frac{0.125}{20} + \frac{0.043}{60} + \frac{0.064}{20} + \frac{0.029}{15} + \frac{0.043}{10} + 5 * 0.0005 \\ &= 0.12997 \quad (Ec 3.2) \end{aligned}$$

Muestra 3312:

$$\begin{aligned} CE_{Pcm} &= 0.037 + \frac{0.239}{30} + \frac{1.322}{20} + \frac{0.129}{20} + \frac{0.044}{60} + \frac{0.063}{20} + \frac{0.026}{15} + \frac{0.043}{10} + 5 * 0.0006 \\ &= 0.13043 \quad (Ec 3.3) \end{aligned}$$

Para cada muestra analizada del metal base API 5LX65 el CE es 0,13% (aproximando a dos decimales), cumpliendo con el requerimiento de la especificación API 5L [35].

El CE también da una indicación de la soldabilidad de un material. Al tener un porcentaje de CE de 0,13% (acero de bajo carbono) indica que el acero API 5LX65 es un material con

buena soldabilidad. En general, un bajo valor de CE es preferible porque indica buena soldabilidad [5], a mayor contenido de carbono aumenta la dificultad de soldar, inclusive con técnicas complementarias que acompañen el proceso de soldadura (precalentamientos, control de enfriamiento, mantas térmicas, entre otras).

## 3.2 Calificación de procedimientos de soldadura (PQR)

Un procedimiento de soldadura WPS, debe ser diseñado y calificado para ser aplicado en soldaduras de producción. Esto se realiza por medio de la calificación del procedimiento de soldadura PQR, por sus siglas en inglés. Los ensayos requeridos por el código ASME, Sección IX [49], para calificación del procedimiento son: inspección visual, tensión, doblado guiado de cara y de raíz. Los resultados deben ser registrados en el formato PQR.

Los resultados y criterios de aceptación para cada ensayo realizado se indican en la sección 3.5 de este capítulo.

Los PQR realizados en esta investigación, para cada WPS, son:

- 1) PQR para el WPS S\_01, proceso SMAW.
- 2) PQR para el WPS TS\_01, proceso mixto GTAW + SMAW
- 3) PQR para el WPS GF\_01, proceso mixto GMAW (MIG)+ FCAW.

A continuación, se presenta cada PQR diligenciado en el formato QW-483 sugerido por el código ASME, Sección IX [49]:

### 3.2.1 PQR para el WPS S\_01, proceso SMAW

FORM QW-483 SUGGESTED FORMAT FOR PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR) (See QW-200.2, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code) Record Actual Variables Used to Weld Test Coupon				
Organization Name		UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - TESIS DE MAESTRÍA		
Procedure Qualification Record No.		PQR S_01	Date	
WPS No.		S_01	1-dic-21	
Welding Process(es)		SMAW		
Types (Manual, Automatic, Semi-Automatic)		Manual		
<b>JOINTS (QW-402)</b>				
Groove Design of Test Coupon (For combination qualifications, the deposited weld metal thickness shall be recorded for each filler metal and process used.)				
<b>BASE METALS (QW-403)</b>		<b>POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)</b>		
Material Spec.		Temperature		
API 5L		N/A		
Type or Grade, or UNS Number		Time		
X65 PSL 2		N/A		
P-No. <u>1</u> Group No. <u>2</u> to P-No. <u>1</u> Group No. <u>2</u>		Other		
Thickness of Test Coupon		-		
0,280 in [7,11 mm]		<b>GAS (QW-408)</b>		
Diameter of Test Coupon		Percent Composition		
6"		Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate
Maximum Pass Thickness		Shielding	N/A	N/A
4 mm		Trailing	N/A	N/A
Other		Backing	N/A	N/A
		Other		
<b>FILLER METALS (QW-404)</b>		<b>ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)</b>		
	1	2	Current	
SFA Specification	5.5		DC	
AWS Classification	E8010-G		Polarity	
Filler Metal F-No.	3		EP	
Weld Metal Analysis A-No.	1		Amps.	
Size of Filler Metal	1/8"		85-110	
Filler Metal Product Form	ELECTRODO REVESTIDO		Volts	
Supplemental Filler Metal	N/A		24-28	
Electrode Flux Classification	N/A		Waveform Control	
Flux Type	N/A		N/A	
Flux Trade Name	N/A		Power or Energy	
Weld Metal Thickness	12,5 mm		-	
Other			Arc Time	
			-	
			Weld Bead Length	
			-	
			Tungsten Electrode Size	
			N/A	
			Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW)	
			N/A	
			Heat Input	
			1500 J/mm MAX	
			Other	
<b>POSITION (QW-405)</b>		<b>TECHNIQUE (QW-410)</b>		
Position(s)		Travel Speed		
5G		100 -300 mm/min		
Weld Progression (Uphill, Downhill)		String or Weave Bead		
ascendente		AMBOS		
Other		Oscillation		
		N/A		
		Multipass or Single Pass (Per Side)		
		MULTIPASE		
<b>PREHEAT (QW-406)</b>		Single or Multiple Electrodes		
Preheat Temperature		SIMPLE		
N/A		Other		
Interpass Temperature				
LA DE LA SOLDADURA				
Other				

FORM QW-483 (Back)				PQR No. <u>PQR S_01</u>		
Tensile Test (QW-150)						
Specimen No.	Width (mm)	Thickness (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Ultimate Total Load (N)	Ultimate Unit Stress, Mpa (PSI)	Type of Failure and Location
S1-T1	19,0	6,5	123,5	71343,8	577,7 (83786)	METAL DE SOLDADURA / DUCTIL
S1-T2	19,1	6,4	122,2	69531,3	568,8 (82499)	METAL DE SOLDADURA / DUCTIL
Alternative Tension Specimen Specification (QW-462)						
Guided-Bend Tests (QW-160)						
Type and Figure No.				Result		
RAIZ, PROBETA S1_DR1				SIN DEFECTOS - ACCEPTABLE		
RAIZ, PROBETA S1_DR2				SIN DEFECTOS - ACCEPTABLE		
CARA, PROBETA S1_DC1				SIN DEFECTOS - ACCEPTABLE		
CARA, PROBETA S1_DC2				SIN DEFECTOS - ACCEPTABLE		
Toughness Tests (QW-170)						
Specimen No.	Notch Location	Specimen Size	Test Temperature	ft-lb or J	Toughness Values % Shear	Drop Weight Break (Y/N)
-						
-						
-						
-						
Comments						
Fillet-Weld Test (QW-180)						
Result — Satisfactory: Yes ___ No ___			Penetration into Parent Metal: Yes ___ No ___			
Macro — Results						
Other Tests						
Type of Test <u>INSPECCION VISUAL (S1_R) - ACEPTADO</u>						
Deposit Analysis						
Other						
-----						
Welder's Name <u>DANI CANTOR</u>		Clock No. <u>10:40</u>		Stamp No. <u>DC</u>		
Tests Conducted by <u>CESAR TUNARROSA</u>		Laboratory Test No. <u>email - UNAL</u>				
We certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code.						
Organization <u>PARTICULAR - TESIS DE MAESTRÍA</u>						
Date <u>1/12/2021</u>		Certified by <u>Jhon Rozo - Inspector</u>				
(Detail of record of tests are illustrative only and may be modified to conform to the type and number of tests required by the Code.)						

Los ensayos de tensión realizados en las probetas del cupón soldado superan la resistencia a la tensión mínima especificada del material base API 5LX65 (78000 Psi) y del material de aporte (80000 Psi). Los ensayos de doblez de cara y de raíz, así como la inspección visual realizada, no presentan defectos.

Como no hay rechazo de las probetas empleadas, este PQR califica el WPS S\_01 con las variables empleadas y es aceptado para ser implementado en soldaduras de producción.

### 3.2.2 PQR para el WPS TS\_01, proceso mixto GTAW + SMAW

FORM QW-483 SUGGESTED FORMAT FOR PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR) (See QW-200.2, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code) Record Actual Variables Used to Weld Test Coupon		
Organization Name <u>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - TESIS DE MAESTRÍA</u>		
Procedure Qualification Record No. <u>PQR TS_01</u>		Date <u>1-dic-21</u>
WPS No. <u>TS_01</u>		
Welding Process(es) <u>GTAW + SMAW</u>		
Types (Manual, Automatic, Semi-Automatic) <u>Manual</u>		
<b>JOINTS (QW-402)</b>		
<p style="text-align: right;">1:GTAW - 2 3 4: SMAW</p>		
Groove Design of Test Coupon (For combination qualifications, the deposited weld metal thickness shall be recorded for each filler metal and process used.)		
<b>BASE METALS (QW-403)</b>		<b>POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)</b>
Material Spec. <u>API 5L</u>		Temperature <u>N/A</u>
Type or Grade, or UNS Number <u>X65 PSL 2</u>		Time <u>N/A</u>
P-No. <u>1</u> Group No. <u>2</u> to P-No. <u>1</u> Group No. <u>2</u>		Other <u>-</u>
Thickness of Test Coupon <u>0,280 in [7,11 mm]</u>		<b>GAS (QW-408)</b>
Diameter of Test Coupon <u>6"</u>		Percent Composition
Maximum Pass Thickness <u>4 mm</u>		Gas(es) Ar (Mixture) Flow Rate
Other		Shielding <u>Ar 100% 20-30 cfh</u>
		Trailing <u>N/A N/A N/A</u>
		Backing <u>N/A N/A N/A</u>
		Other <u>GAS SHIELDING SOLO PARA GTAW</u>
<b>FILLER METALS (QW-404)</b>		<b>ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)</b>
	1	2
SFA Specification	<u>5.28</u>	<u>5.5</u>
AWS Classification	<u>ER80S-Ni1</u>	<u>E8010-G</u>
Filler Metal F-No.	<u>6</u>	<u>3</u>
Weld Metal Analysis A-No.	<u>10</u>	<u>1</u>
Size of Filler Metal	<u>3/32" (2.4 mm)</u>	<u>1/8" , 5/32"</u>
Filler Metal Product Form	<u>VARILLA SOLIDA</u>	<u>ELECTRODO REVESTIDO</u>
Supplemental Filler Metal	<u>N/A</u>	
Electrode Flux Classification	<u>N/A</u>	
Flux Type	<u>N/A</u>	
Flux Trade Name	<u>N/A</u>	
Weld Metal Thickness	<u>Max. 4mm pase1</u>	<u>Max. 4mm /pase</u>
<small>GTAW: ER80S-Ni1 MARCA LINCOLN ELECTRIC REFERENCIA LINT N1 SMAW:ELECTRODO REVESTIDO MARCA LINCOLN ELECTRIC REFERENCIA SHIELD ARC 70+</small>		
Other		<b>Current</b> <u>DC</u>
		<b>Polarity</b> <u>1)EN 2,3,4)EP</u>
		<b>Amps.</b> <u>130-135 / 85-110</u> Volts <u>11-13 / 24-28</u>
		<b>Waveform Control</b> <u>-</u>
		<b>Power or Energy</b> <u>-</u>
		<b>Arc Time</b> <u>-</u>
		<b>Weld Bead Length</b> <u>-</u>
		<b>Tungsten Electrode Size</b> <u>1/16" , EW-Th2</u>
		<b>Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW)</b> <u>N/A</u>
		<b>Heat Input</b> <u>2500 J/mm MAX</u>
		Other
<b>POSITION (QW-405)</b>		<b>TECHNIQUE (QW-410)</b>
Position(s) <u>5G</u>		Travel Speed <u>50-100 mm/min GTAW , 100-300 mm/min SMAW</u>
Weld Progression (Uphill, Downhill) <u>ASCENDENTE</u>		String or Weave Bead <u>AMBOS</u>
Other		Oscillation <u>N/A</u>
		Multipass or Single Pass (Per Side) <u>MULTIPASE</u>
		Single or Multiple Electrodes <u>SIMPLE</u>
		Other
<b>PREHEAT (QW-406)</b>		
Preheat Temperature <u>N/A</u>		
Interpass Temperature <u>LA DE LA SOLDADURA</u>		
Other		

FORM QW-483 (Back)				PQR No. <u>PQR TS_01</u>		
Tensile Test (QW-150)						
Specimen No.	Width (mm)	Thickness (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Ultimate Total Load (N)	Ultimate Unit Stress, Mpa (PSI)	Type of Failure and Location
TS1-T1	19,1	6,5	124,2	74968,8	603,9 (87582)	METAL DE SOLDADURA / DUCTIL
TS1-T2	19,1	6,8	129,9	75093,8	578,2 (83858)	METAL DE SOLDADURA / DUCTIL
Alternative Tension Specimen Specification (QW-462)						
Guided-Bend Tests (QW-160)						
Type and Figure No.	Result					
RAIZ, PROBETA TS1 DR1	DISCONTINUIDADES DE 1,8-1,8-1,6mm ACEPTABLES SEGÚN QW-163 - ACEPTABLE					
RAIZ, PROBETA TS1 DR2	SIN DEFECTOS - ACEPTABLE					
CARA, PROBETA TS1 DC1	DISCONTINUIDADES DE 2,3-2,4-2,8mm ACEPTABLES SEGÚN QW-163 - ACEPTABLE					
CARA, PROBETA TS1 DC2	SIN DEFECTOS - ACEPTABLE					
Toughness Tests (QW-170)						
Specimen No.	Notch Location	Specimen Size	Test Temperature	ft-lb or J	Toughness Values	Drop Weight Break (Y/N)
-					% Shear	mm
-						
-						
-						
Comments						
Fillet-Weld Test (QW-180)						
Result — Satisfactory: Yes ___ No ___			Penetration into Parent Metal: Yes ___ No ___			
Macro — Results						
Other Tests						
Type of Test	<u>INSPECCION VISUAL (TS2_R) - ACEPTADO</u>					
Deposit Analysis						
Other						
Welder's Name	<u>DANI CANTOR</u>	Clock No.	<u>16:00</u>	Stamp No.	<u>DC</u>	
Tests Conducted by	<u>CESAR TUNARROSA</u>	Laboratory Test No.	email - UNAL			
We certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code.						
Organization <u>PARTICULAR - TESIS DE MAESTRÍA</u>						
Date	<u>1/12/2021</u>	Certified by	<u>Jhon Rozo - inspector</u>			
(Detail of record of tests are illustrative only and may be modified to conform to the type and number of tests required by the Code.)						

Los ensayos de tensión realizados en las probetas del cupón soldado superan la resistencia a la tensión mínima especificada del material base API 5LX65 (78000 Psi) y del material de aporte (80000 Psi). Los ensayos de doblez de cara y de raíz presentan indicaciones en dos probetas; TS1\_DR1 y TS1\_DC1, al ser menores a la dimensión máxima de 3 mm según el código ASME, sección IX [49], son aceptables. La inspección visual realizada en la junta soldada TS2\_R no presentan defectos.



Por lo anterior este PQR califica el WPS TS\_01 con las variables empleadas y es aceptado para ser implementado en soldaduras de producción.

### 3.2.3 PQR para el WPS GF\_01, proceso mixto GMAW + FCAW

FORM QW-483 SUGGESTED FORMAT FOR PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR) (See QW-200.2, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code) Record Actual Variables Used to Weld Test Coupon			
Organization Name		UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - TESIS DE MAESTRÍA	
Procedure Qualification Record No.		PQR GF_01	Date 1-dic-21
WPS No.		GF_01	
Welding Process(es)		GMAW + FCAW	
Types (Manual, Automatic, Semi-Automatic)		SEMI AUTOMÁTICO	
<b>JOINTS (QW-402)</b>			
<p style="text-align: center;">1:GMAW - 2 3 : FCAW</p> <p style="text-align: center;"><b>Groove Design of Test Coupon</b> (For combination qualifications, the deposited weld metal thickness shall be recorded for each filler metal and process used.)</p>			
<b>BASE METALS (QW-403)</b>		<b>POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)</b>	
Material Spec.		API 5L	
Type or Grade, or UNS Number		X65 PSL 2	
P-No. <u>1</u> Group No. <u>2</u> to P-No. <u>1</u> Group No. <u>2</u>		Temperature	
Thickness of Test Coupon		0,280 in [7,11 mm]	
Diameter of Test Coupon		6"	
Maximum Pass Thickness		4 mm	
Other		Time	
		N/A	
		Other	
		-	
		<b>GAS (QW-408)</b>	
		Percent Composition	
		Gas(es) (Mixture) Flow Rate	
		Ar + CO2 75/25 % 25-35 cfh	
		Shielding	
		Trailing	
		Backing	
		N/A N/A N/A	
		Other	
		<b>ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)</b>	
		Current	
		DC	
		Polarity	
		EP	
		Amps.	
		100-200 Volts	
		10-20 / 20-30	
		Waveform Control	
		N/A	
		Power or Energy	
		N/A	
		Arc Time	
		N/A	
		Weld Bead Length	
		N/A	
		Tungsten Electrode Size	
		N/A	
		Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW)	
		S T T	
		Heat Input	
		2100 J/mm MAX	
		Other	
		<b>TECHNIQUE (QW-410)</b>	
		Travel Speed	
		100-150 mm/min	
		String or Weave Bead	
		AMBOS	
		Oscillation	
		N/A	
		Multipass or Single Pass (Per Side)	
		MULTIPASE	
		Single or Multiple Electrodes	
		SIMPLE	
		Other	
<b>POSITION (QW-405)</b>			
Position(s)			
5G			
Weld Progression (Uphill, Downhill)			
ASCENDENTE			
Other			
<b>PREHEAT (QW-406)</b>			
Preheat Temperature			
N/A			
Interpass Temperature			
LA DE LA SOLDADURA			
Other			

FORM QW-483 (Back)				PQR No. <u>PQR GF_01</u>		
Tensile Test (QW-150)						
Specimen No.	Width (mm)	Thickness (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Ultimate Total Load (N)	Ultimate Unit Stress, Mpa (PSI)	Type of Failure and Location
GF1-T1	19,0	6,5	123,5	76203,1	617,0 (89493)	METAL DE SOLDADURA / DUCTIL
GF1-T2	19,0	6,5	123,5	75406,3	610,6 (88557)	METAL DE SOLDADURA / DUCTIL
Alternative Tension Specimen Specification (QW-462)						
Guided-Bend Tests (QW-160)						
Type and Figure No.	Result					
RAIZ, PROBETA GF1 DR1	DISCONTINUIDADES de 1,4-2,0-1,7mm ACEPTABLES SEGÚN QW-163 - ACEPTABLE					
RAIZ, PROBETA GF1 DR2	SIN DEFECTOS - ACEPTABLE					
CARA, PROBETA GF1 DC1	DISCONTINUIDADES de 16 mm NO ACEPTABLES SEGÚN QW-163 - NO ACEPTABLE					
CARA, PROBETA GF1 DC2	SIN DEFECTOS - ACEPTABLE					
Toughness Tests (QW-170)						
Specimen No.	Notch Location	Specimen Size	Test Temperature		Toughness Values	Drop Weight Break (Y/N)
-				ft-lb or J	% Shear	mm
-						
-						
-						
Comments						
Fillet-Weld Test (QW-180)						
Result — Satisfactory: Yes ___ No ___			Penetration into Parent Metal: Yes ___ No ___			
Macro — Results						
Other Tests						
Type of Test <u>INSPECCION VISUAL (GF1_R) - ACEPTADO</u>						
Deposit Analysis						
Other						
Welder's Name <u>DANI CANTOR</u>		Clock No. <u>13:05</u>		Stamp No. <u>DC</u>		
Tests Conducted by <u>CESAR TUNARROSA</u>		Laboratory Test No. <u>email - UNAL</u>				
We certify that the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code.						
				Organization <u>PARTICULAR - TESIS DE MAESTRÍA</u>		
Date <u>1/12/2021</u>		Certified by <u>Jhon Rozo - Inspector</u>				
(Detail of record of tests are illustrative only and may be modified to conform to the type and number of tests required by the Code.)						

Los ensayos de tensión realizados en las probetas del cupón soldado superan la resistencia a la tensión mínima especificada del material base API 5LX65 (78000 Psi) y del material de aporte (80000 Psi). Los ensayos de dobléz de cara y de raíz presentan indicaciones en dos probetas:

- GF1\_DR1, al ser menores a la dimensión máxima de 3 mm según el código ASME, sección IX [49], es aceptada.

-GF1\_DC1, al ser mayor a la dimensión máxima de 3 mm según el código y es rechazada. Al analizar la indicación se observa que es generada por una falta de fusión en una

esquina, debida a la aplicación incorrecta del cordón de presentación, ver sección 3.5.2 de este capítulo.

La inspección visual realizada en la junta soldada GF1\_R no presentan defectos y es aceptada.

Este PQR califica el WPS GF\_01 con las variables empleadas. Al presentarse la indicación en la probeta GF1\_DC1 debe realizarse de nuevo. La junta soldada GF\_01 (cupón 2) no presenta discontinuidades en las pruebas de doblez de cara. Por lo anterior, son conforme al código y este PQR valida el WPS GF\_01, siendo aceptado para ser implementado en soldaduras de producción.

### **3.3 Calificación de habilidad del soldador (WPQ)**

Cada soldador que realice soldaduras de producción debe ser calificado con el fin de demostrar la habilidad para aplicar el proceso requerido según el WPS. Esto se realiza por medio de la calificación de la habilidad del soldador WPQ, por sus siglas en ingles.

Los ensayos requeridos por el código ASME, Sección IX [49], para calificación del soldador son: inspección visual, doblez guiado de cara y de raíz. Los resultados deben ser registrados en el formato WPQ.

Los resultados y criterios de aceptación para cada ensayo realizado se indican en la sección 3.5 de este capítulo.

Los WPQ realizados en esta investigación, para cada WPS, son:

- 1) WPQ para el WPS S\_01, proceso SMAW.
- 2) WPQ para el WPS TS\_01, proceso mixto GTAW + SMAW
- 3) WPQ para el WPS GF\_01, proceso mixto GMAW (MIG)+ FCAW.

A continuación, se presenta cada WPQ diligenciado en el formato QW-484A sugerido por el código ASME, Sección IX [49]:

### 3.3.1 WPQ para el WPS S\_01, proceso SMAW

FORM QW-484A SUGGESTED FORMAT A FOR WELDER PERFORMANCE QUALIFICATIONS (WPQ) (See QW-301, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)																							
Welder's name <u>DANI CANTOR</u>		Identification no. <u>DC</u>		<u>WPQ_5_01</u>																			
<b>Test Description</b>																							
Identification of WPS followed <u>S_01</u>		<input checked="" type="checkbox"/> Test coupon		Date welded <u>2-dic-21</u>																			
Specification and type/grade or UNS Number of base metal(s) <u>API 5L X65 PSL 2</u>		Thickness <u>7,11 mm</u>		Production weld																			
<b>Testing Variables and Qualification Limits</b>																							
<b>Welding Variables (QW-350)</b>			<b>Actual Values</b>		<b>Range Qualified</b>																		
[E]Welding process(es)			<u>SMAW</u>		<u>SMAW</u>																		
Type (i.e.; manual, semi-automatic) used			<u>MANUAL</u>		<u>MANUAL</u>																		
[E]Backing (with/without)			<u>SIN</u>		<u>SIN</u>																		
[E] <input type="checkbox"/> Plate <input checked="" type="checkbox"/> Pipe (enter diameter if pipe or tube)			<u>Ø6"</u>		<u>NPS 2.1/2 a ILIMITADO</u>																		
			<u>1</u>		<small>(POR QW-423.1) P-No. 1 through P-No. 15F, P-No. 34, and P-No. 41 through P-No. 49</small>																		
[E]Base metal P-Number to P-Number			<u>5.5</u>		<u>5.5</u>																		
[E]Filler metal or electrode specification(s) (SFA) (info. only)			<u>E8010-G</u>		<u>E8010-G</u>																		
[E]Filler metal or electrode classification(s) (info. only)			<u>F3</u>		<u>F1 F2 (CON BACKING) F3 (SIN/CON BACKING)</u>																		
[E] Filler metal F-Number(s)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
Consumable insert (GTAW or PAW)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
Filler Metal Product Form (QW-404.23) (GTAW or PAW)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
[E]Deposit thickness for each process			<u>7,11 mm / junta</u>		<u>14,22 mm</u>																		
Process 1 <u>SMAW</u> 3 layers minimum <input checked="" type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No			<u>3mm / pase</u>		<u>6 mm</u>																		
Process 2 <u>                    </u> 3 layers minimum <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No			<u>-</u>		<u>-</u>																		
[E]Position(s)			<u>5G</u>		<u>PLANA, VERTICAL, SOBRECABEZA</u>																		
[E]Vertical progression (uphill or downhill)			<u>Down</u>		<u>Down</u>																		
Type of fuel gas (OFW)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
Use of backing gas (GTAW, PAW, GMAW)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
Transfer mode (spray, globular, or pulse to short circuit-GMAW)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
GTAW current type and polarity (AC, DCEP, DCEN)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
<b>RESULTS</b>																							
Visual examination of completed weld (QW-302.4)			<u>(S2_R) CONFORME</u>																				
<input checked="" type="checkbox"/> Transverse face and root bends [QW-462.3(a)]			<input type="checkbox"/> Longitudinal bends [QW-462.3(b)]																				
<input type="checkbox"/> Side bends (QW-462.2)																							
<input type="checkbox"/> Pipe bend specimen, corrosion-resistant weld metal overlay [QW-462.5(c)]																							
<input type="checkbox"/> Plate bend specimen, corrosion-resistant weld metal overlay [QW-462.5(d)]																							
<input type="checkbox"/> Pipe specimen, macro test for fusion [QW-462.5(b)]																							
<input type="checkbox"/> Plate specimen, macro test for fusion [QW-462.5(e)]																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>Result</th> <th>Type</th> <th>Result</th> <th>Type</th> <th>Result</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><u>(S2_DR1) RAIZ</u></td> <td><u>CONFORME</u></td> <td><u>(S2_DC1) CARA</u></td> <td><u>CONFORME</u></td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td><u>(S2_DR2) RAIZ</u></td> <td><u>CONFORME</u></td> <td><u>(S2_DC2) CARA</u></td> <td><u>CONFORME</u></td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>						Type	Result	Type	Result	Type	Result	<u>(S2_DR1) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(S2_DC1) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-	-	<u>(S2_DR2) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(S2_DC2) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-	-
Type	Result	Type	Result	Type	Result																		
<u>(S2_DR1) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(S2_DC1) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-	-																		
<u>(S2_DR2) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(S2_DC2) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-	-																		
Alternative Volumetric Examination Results (QW-191): <u>-</u> RT <input type="checkbox"/> or UT <input type="checkbox"/> (check one)																							
Fillet weld — fracture test (QW-181.2) <u>-</u> Length and percent of defects <u>-</u>																							
<input type="checkbox"/> Fillet welds in plate [QW-462.4(b)] <input type="checkbox"/> Fillet welds in pipe [QW-462.4(c)]																							
Macro examination (QW-184) <u>                    </u> Fillet size (in.) <u>                    </u> Concavity or convexity (in.) <u>                    </u>																							
Other tests <u>                    </u>																							
Film or specimens evaluated by <u>CRISTHIAN CAMILO QUIROGA - VT</u>			Company: <u>CYNDTE S.A.S</u>																				
Mechanical tests conducted by <u>CESAR TUNARROSA N.</u>			Laboratory test no. <u>(VT)JCT-NAL-VT-004</u>																				
Welding supervised by <u>CESAR TUNARROSA N.</u>																							
We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE.																							
Date <u>2/12/2021</u>			Organization <u>TESIS DE MAESTRIA</u>																				
Certified by <u>JHON ROZO - INSPECTOR</u>																							

Los ensayos de dobléz de raíz presentan indicaciones de 2.6 y 2.9 mm en la probeta S2\_DR2, al ser menores de 3 mm son aceptadas por el código ASME, sección IX [49]. Las probetas de dobléz de cara no tienen indicaciones y son aceptadas. La inspección visual realizada en la junta soldada S2\_R no presentan defectos.

Por lo anterior este WPQ califica al soldador con las variables empleadas y es aceptado para realizar soldaduras de producción con el WPS S\_01.

### 3.3.2 WPQ para el WPS TS\_01, proceso mixto GTAW + SMAW

FORM QW-484A SUGGESTED FORMAT A FOR WELDER PERFORMANCE QUALIFICATIONS (WPQ) (See QW-301, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)					
Welder's name <u>DANI CANTOR</u>		Identification no. <u>DC</u> <u>WPQ TS_01</u>			
<b>Test Description</b>					
Identification of WPS followed <u>TS_01</u>		Date welded <u>2-dic-21</u>		<input checked="" type="checkbox"/> Test coupon <input type="checkbox"/> Production weld	
Specification and type/grade or UNS Number of base metal(s) <u>API 5L X65 PSL 2</u>		Thickness <u>7,11 mm</u>			
<b>Testing Variables and Qualification Limits</b>					
<b>Welding Variables (QW-350)</b>		<b>Actual Values</b>		<b>Range Qualified</b>	
[E]Welding process(es)		<u>GTAW / SMAW</u>		<u>GTAW / SMAW</u>	
Type (i.e.; manual, semi-automatic) used		<u>MANUAL</u>		<u>MANUAL</u>	
[E]Backing (with/without)		<u>SIN</u>		<u>SIN</u>	
[E] __Plate <input checked="" type="checkbox"/> Pipe (enter diameter if pipe or tube)		<u>ø6"</u>		<u>NPS 2.1/2 a ILIMITADO</u>	
		<u>1</u>		<small>(POR QW-423.1) P-No. 1 through P-No. 13F, P-No. 34, and P-No. 41 through P-No. 49</small>	
[E]Base metal P-Number to P-Number					
[E]Filler metal or electrode specification(s) (SFA) (info. only)		<u>5.28 / 5.5</u>		<u>5.28 / 5.5</u>	
[E]Filler metal or electrode classification(s) (info. only)		<u>ER80S-Ni1 / E8010-G</u>		<u>ER80S-Ni1 / E8010-G</u>	
		<u>F6 / F3</u>		<u>F6 / F1 F2 (CON BACKING) F3 (SIN/CON BACKING)</u>	
[E] Filler metal F-Number(s)					
[E] Consumable insert (GTAW or PAW)		<u>SIN</u>		<u>SIN</u>	
[E] Filler Metal Product Form (QW-404.23) (GTAW or PAW)		<u>VARILLA SOLIDA DESNUDA</u>		<u>VARILLA SOLIDA DESNUDA</u>	
[E]Deposit thickness for each process		<u>7,11mm / JUNTA</u>		<u>14,22 mm</u>	
Process 1 <u>GTAW</u> 3 layers minimum <input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No		<u>4 mm / PASE</u>		<u>8 mm</u>	
Process 2 <u>SMAW</u> 3 layers minimum <input checked="" type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		<u>4 mm / PASE</u>		<u>8 mm</u>	
[E]Position(s)		<u>5G</u>		<u>PLANA, VERTICAL, SOBRECABEZA</u>	
[E]Vertical progression (uphill or downhill)		<u>Up</u>		<u>Up</u>	
Type of fuel gas (OFW)		<u>N/A</u>		<u>N/A</u>	
[E] Use of backing gas (GTAW, PAW, GMAW)		<u>Ar 100%</u>		<u>Ar 100%</u>	
Transfer mode (spray, globular, or pulse to short circuit-GMAW)		<u>N/A</u>		<u>N/A</u>	
[E] GTAW current type and polarity (AC, DCEP, DCEN)		<u>DCEN</u>		<u>DCEN</u>	
<b>RESULTS</b>					
Visual examination of completed weld (QW-302.4)		<u>(TS2_R) CONFORME</u>			
<input checked="" type="checkbox"/> Transverse face and root bends [QW-462.3(a)]		<input type="checkbox"/> Longitudinal bends [QW-462.3(b)]			
<input type="checkbox"/> Side bends [QW-462.2]					
<input type="checkbox"/> Pipe bend specimen, corrosion-resistant weld metal overlay [QW-462.5(c)]					
<input type="checkbox"/> Plate bend specimen, corrosion-resistant weld metal overlay [QW-462.5(d)]					
<input type="checkbox"/> Pipe specimen, macro test for fusion [QW-462.5(b)]					
<input type="checkbox"/> Plate specimen, macro test for fusion [QW-462.5(e)]					
Type	Result	Type	Result	Type	Result
<u>(TS2_DR1) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(TS2_DC1) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-	-
<u>(TS2_DR2) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(TS2_DC2) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-	-
Alternative Volumetric Examination Results (QW-191):		- <input type="checkbox"/> RT <input type="checkbox"/> or UT <input type="checkbox"/> (check one)			
Fillet weld — fracture test (QW-181.2)		- Length and percent of defects		-	
<input type="checkbox"/> Fillet welds in plate [QW-462.4(b)]		<input type="checkbox"/> Fillet welds in pipe [QW-462.4(c)]			
Macro examination (QW-184)		Fillet size (in.)		Concavity or convexity (in.)	
Other tests					
Film or specimens evaluated by		<u>CRISTHIAN CAMILO QUIROGA (VT)</u>		Company: <u>CYNDTE S.A.S</u>	
Mechanical tests conducted by		<u>CESAR TUNARROSA N.</u>		Laboratory test no. <u>(VT)JCT-NAL-VT-002</u>	
Welding supervised by		<u>CESAR TUNARROSA N.</u>			
We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE.					
Date	<u>2-dic-21</u>	Certified by	<u>JHON ROZO - INSPECTOR</u>		
		Organization	<u>TESIS DE MAESTRIA</u>		

Los ensayos de doblé de raíz presentan indicaciones de 2.5 y 1.8 mm en la probeta TS2\_DR1, y de 2.0 y 2.8 mm en la probeta TS2\_DR2, al ser menores de 3 mm son

aceptadas por el código ASME, sección IX [49]. Las probetas de dobléz de cara no tienen indicaciones y son aceptadas. La inspección visual realizada en la junta soldada TS2\_R no presentan defectos.

Por lo anterior este WPQ califica al soldador con las variables empleadas y es aceptado para realizar soldaduras de producción con el WPS TS\_01.



### 3.3.3 WPQ para el WPS GF\_01, proceso mixto GMAW + FCAW

FORM QW-484A SUGGESTED FORMAT A FOR WELDER PERFORMANCE QUALIFICATIONS (WPQ) (See QW-301, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)																							
Welder's name <u>DANI CANTOR</u>		Identification no. <u>DC</u>		WPQ <u>GF_01</u>																			
<b>Test Description</b>																							
Identification of WPS followed <u>GF_01</u>		<input checked="" type="checkbox"/> Test coupon		Date welded <u>2-dic-21</u>																			
Specification and type/grade or UNS Number of base metal(s) <u>API 5L X65 PSL 2</u>		Thickness <u>7,11 mm</u>		Production weld																			
<b>Testing Variables and Qualification Limits</b>																							
<b>Welding Variables (QW-350)</b>			<b>Actual Values</b>		<b>Range Qualified</b>																		
[E]Welding process(es)			<u>GMAW / FCAW</u>		<u>GMAW / FCAW</u>																		
Type (i.e.; manual, semi-automatic) used			<u>SEMIAUTOMATICO /SEMIAUTOMATICO</u>		<u>SEMIAUTOMATICO /SEMIAUTOMATICO</u>																		
[E]Backing (with/without)			<u>SIN</u>		<u>SIN</u>																		
[E] <u>  </u> Plate <u>  </u> <input checked="" type="checkbox"/> Pipe (enter diameter if pipe or tube)			<u>Ø6"</u>		<u>NPS 2.1/2 a ILIMITADO</u>																		
[E]Base metal P-Number to P-Number			<u>1</u>		<small>(POR QW-423.1) P-No. 1 through P-No. 15F, P-No. 34, and P-No. 41 through P-No. 49</small>																		
Filler metal or electrode specification(s) (SFA) (info. only)			<u>5.18 / 5.29</u>		<u>5.18 / 5.29</u>																		
Filler metal or electrode classification(s) (info. only)			<u>ER70S-6 / E81T1-Ni1M-JH4</u>		<u>ER70S-6 / E81T1-Ni1M-JH4</u>																		
[E] Filler metal F-Number(s)			<u>F6 / F6</u>		<u>F6 / F6</u>																		
Consumable insert (GTAW or PAW)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
Filler Metal Product Form (QW-404.23) (GTAW or PAW)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
[E]Deposit thickness for each process			<u>7,11mm / junta</u>		<u>14,22 mm</u>																		
Process 1 <u>  </u> <u>GMAW</u> 3 layers minimum <u>  </u> Yes <u>  </u> <input checked="" type="checkbox"/> No			<u>4 mm / pase</u>		<u>8 mm</u>																		
Process 2 <u>  </u> <u>FCAW</u> 3 layers minimum <u>  </u> Yes <u>  </u> <input checked="" type="checkbox"/> No			<u>4 mm / pase</u>		<u>8 mm</u>																		
[E]Position(s)			<u>5G</u>		<u>PLANA, VERTICAL, SOBRECABEZA</u>																		
[E]Vertical progression (uphill or downhill)			<u>Up</u>		<u>Up</u>																		
Type of fuel gas (OFW)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
[E] Use of backing gas (GTAW, PAW, GMAW)			<u>Ar + CO2 - 75/25 %</u>		<u>Ar + CO2 - 75/25 %</u>																		
[E] Transfer mode (spray, globular, or pulse to short circuit-GMAW)			<u>S T T</u>		<u>S T T</u>																		
GTAW current type and polarity (AC, DCEP, DCEN)			<u>N/A</u>		<u>N/A</u>																		
<b>RESULTS</b>																							
Visual examination of completed weld (QW-302.4)			<u>(GF2_R) CONFORME</u>																				
<input checked="" type="checkbox"/> Transverse face and root bends [QW-462.3(a)]			<input type="checkbox"/> Longitudinal bends [QW-462.3(b)]																				
<input type="checkbox"/> Side bends (QW-462.2)																							
<input type="checkbox"/> Pipe bend specimen, corrosion-resistant weld metal overlay [QW-462.5(c)]																							
<input type="checkbox"/> Plate bend specimen, corrosion-resistant weld metal overlay [QW-462.5(d)]																							
<input type="checkbox"/> Pipe specimen, macro test for fusion [QW-462.5(b)]																							
<input type="checkbox"/> Plate specimen, macro test for fusion [QW-462.5(e)]																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>Result</th> <th>Type</th> <th>Result</th> <th>Type</th> <th>Result</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><u>(GF2_DR1) RAIZ</u></td> <td><u>CONFORME</u></td> <td><u>(GF2_DC1) CARA</u></td> <td><u>CONFORME</u></td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td><u>(GF2_DR2) RAIZ</u></td> <td><u>CONFORME</u></td> <td><u>(GF2_DC2) CARA</u></td> <td><u>CONFORME</u></td> <td>-</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Type	Result	Type	Result	Type	Result	<u>(GF2_DR1) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(GF2_DC1) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-		<u>(GF2_DR2) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(GF2_DC2) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-	
Type	Result	Type	Result	Type	Result																		
<u>(GF2_DR1) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(GF2_DC1) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-																			
<u>(GF2_DR2) RAIZ</u>	<u>CONFORME</u>	<u>(GF2_DC2) CARA</u>	<u>CONFORME</u>	-																			
Alternative Volumetric Examination Results (QW-191): <u>  </u> RT <input type="checkbox"/> or UT <input type="checkbox"/> (check one)																							
Fillet weld — fracture test (QW-181.2) <u>  </u>			Length and percent of defects <u>  </u>																				
<input type="checkbox"/> Fillet welds in plate [QW-462.4(b)]			<input type="checkbox"/> Fillet welds in pipe [QW-462.4(c)]																				
Macro examination (QW-184) <u>  </u>			Fillet size (in.) <u>  </u>		Concavity or convexity (in.) <u>  </u>																		
Other tests <u>  </u>																							
Film or specimens evaluated by <u>CRISTHIAN CAMILO QUIROGA (VT)</u>			Company: <u>CYNDTE S.A.S</u>																				
Mechanical tests conducted by <u>CESAR TUNARROSA N.</u>			Laboratory test no. <u>(VT) ICT-NAL-VT-006</u>																				
Welding supervised by <u>CESAR TUNARROSA N.</u>																							
We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared, welded, and tested in accordance with the requirements of Section IX of the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE.																							
Date <u>2-dic-21</u>			Organization <u>TESIS DE MAESTRIA</u>																				
Certified by <u>JHON ROZO - INSPECTOR</u>																							

Los ensayos de doblez de raíz presentan una indicación de 1.4 mm en la probeta GF2\_DR2, al ser menor de 3 mm es aceptada por el código ASME, sección IX [49]. Las

probetas de doblez de cara no tienen indicaciones y son aceptadas. La inspección visual realizada en la junta soldada GF2\_R no presentan defectos.

Por lo anterior este WPQ califica al soldador con las variables empleadas y es aceptado para realizar soldaduras de producción con el WPS GF\_01.

### **3.4 Microscopia Óptica**

El código ASME sección IX [49] no indica requerimientos de análisis por microscopia óptica o análisis metalográficos para calificación de soldadores o de procedimientos de soldadura realizados bajo el código ASME B31.8 [34]. Estos ensayos se realizaron en esta investigación, para el análisis metalográfico y la caracterización de las juntas soldadas.

El análisis metalográfico de las probetas para cada uno de los procesos de soldadura empleados se realizó por microscopia óptica. Con el fin de identificar las zonas de la junta soldada, la microestructura, el tamaño de grano y las fases presentes. El equipo empleado para este análisis fue el microscopio óptico del laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional de Colombia marca LECO, modelo leco500, con rango hasta 2000X. Cada probeta fue llevada hasta lija 2000, pulidas con polvo de óxido de aluminio en la pulidora marca LECO, modelo 805-800, del laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional de Colombia y atacada con Nital al 2%.

A continuación, se presentan las micrografías de cada zona de las juntas soldadas, por cada proceso mixto de soldadura realizado.

En la Figura 3-1 se observan las micrografías a diferentes aumentos del metal base, acero API 5LX65. Material base común para todas las juntas soldadas. Imágenes tomadas en la probeta GF1. A menores aumentos se observan zonas centrales horizontales, con dirección de grano hacia el sentido de laminación del material base. Hacia los extremos no se observan zonas con orientación de granos preferencial, esto pudo ser generado por un proceso térmico aplicado después del proceso de laminación o rolado del material base.

A mayores aumentos se observa una microestructura principalmente de fase ferrítica, con pequeñas zonas perlíticas en los límites de grano. Se observan granos aciculares, algunos de forma alargada por el proceso de laminación.

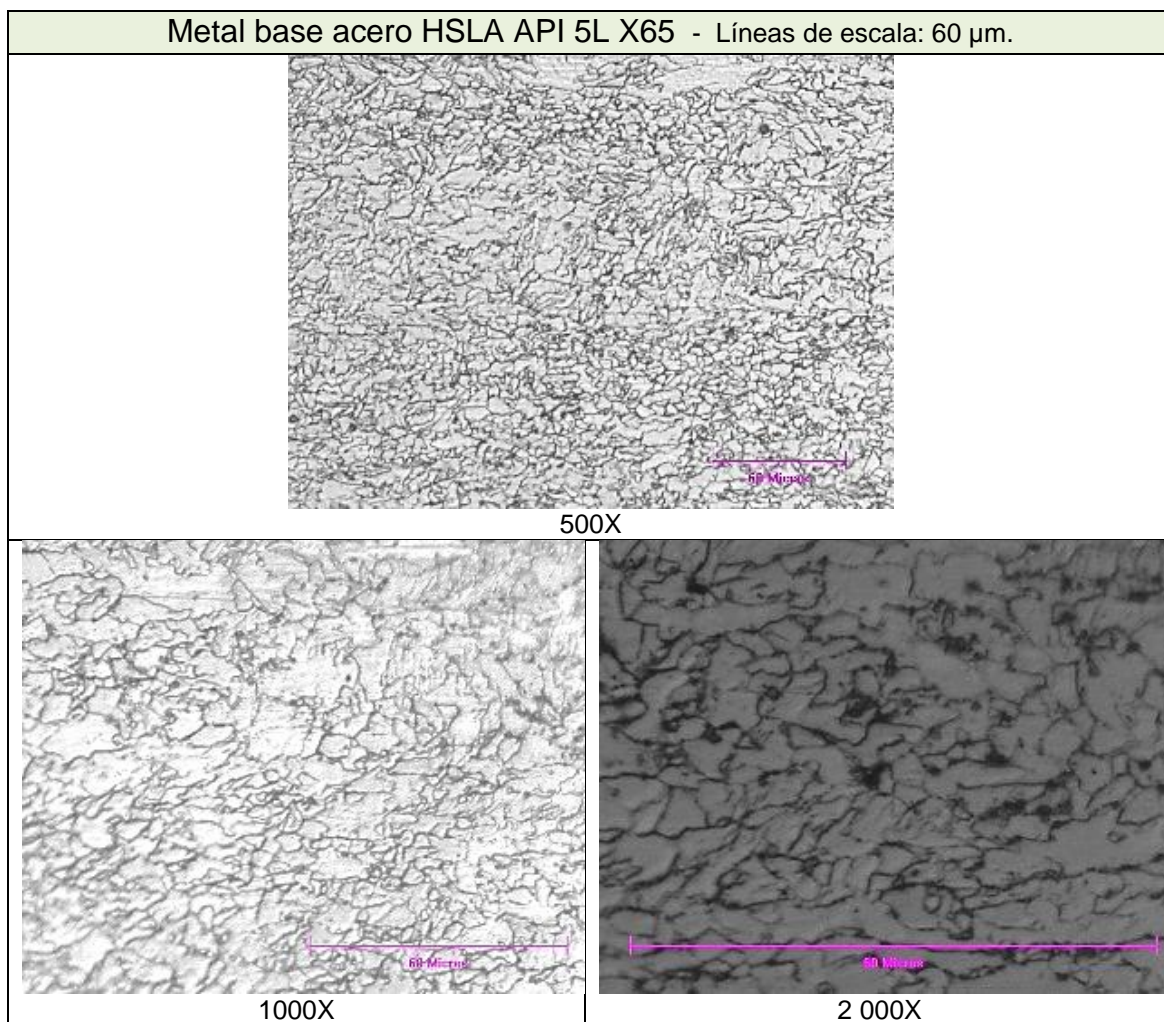
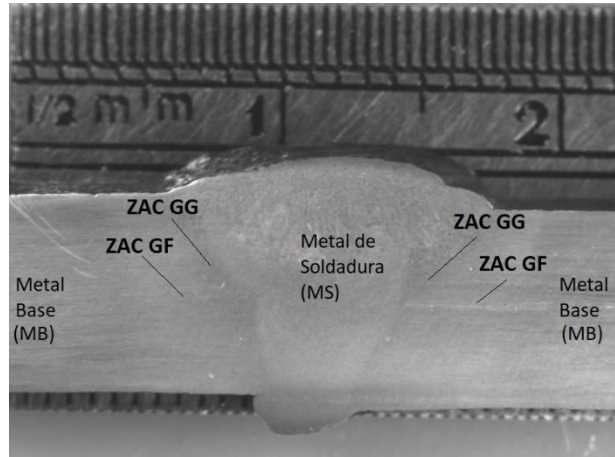
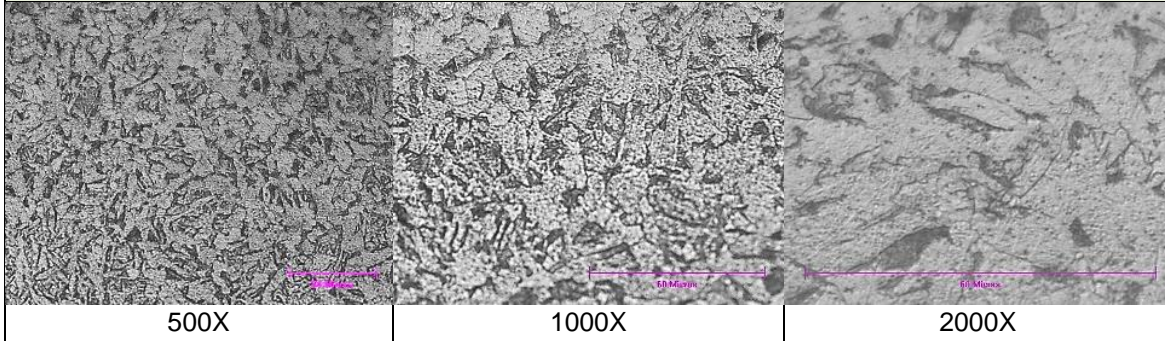


Figura 3-1. Micrografías por microscopía óptica del metal base, acero al carbono HSLA API 5L X65.

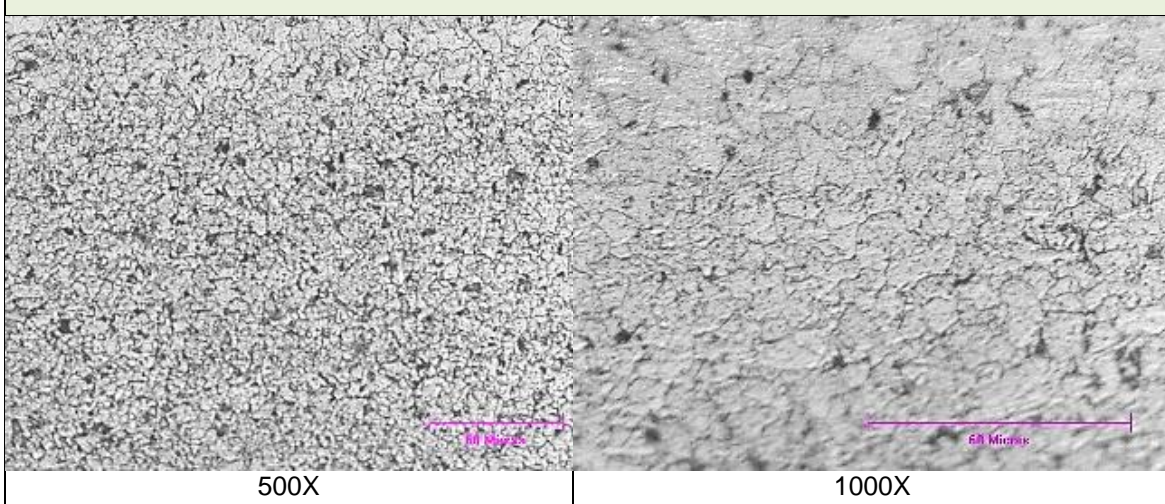
Las micrografías de la junta soldada S1, probeta 1 (WPS S\_01, proceso SMAW), para el metal de soldadura, las zonas afectadas por el calor de grano fino y de grano grueso, se muestran en la figura 3-2:



Metal de soldadura (MS centro) - Líneas de escala: 60  $\mu\text{m}$ .



Zona afectada por el calor de Grano fino (ZAC-GF) - Líneas de escala: 60  $\mu\text{m}$ .



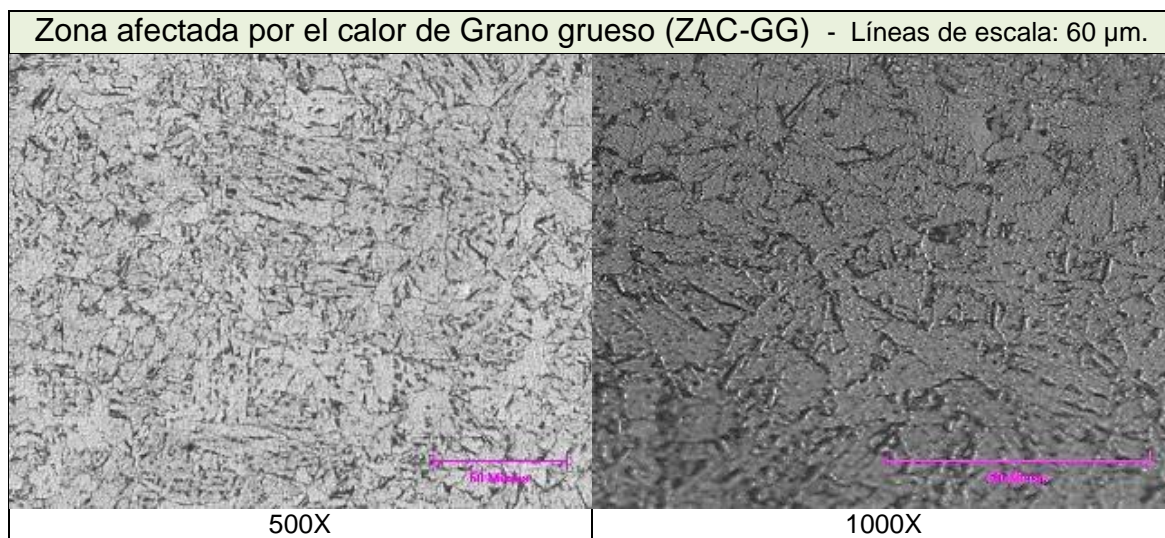
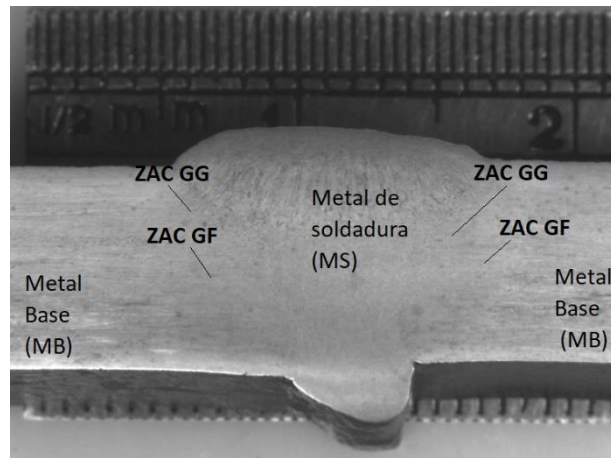


Figura 3-2. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta S1 probeta 1.

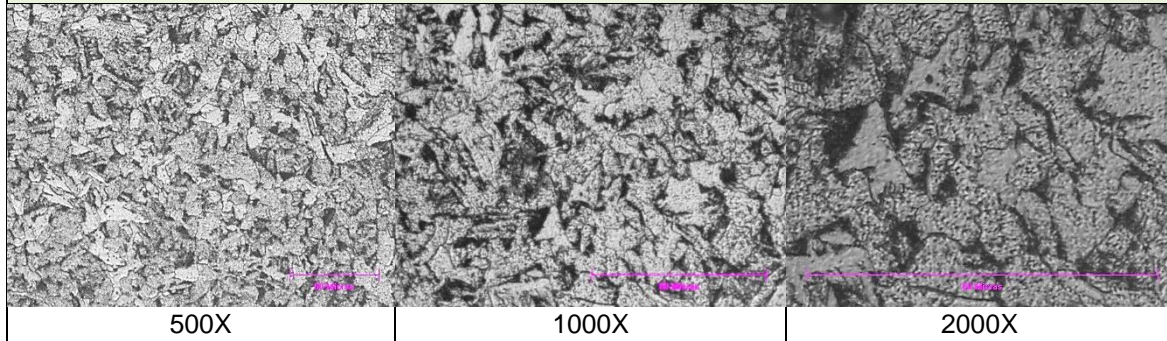
En la junta S1, las zonas del MS y ZAC presentan ferrita en la microestructura. Se observa en el MS y en la ZAC-GG granos aciculares, mientras que en la ZAC-GF se observan granos equiaxiales y de menor tamaño que en la ZAC-GG.

Las micrografías de la junta soldada S1, probeta 2 (WPS S\_01, proceso SMAW), para el metal de soldadura, las zonas afectadas por el calor de grano fino y grano grueso se muestran en la figura 3-3.

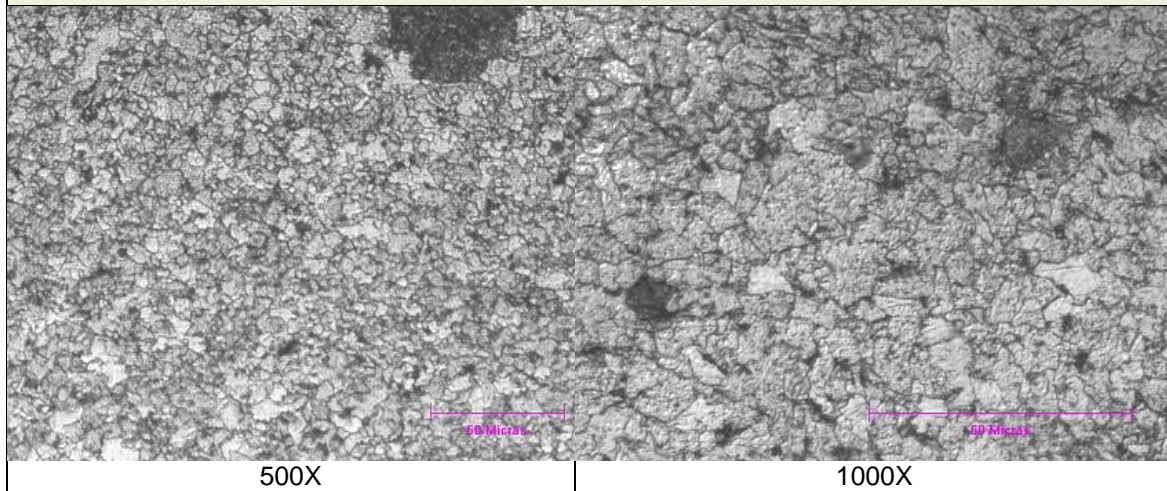
En la junta S1 probeta 2, la orientación de los granos del metal de soldadura del cordón superior, presentan crecimiento dendrítico con direccionamiento hacia el flujo de salida de calor. En el cordón inferior hay refinamiento de grano por la entrada de calor del cordón aplicado posteriormente. Estructura principal con granos aciculares de fase ferrita. Se observa en la ZAC-GG granos de mayor tamaño que en la ZAC-GF, en ambos casos con morfología acicular.



Metal de soldadura (MS centro) - Líneas de escala: 60  $\mu\text{m}$ .



Zona afectada por el calor de Grano fino (ZAC-GF) - Líneas de escala: 60  $\mu\text{m}$ .



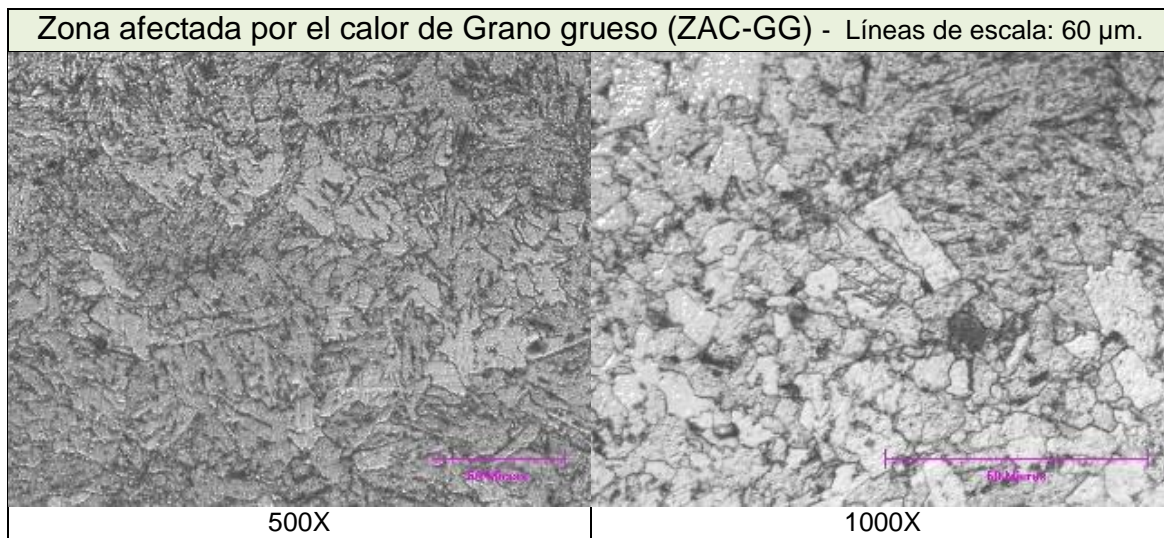
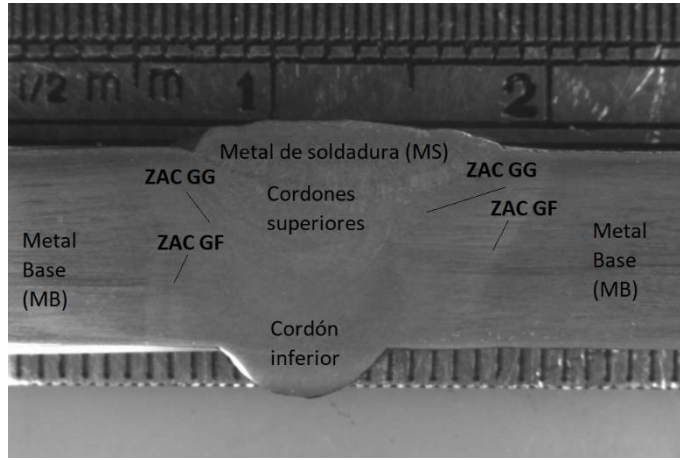
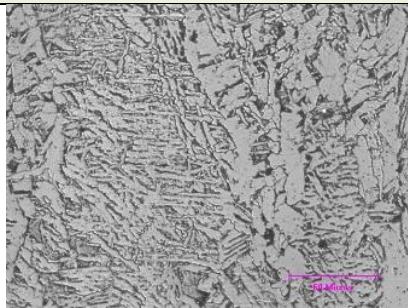


Figura 3-3. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta S1 probeta 2.

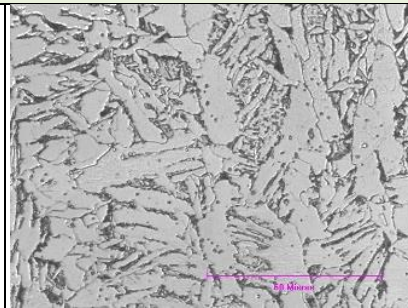
Las micrografías de la junta soldada TS1, probeta 1 (WPS TS\_01, procesos GTAW+SMAW), para el metal de soldadura, las zonas afectadas por el calor de grano fino y grano grueso del cordón inferior y cordones superiores se muestran en la figura 3-4:



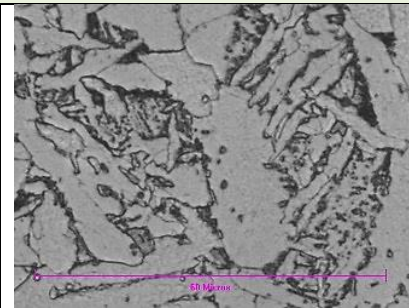
Metal de soldadura (MS centro) del cordón superior SMAW - Líneas de escala: 60  $\mu$ m



500X

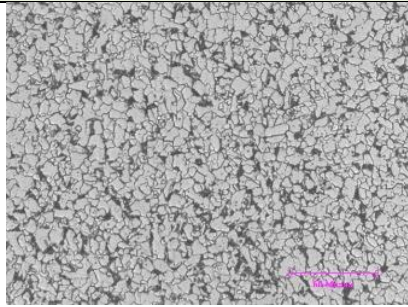


1000X

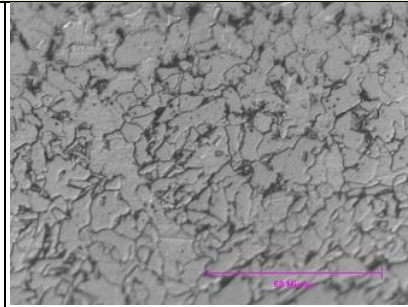


2000X

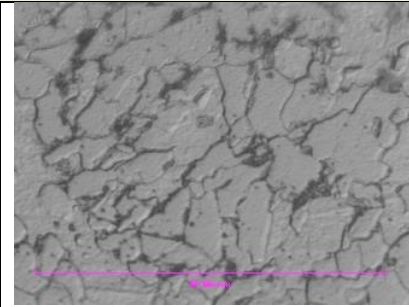
Metal de soldadura (MS centro) del cordón inferior GTAW- Líneas de escala: 60  $\mu$ m



500X

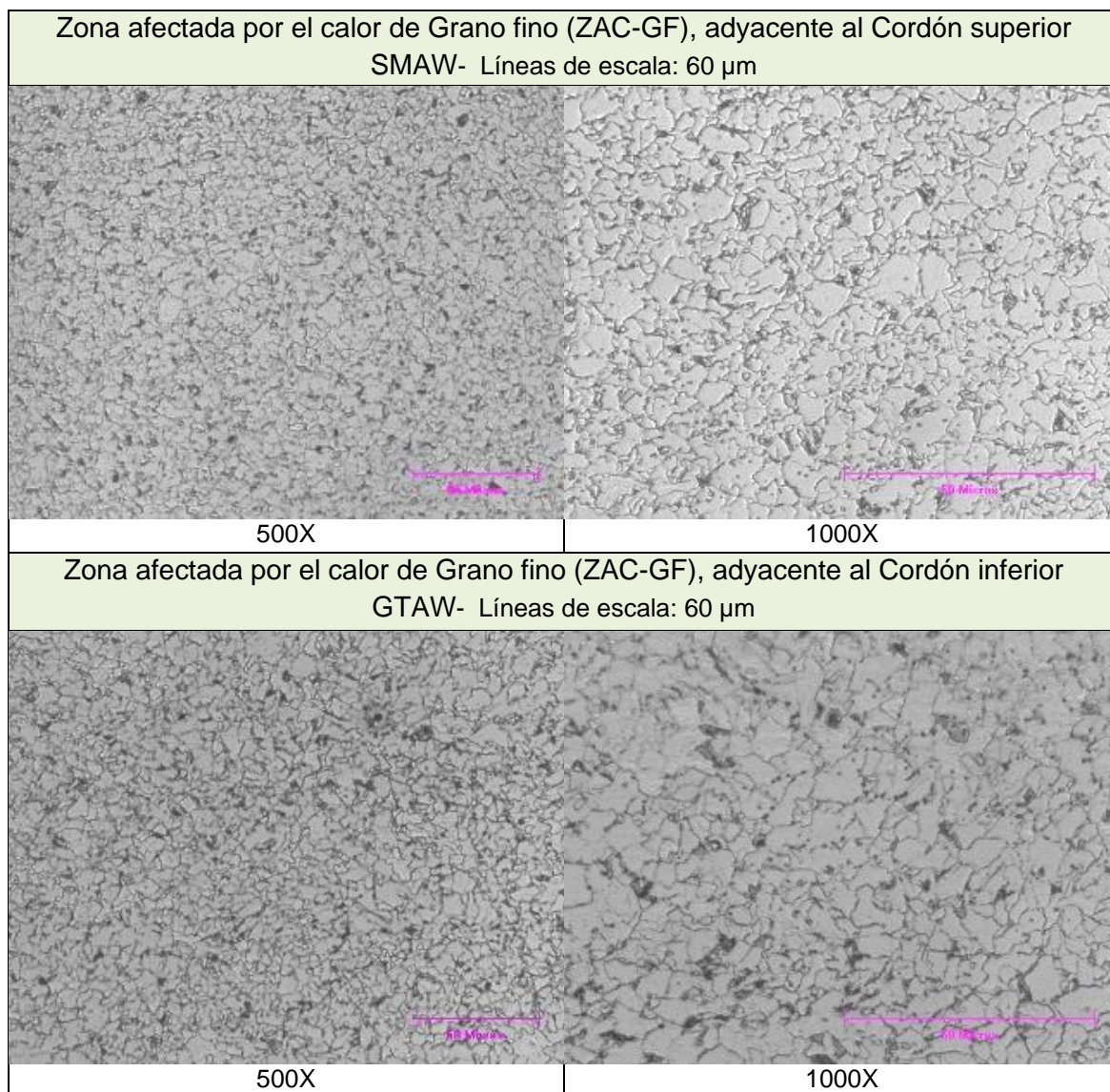


1000X



2000X





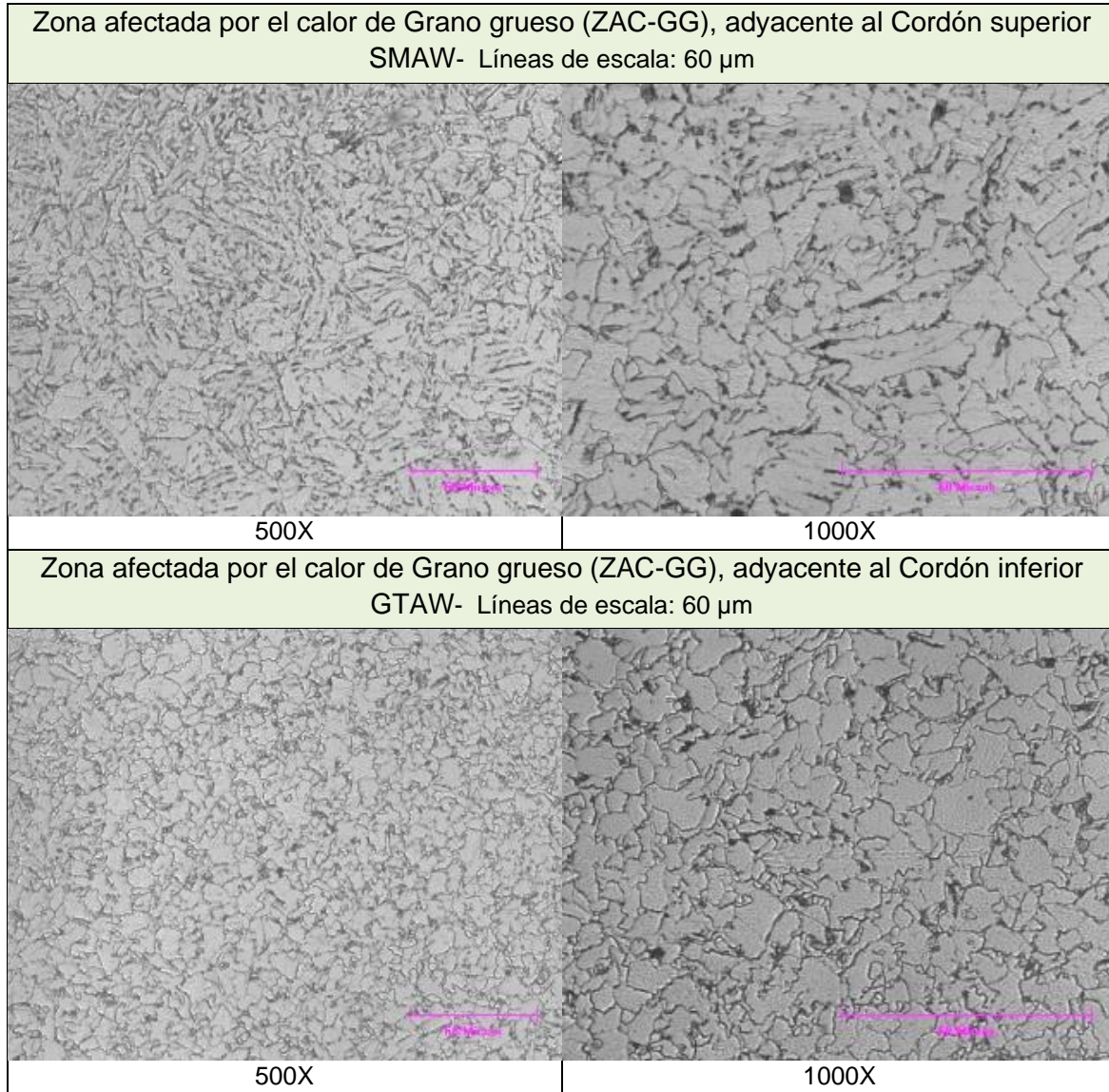
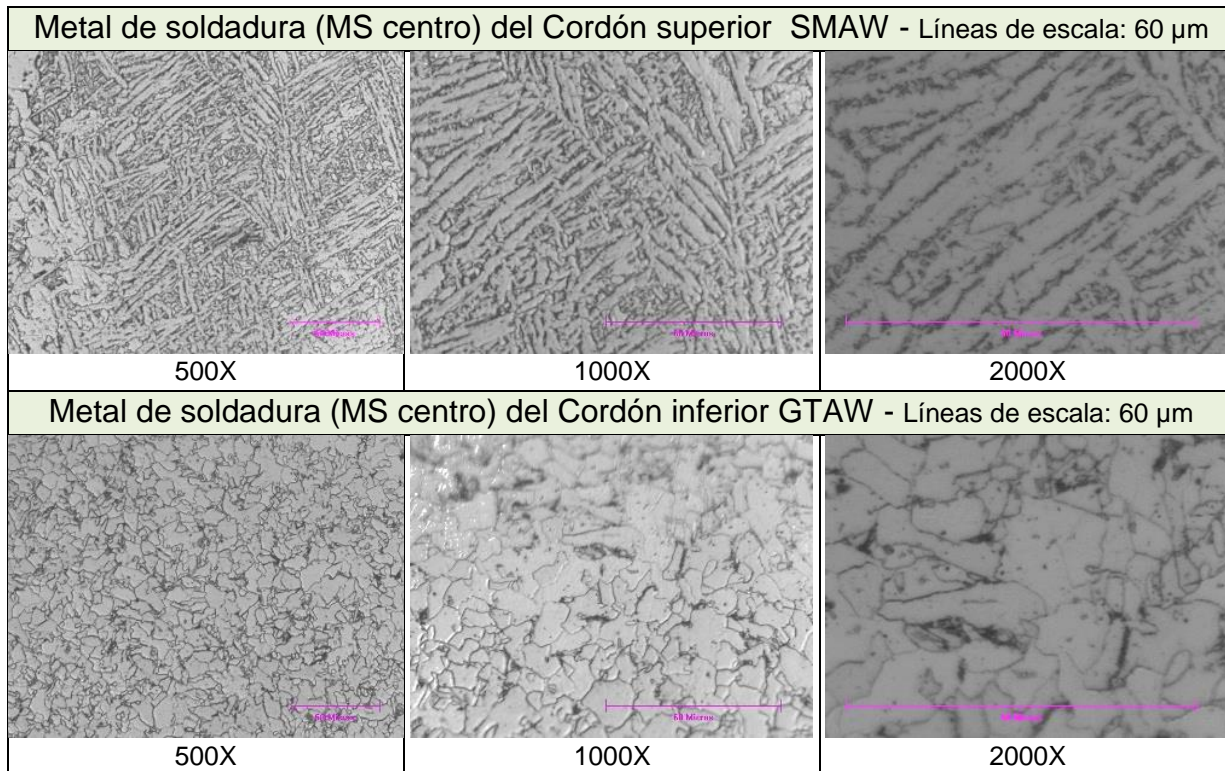


Figura 3-4. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta TS1 probeta 1.

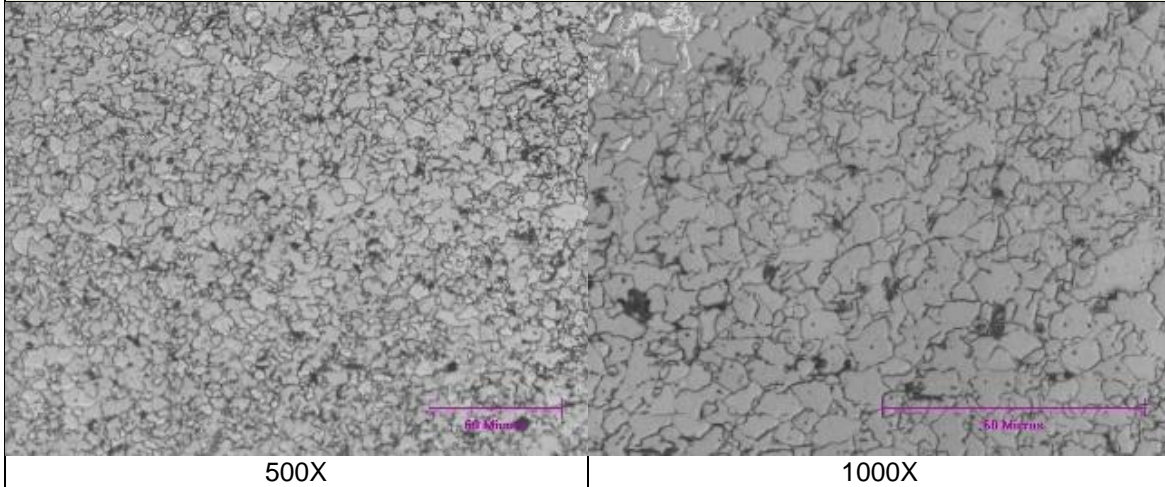
En la junta TS1 probeta 1, el MS del cordón superior, realizado con SMAW, presenta ferrita acicular y ferrita con estructuras aciculares alargadas, con direccionamiento hacia el flujo de salida de calor del cordón. El MS del cordón inferior, realizado con GTAW, exhibe granos de ferrita más homogéneos, de menor tamaño y forma acicular.

En las zonas adyacentes al cordón superior y al inferior, las ZAC-GF presentan ferrita equiaxial con tamaño de grano homogéneo. Caso contrario para las ZAC-GG adyacentes al cordón superior y al cordón inferior; cordón superior con ferrita acicular y granos de mayor tamaño que los granos del cordón inferior con formas más equiaxiales.

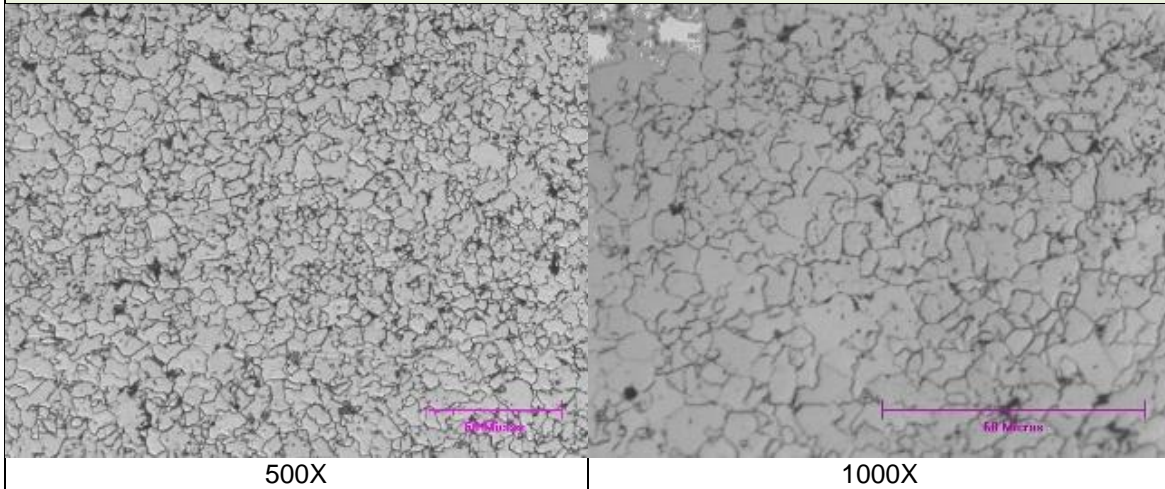
Las micrografías de la junta soldada TS2, probeta 2 (WPS TS\_01, procesos GTAW+SMAW), para el metal de soldadura, las zonas afectadas por el calor de grano fino y grano grueso del cordón inferior y cordones superiores se muestran en la figura 3-5:



Zona afectada por el calor de Grano fino (ZAC-GF), adyacente al Cordón superior SMAW - Líneas de escala: 60  $\mu\text{m}$



Zona afectada por el calor de Grano fino (ZAC-GF), adyacente al Cordón inferior GTAW - Líneas de escala: 60  $\mu\text{m}$



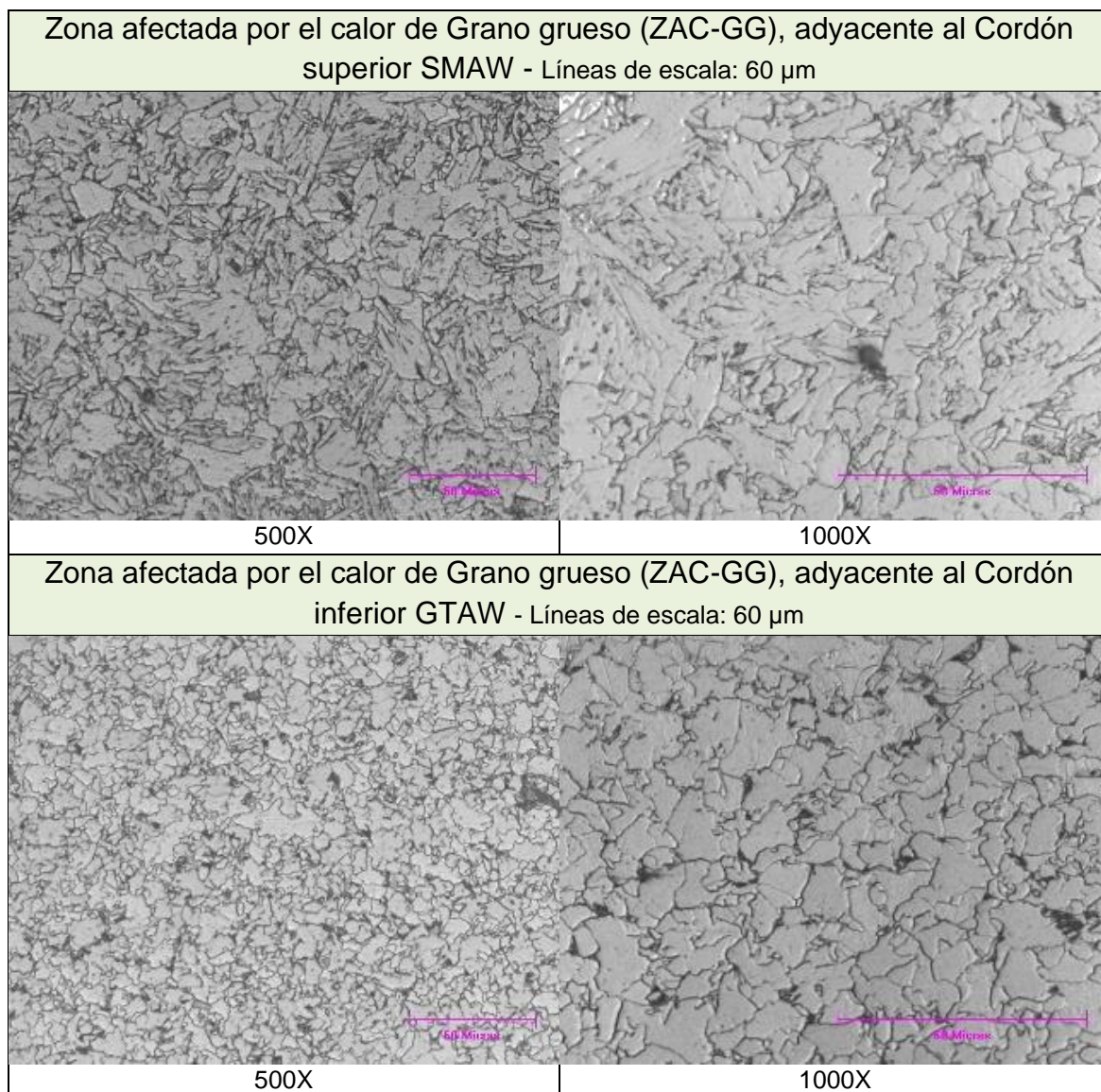


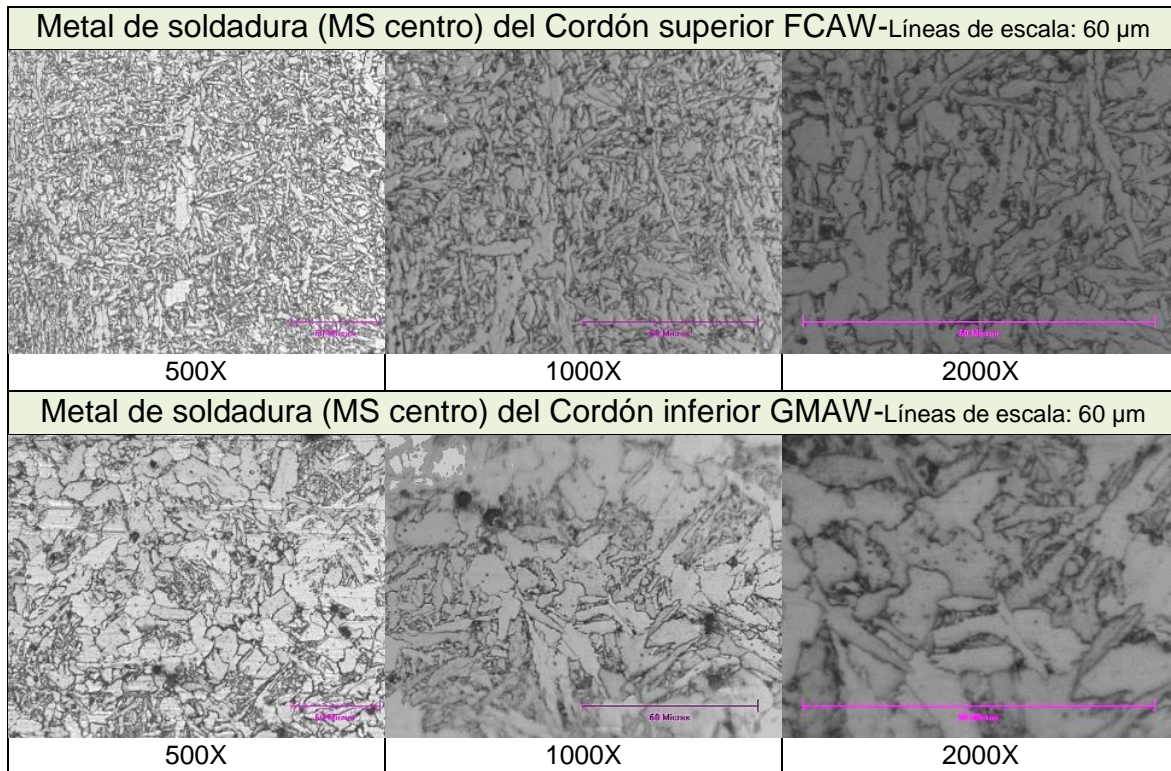
Figura 3-5. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta TS2 probeta 2.

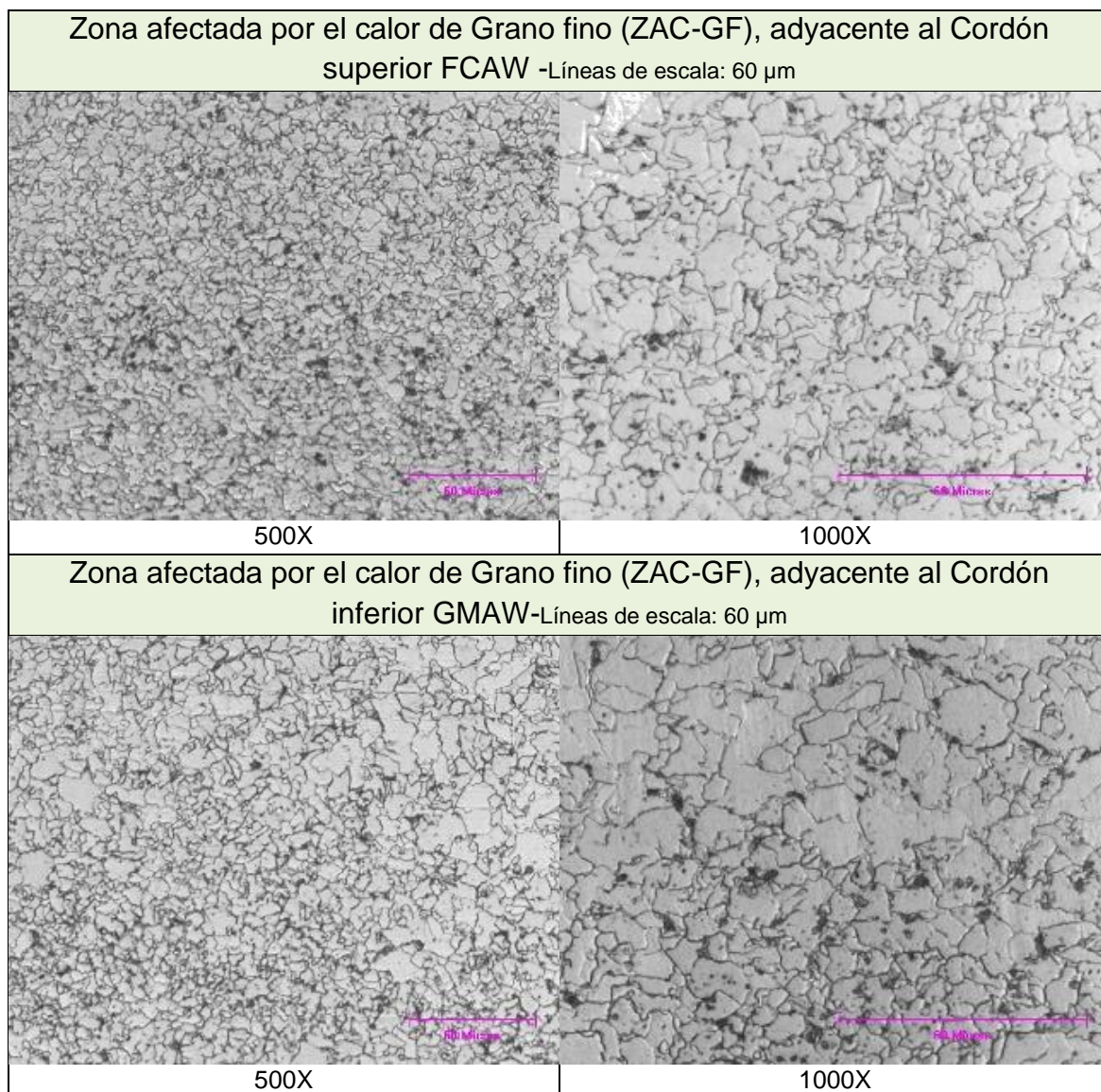
En la junta TS2 probeta 2, el MS del cordón superior, realizado con SMAW, tiene microestructura con fase ferrita, laminar, tipo widmanstatten y con direccionamiento hacia el flujo de salida de calor del cordón, también presenta zonas con ferrita acicular. El MS del cordón inferior, realizado con GTAW, presenta granos de ferrita más homogéneo con morfología acicular.

En las zonas adyacentes al cordón superior e inferior, las ZAC-GF presentan ferrita equiaxial con tamaño de grano homogéneo. Caso contrario para las ZAC-GG adyacentes

al cordón superior y al cordón inferior; cordón superior con ferrita acicular de granos con mayor tamaño a los granos del cordón inferior con formas más equiaxiales.

Las micrográficas de la junta soldada GF1, probeta 1 (WPS GF\_01, procesos GMAW+FCAW), para el metal de soldadura, las zonas afectadas por el calor de grano fino y grano grueso del cordón inferior y cordones superiores se muestran en la figura 3-6:





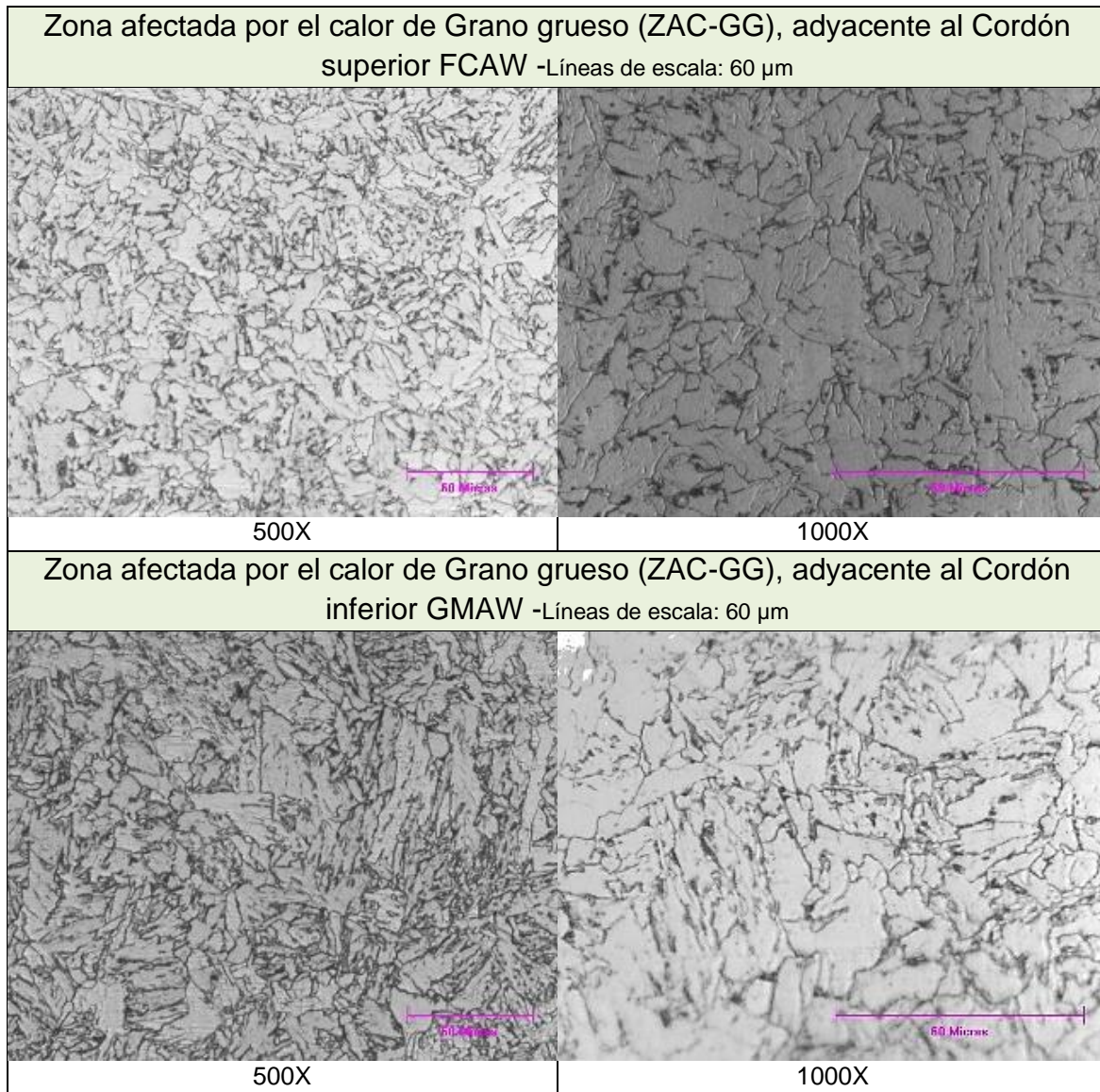


Figura 3-6. Micrografías del MS, ZACGF y ZACGG de la junta GF1 probeta 1.

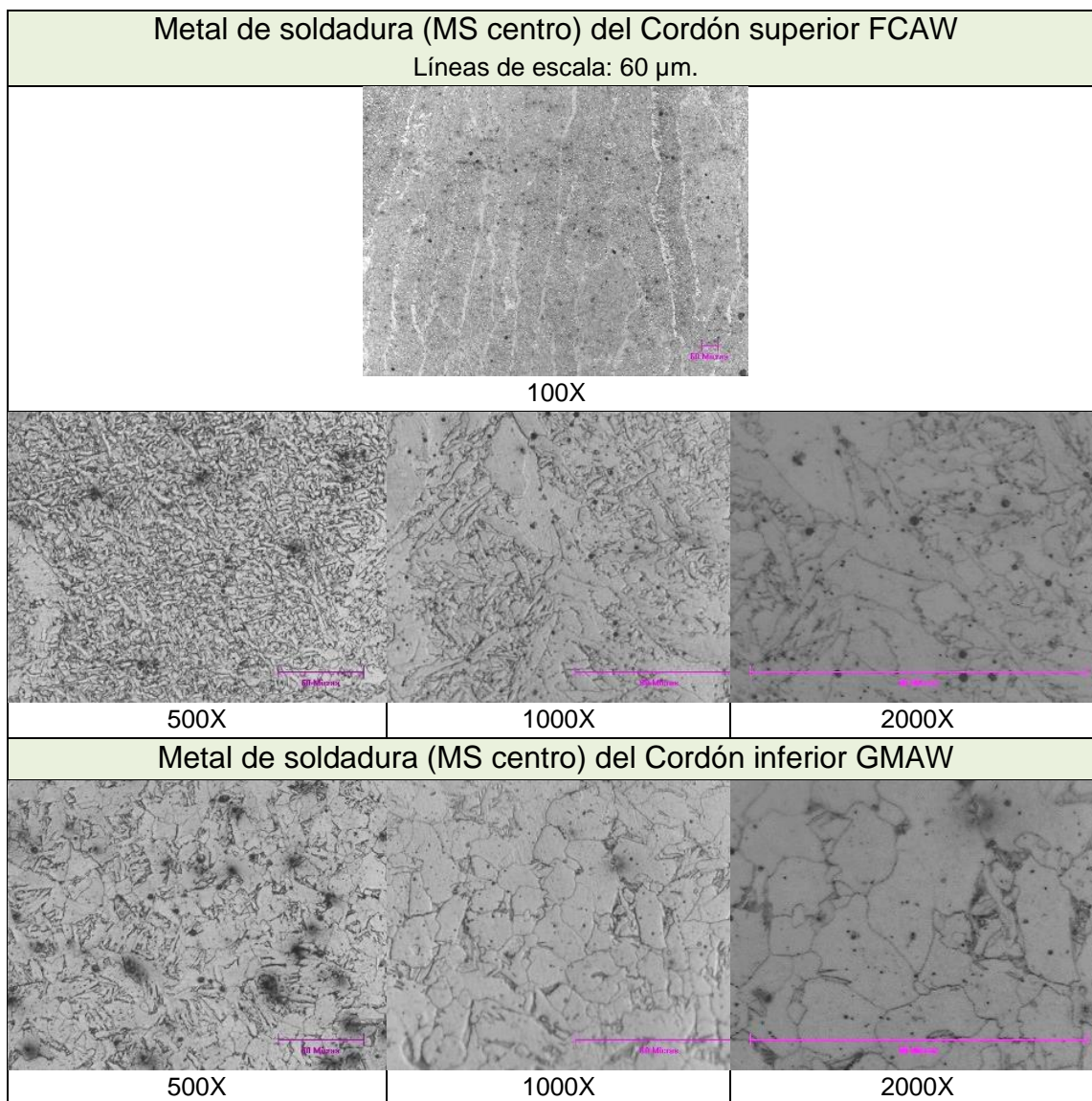
En la junta GF1 probeta 1, el MS del cordón superior, realizado con FCAW, presenta ferrita de morfología acicular, principalmente con microestructura laminar entrecruzada y direccionamiento aleatorio. El MS del cordón inferior, realizado con GMAW, presenta granos más gruesos de ferrita y morfología acicular.

En las zonas adyacentes al cordón superior y al inferior, las ZAC-GF presentan ferrita de granos con tamaño homogéneo y equiaxiales para las dos zonas. Caso contrario para las ZAC-GG adyacentes al cordón superior y al inferior; cordón superior con ferrita acicular de



granos ligeramente mayores a los granos generados en el cordón inferior con formas aciculares alargadas.

Las micrografías de la junta soldada GF2, probeta 1 (WPS GF\_01, procesos GMAW+FCAW), para el metal de soldadura, las zonas afectadas por el calor de grano grueso del cordón inferior y cordones superiores se muestran en la figura 3-7:



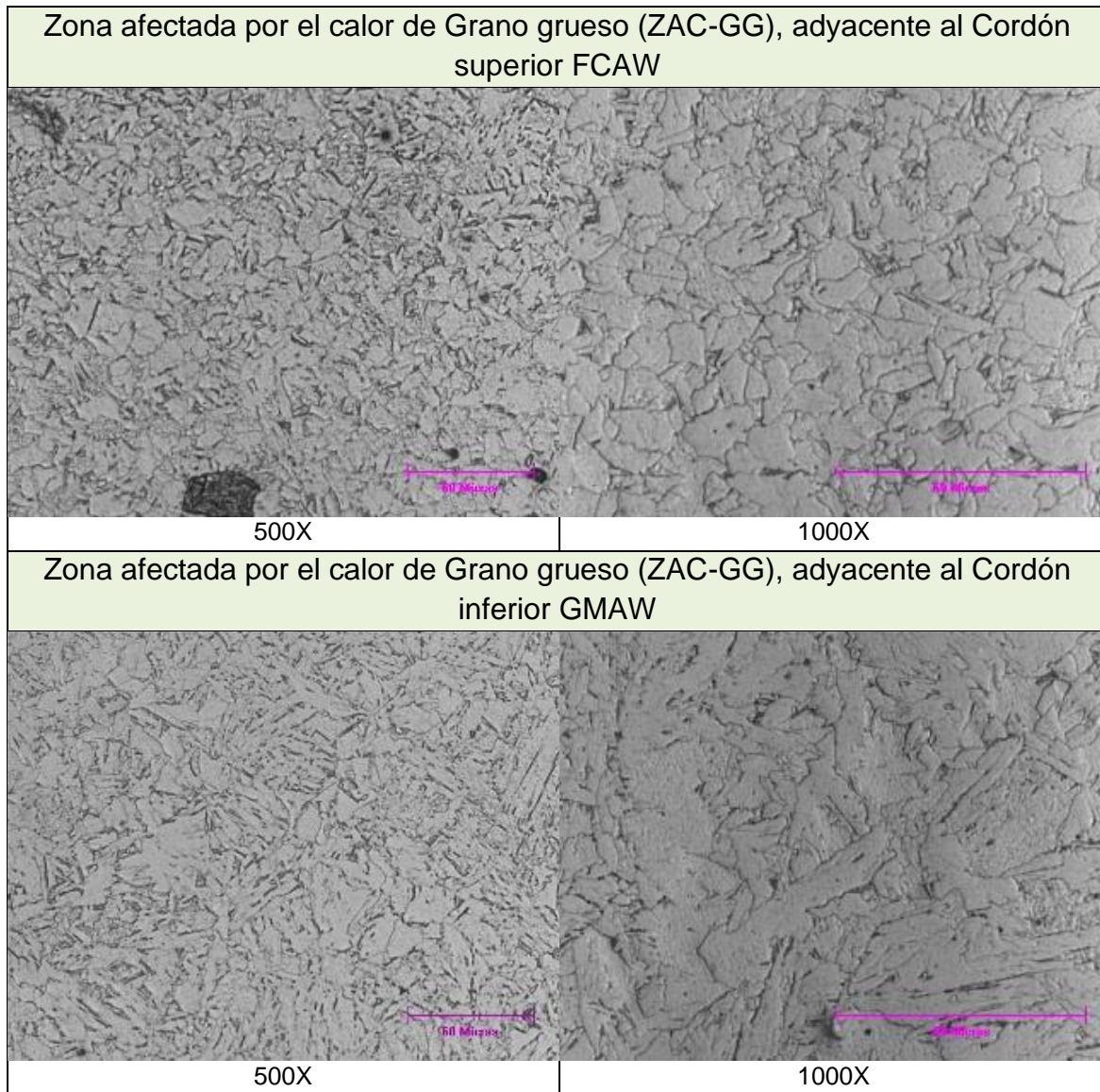


Figura 3-7. Micrografías del MS y ZACGG de la junta GF2 probeta 1.

En la junta GF2 probeta 1, el MS del cordón superior realizado con FCAW, tiene granos de ferrita con forma acicular, con granos más gruesos que las formas laminares encontradas en la probeta 1 de la junta GF1. El MS del cordón inferior, realizado con GMAW, presenta granos de ferrita más gruesos con morfología equiaxial.

En las zonas adyacentes al cordón superior e inferior, se observa que las ZAC-GG presentan ferrita de granos equiaxiales, adyacentes al cordón superior. Los granos son más grandes, aciculares y alargados en la zona adyacente al cordón inferior.

### **3.5 Microscopia electrónica de barrido -SEM-, por electrones secundarios (SE)**

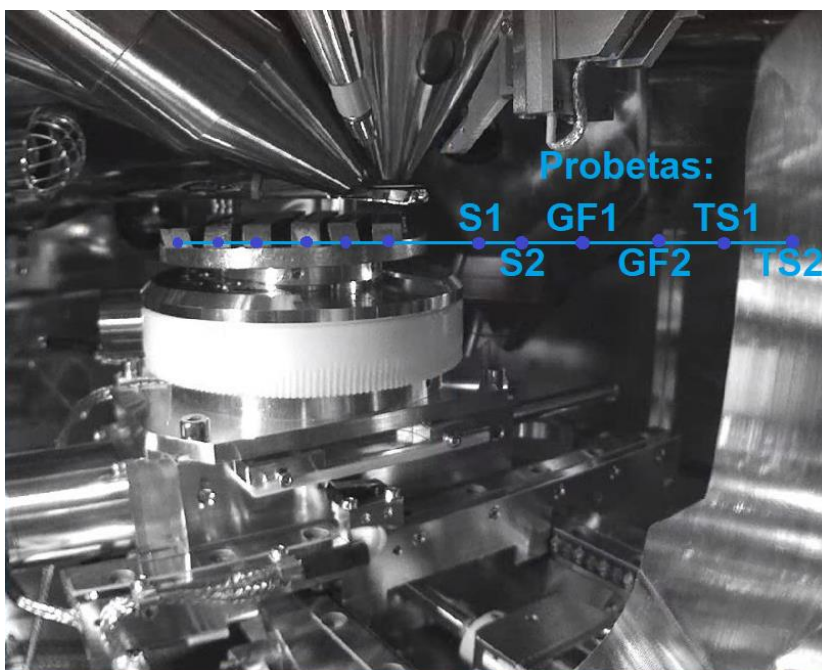


Figura 3-8. Montaje de las probetas en el SEM.

En esta sección se presenta los análisis realizados a las diferentes zonas; metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y metal de soldadura (MS) de las probetas S1, GF1 y TS2 por microscopía electrónica de barrido (SEM).

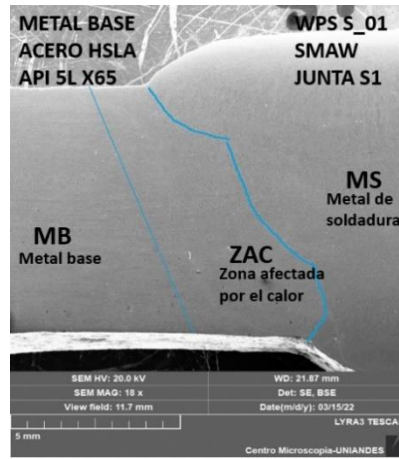
Se emplean electrones secundarios (SE) para morfología del material, y electrones retrodispersados (BSE) para el porcentaje en peso relativo de los elementos presentes en cada zona.

Las probetas analizadas S1, GF1 y TS2 fueron soldadas con el WPS S\_01, GF\_01 y TS\_01 respectivamente.

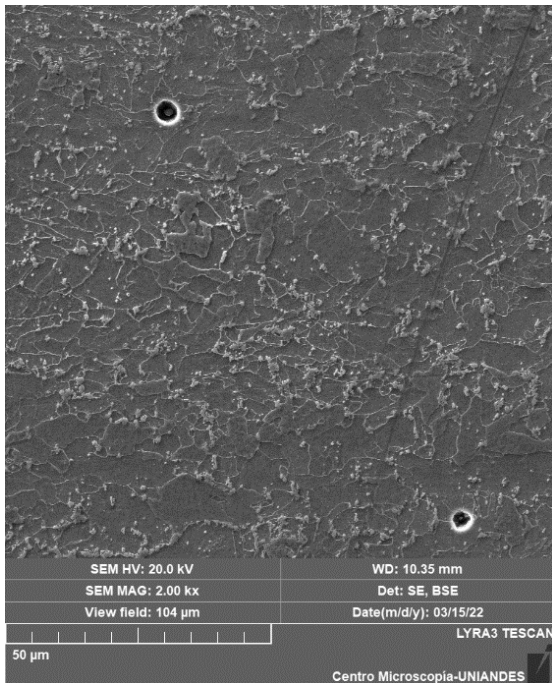
En la figura 3-8 se observa el montaje de las probetas S1, S2, GF1, GF2, TS1, TS2, en el microscopio electrónico de barrido empleado, marca LYRA TESCAN, del Centro de microscopia MicroCore de la Universidad de los Andes.

Microscopía por SEM del metal base, acero HSLA API5LX65:

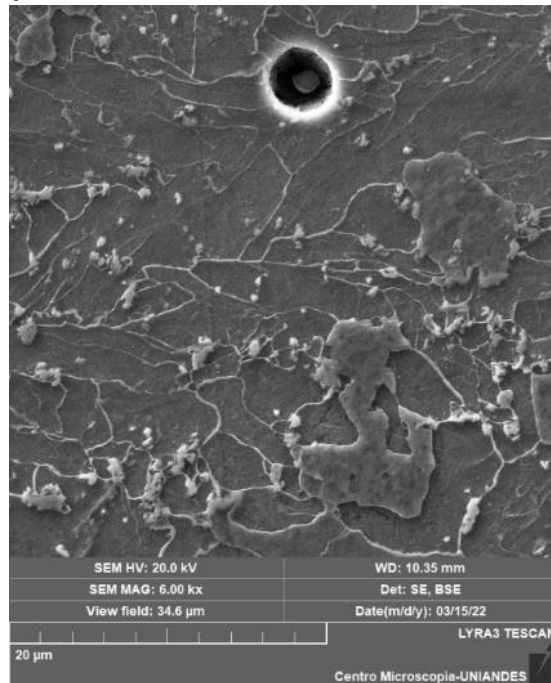
Imágenes de microscopía por SEM a diferentes aumentos en el metal base (MB), acero HSLA API 5LX65, común para todas las juntas soldadas, se muestran en la figura 3-9. Imágenes tomadas en la probeta S1.



Zonas de la junta. 18X



2000X



6000X

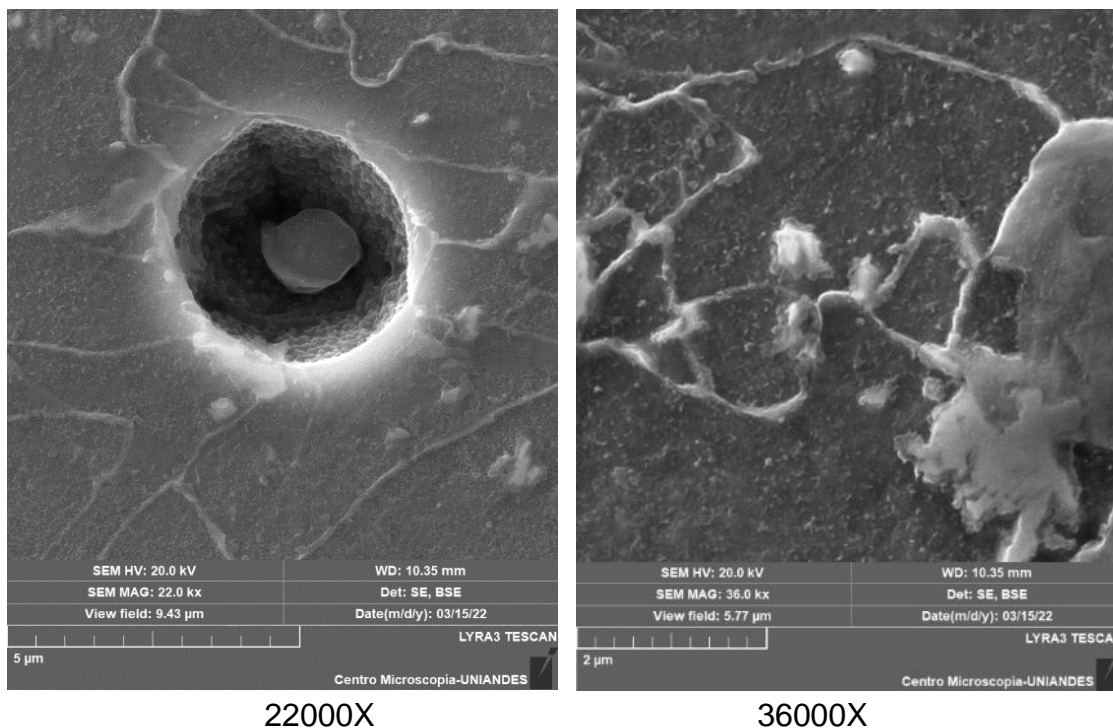


Figura 3-9. Microscopia por SEM del MB, acero HSLA API 5LX65. Junta S1.

En la matriz del material base se observan granos de fase ferrita con presencia de inclusiones. El material y las inclusiones son analizadas por medio de electrones retrodispersados con el microscopio electrónico de barrido (SEM) como se muestra en la figura 3-10. El espectro 14 muestra la presencia de alto oxígeno y bajo hierro que podría deberse a productos de corrosión.

Los espectros 12, 13 y 15 tomados en zonas donde las superficies se observan diferentes, tienen los mismos elementos; C, Fe, Mn, con % de peso similar en cada espectro. Esto indica que se trata de la misma fase. Se observa que el material es un acero con composición nominal C-Mn. El silicio es un componente aleante aceptado por norma en el material API5LX65, ver Tabla 3-1 de la sección 3.1.

En la figura 3-10 se presentan espectros semicuantitativos, por BSE, de la composición de elementos en varias zonas del metal base (MB), acero API 5LX65, tomados en la probeta S1. Porcentaje en peso.

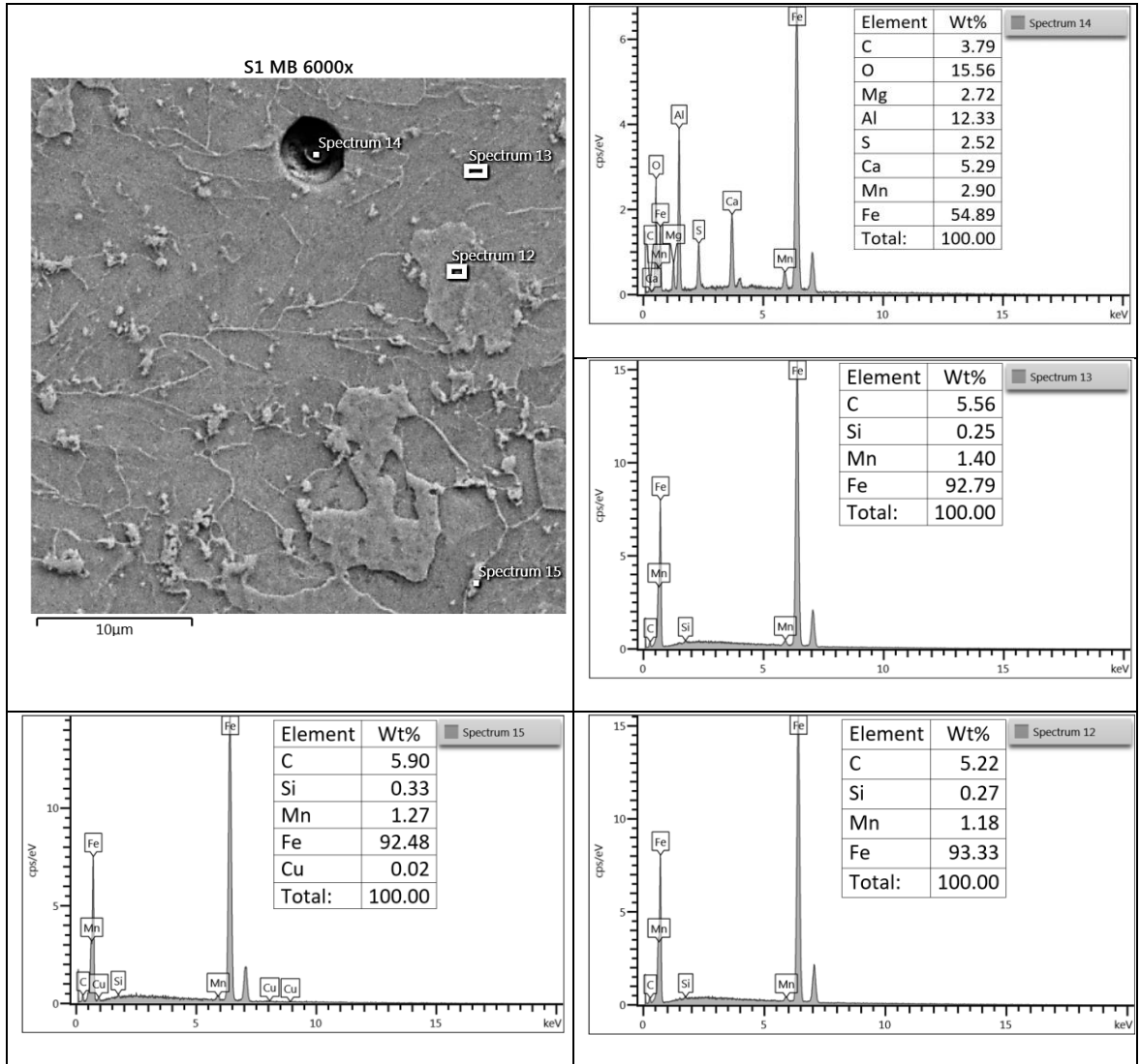
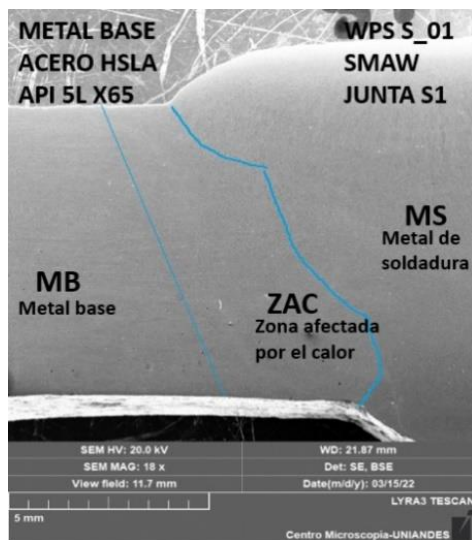


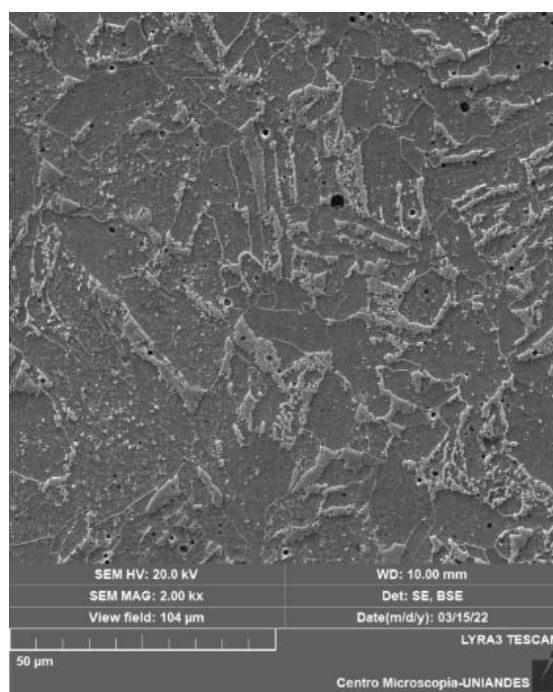
Figura 3-10. Espectro por BSE de elementos en el MB, acero API 5LX65.

Microscopía por SEM de la junta soldada S1 (proceso SMAW):

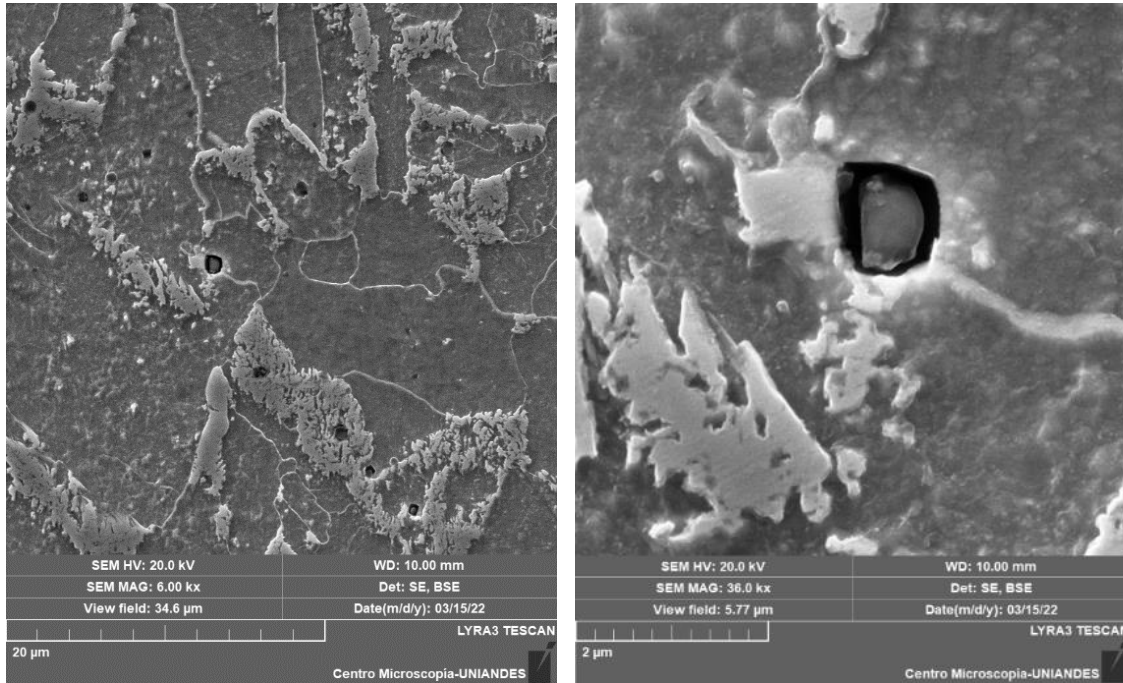
En las figuras 3-11 y 3-13 se muestran las imágenes de microscopía por SEM a diferentes aumentos, tomadas en el MS y en la ZAC de la junta soldada S1. Para esta misma junta, en las figuras 3-12, 3-14, 3-15 se observan los espectros de composición de elementos por BSE del MS y de la ZAC. Porcentaje en peso.



Zonas de la junta.18X



2000x



6000x

36000x

Figura 3-11. Microscopia por SEM en el centro del MS, junta S1.

En el material de soldadura de la probeta soldada S1 se observan granos de fase ferrita con presencia de inclusiones no asociadas al material de aporte ya que el análisis de elementos por BSE, ver figura 3-12 espectro 3, muestra la presencia de picos de azufre, manganeso y presencia de oxígeno. Elementos con % en peso mayores a los reportados en los certificados de calidad del material de aporte empleado; E8010-G.

Los espectros 1 y 2, de la figura 3-12, muestran la presencia de manganeso y níquel, elementos aleantes aceptados para la fabricación del material de aporte.



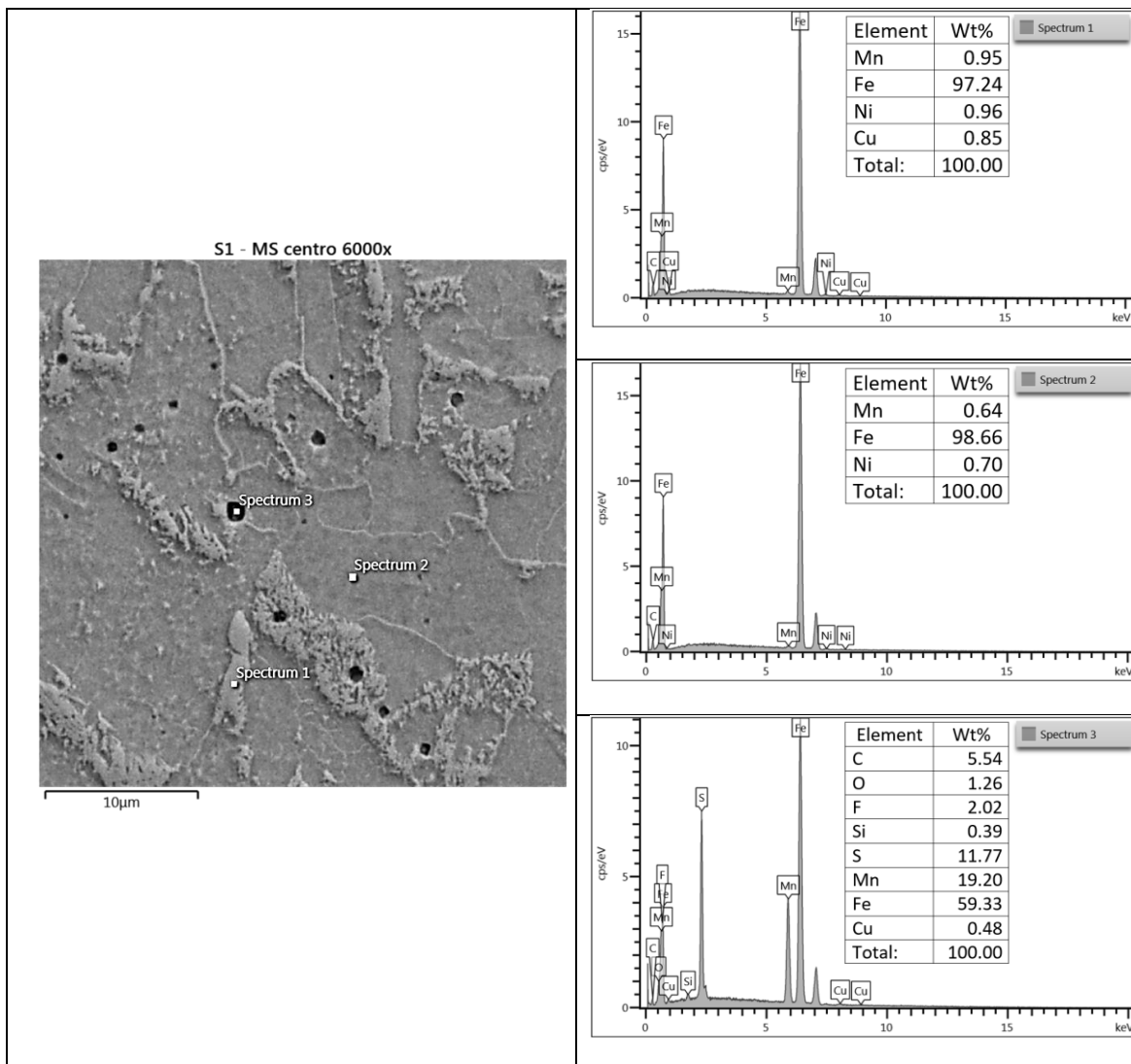
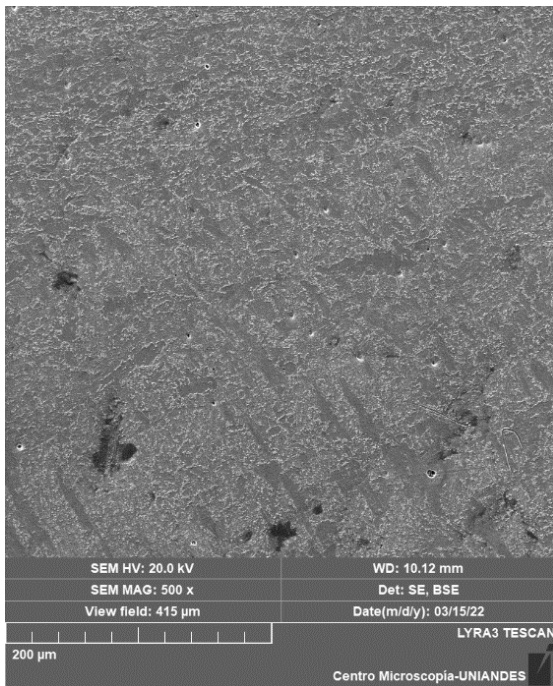
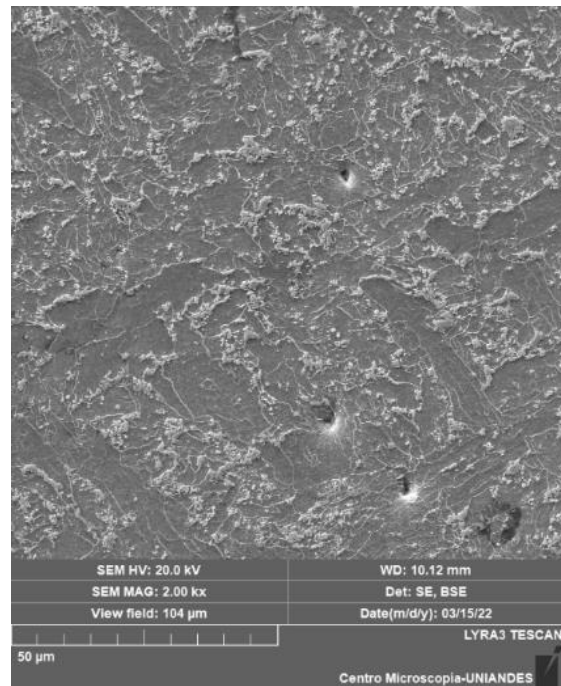


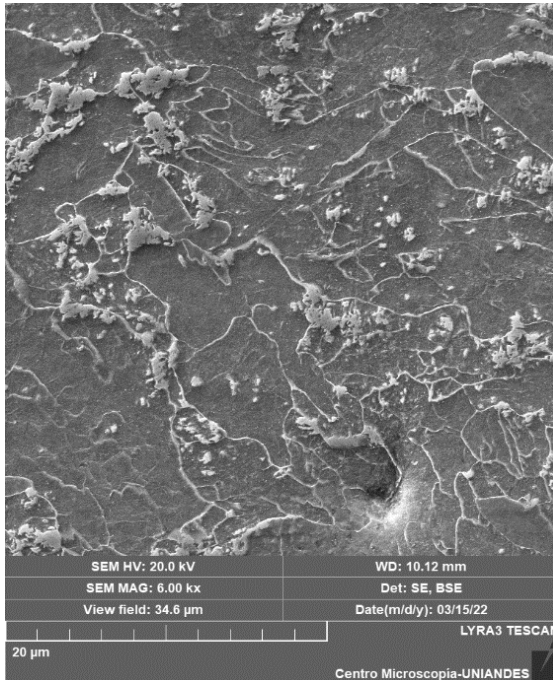
Figura 3-12. Espectro por BSE de elementos en el MS, probeta S1.



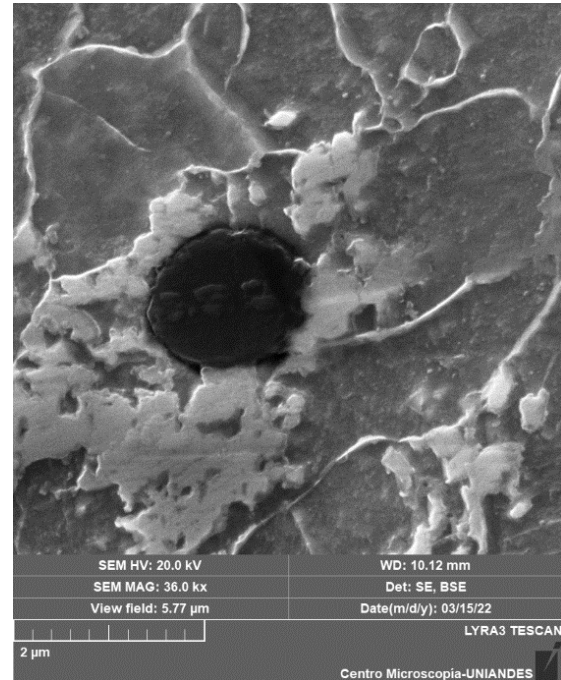
500x



2000x



6000x



36000x

Figura 3-13. Microscopia por SEM de la ZAC, junta S1.

En la ZAC de la junta S1, de fase ferrítica, se observa poca presencia de inclusiones, ver figura 3-13. La composición de elementos en esta zona se presenta en los espectros de las figuras 3-14 y 3-15, en la cual los elementos manganeso y silicio están presentes en cada punto de muestra, elementos aleantes principales del acero API 5LX65.

El espectro 8 muestra el análisis de composición de la inclusión, con picos de azufre, de calcio y presencia de oxígeno, elementos no asociados a la composición química del material base ni del material de aporte. Al ser una inclusión ubicada en la ZAC se considera que fue integrada al material en el proceso de fabricación.

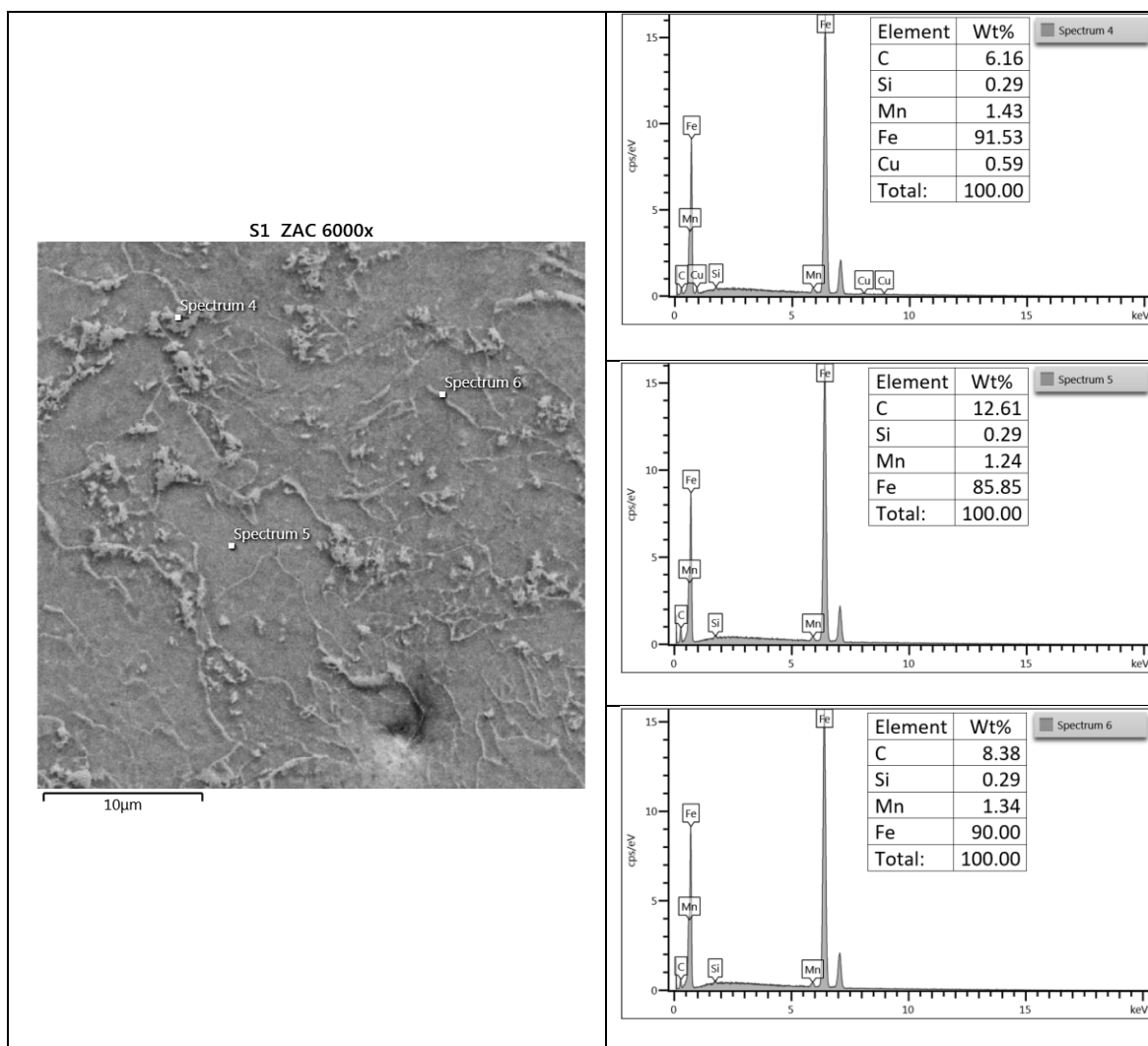


Figura 3-14. Espectro por BSE de elementos en la ZAC. Probeta S1.

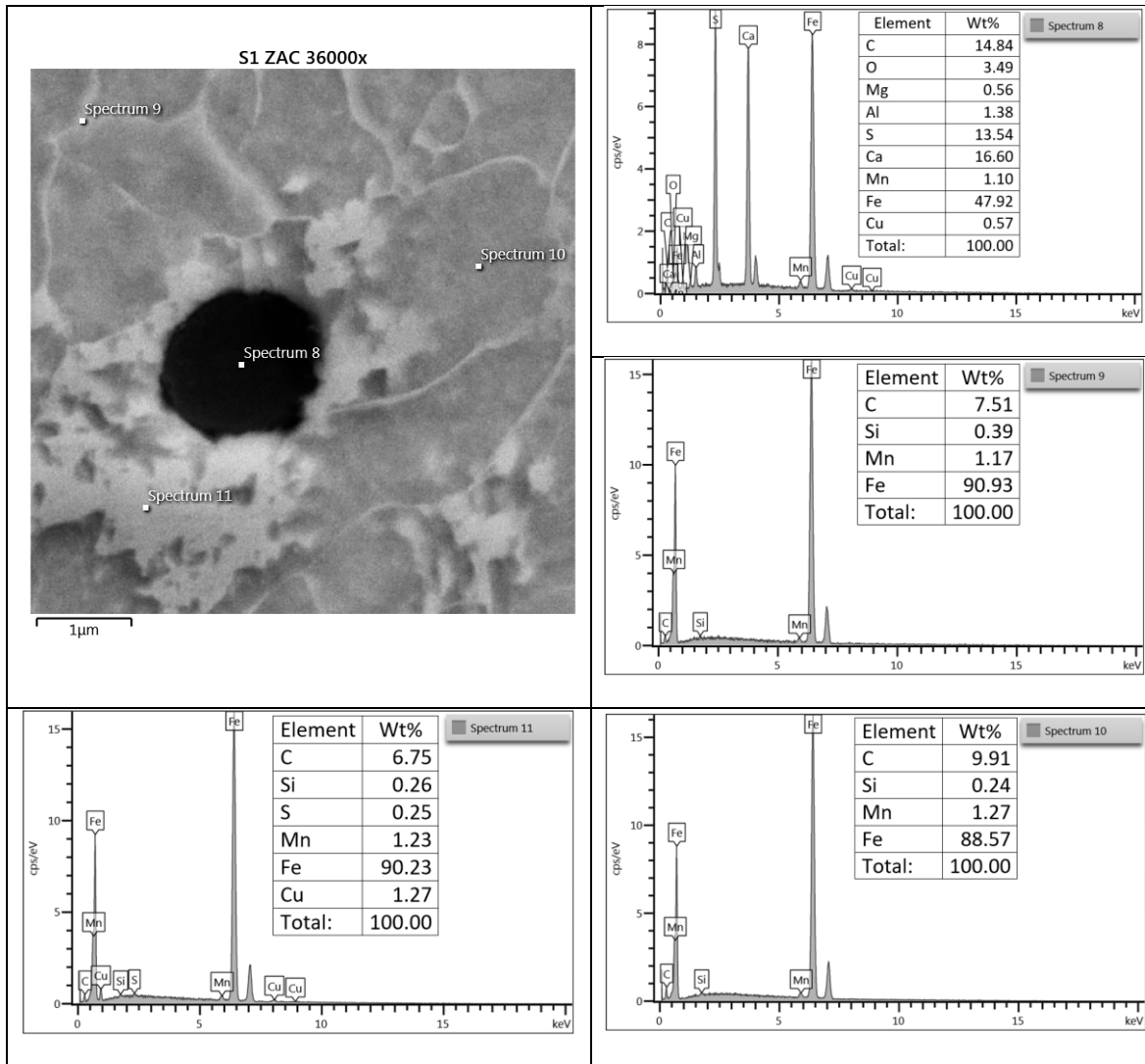


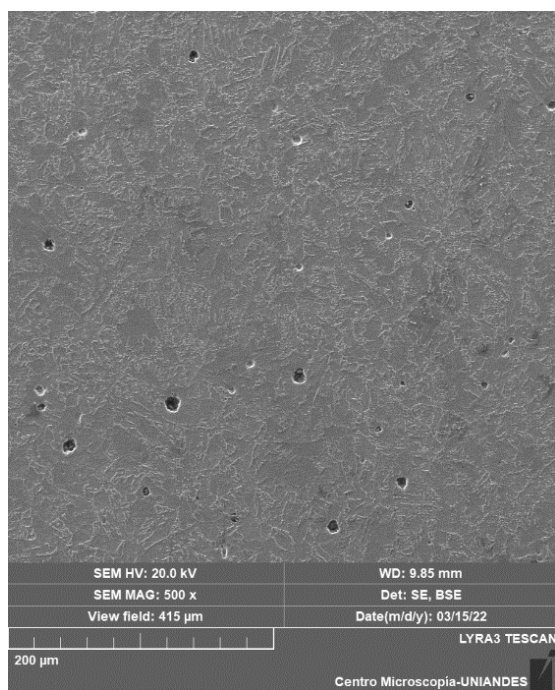
Figura 3-15. Espectro por BSE de elementos en la ZAC cercano a una inclusión. Probeta S1.

### Microscopía por SEM de la junta soldada GF1 (procesos GMAW+FCAW):

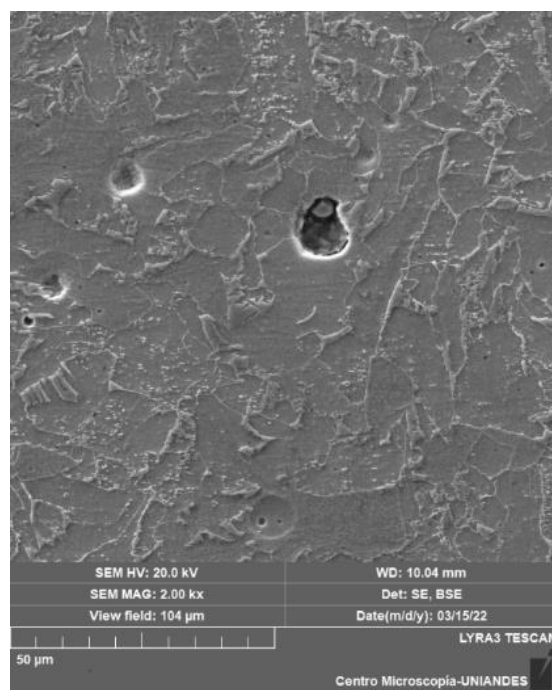
En las figuras 3-16, 3-18 y 3-20 se muestran las imágenes de microscopía por SEM a diferentes aumentos, tomadas en; el MS, cordón superior e inferior, y en la ZAC de la junta soldada GF1. Para esta misma junta, en las figuras 3-17, 3-19, 3-21 se observan los espectros de composición de elementos por BSE del MS y de la ZAC. Porcentaje en peso.



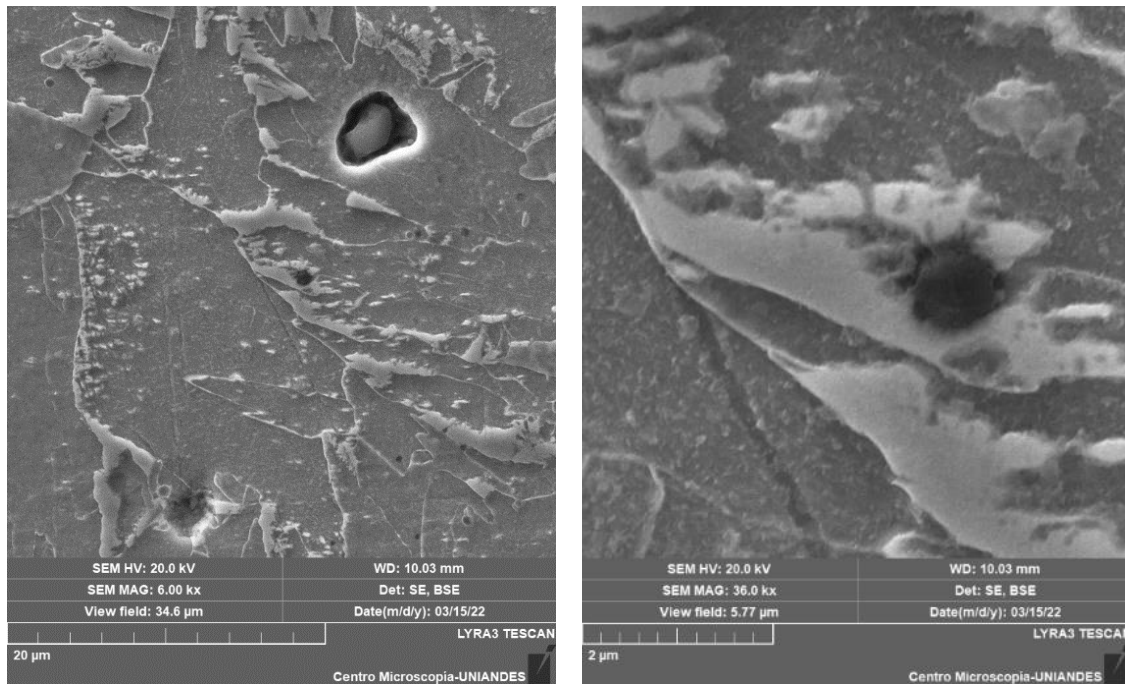
Zonas de la junta. 18X



500x



2000x



6000x (b)

36000x

Figura 3-16. Microscopia por SEM del MS, cordón inferior, junta GF1.

El cordón inferior de la junta GF1, soldado con GMAW, con matriz ferrítica, en los espectros 24 y 25 de la figura 3-17 se encuentra manganeso y silicio, elementos principales aleantes del metal de aporte ER70S-6. El espectro 22 para la inclusión no metálica presenta contenidos de oxígeno y aluminio, elementos no presentes en el electrodo empleado. El espectro 23 de otra inclusión analizada, tiene picos de oxígeno, silicio y manganeso, con presencia de aluminio. Oxígeno y aluminio no presentes en el electrodo. Inclusiones generadas durante la realización de la unión soldada.

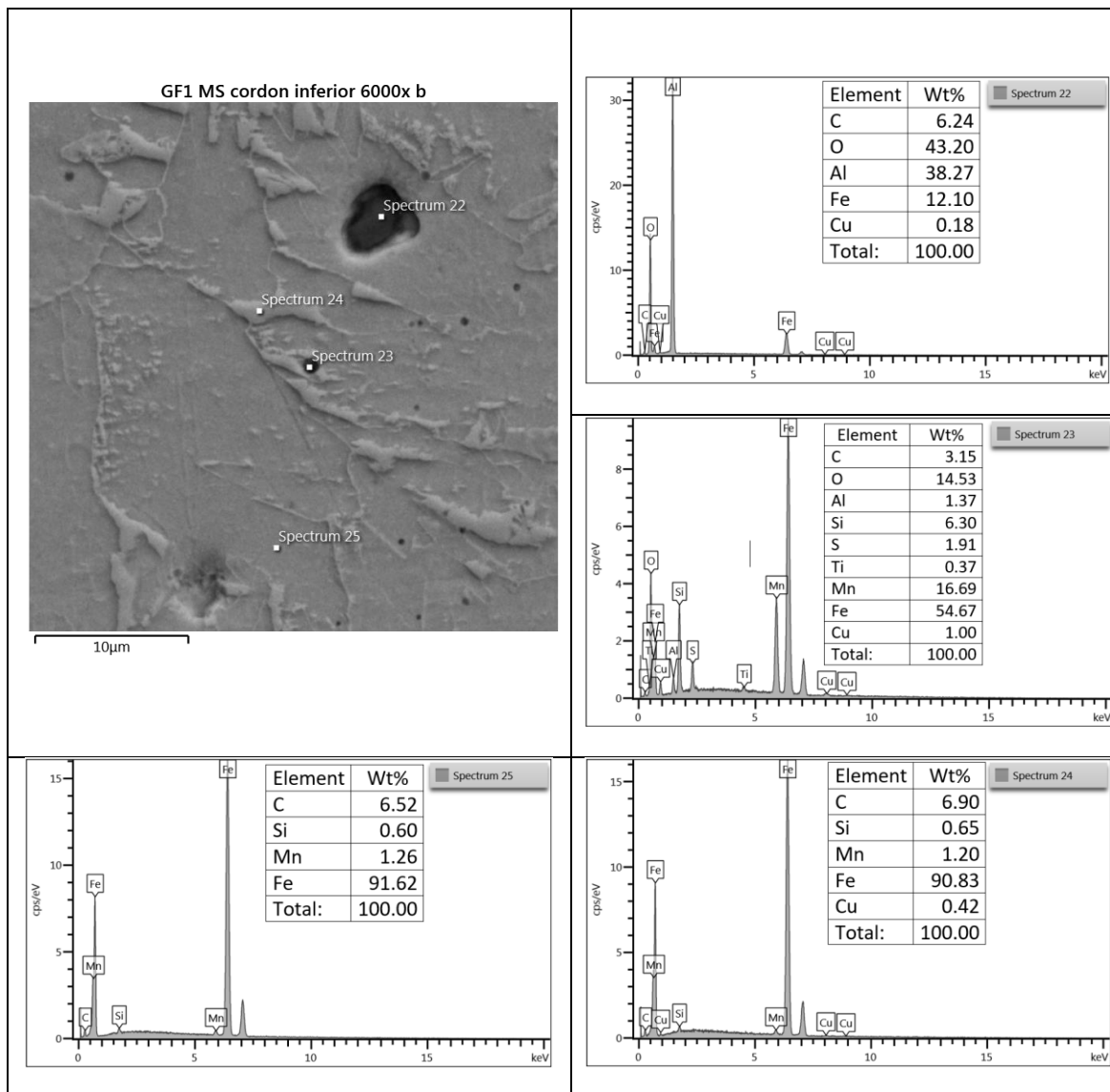
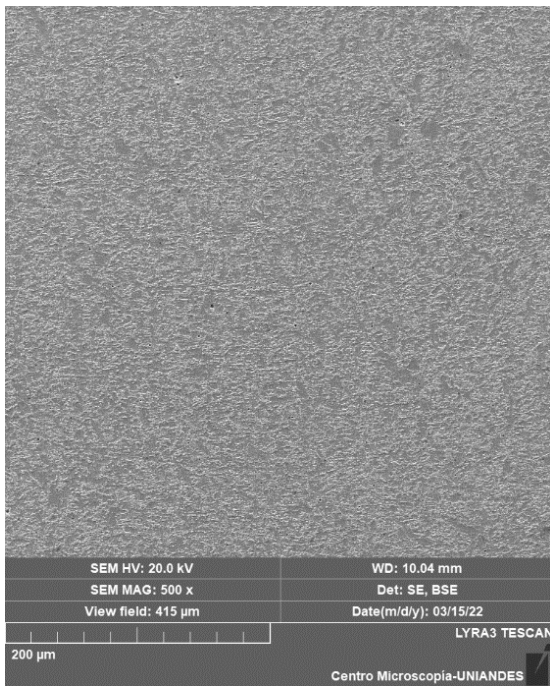
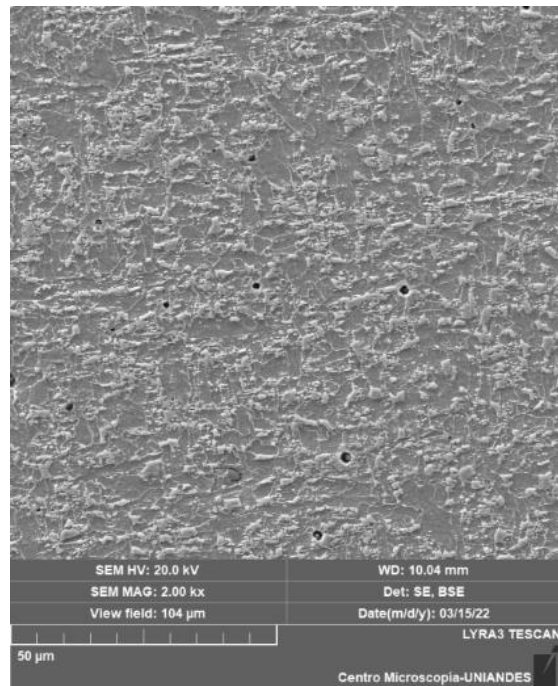


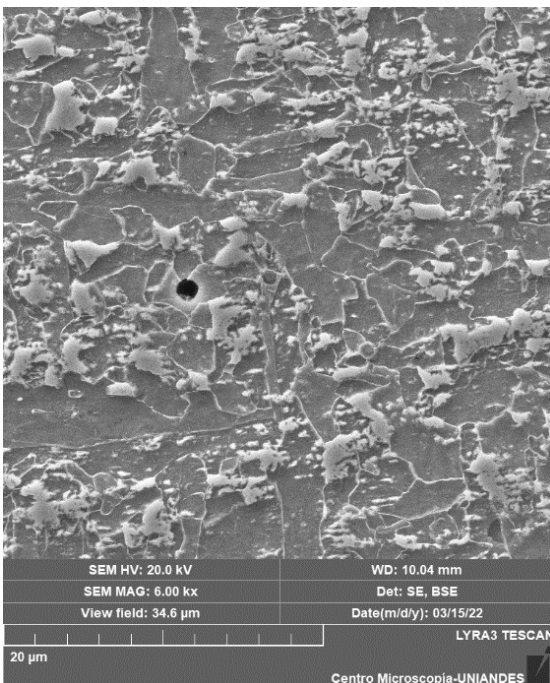
Figura 3-17. Espectro por BSE de elementos en el MS, cordón inferior. Probeta GF1.



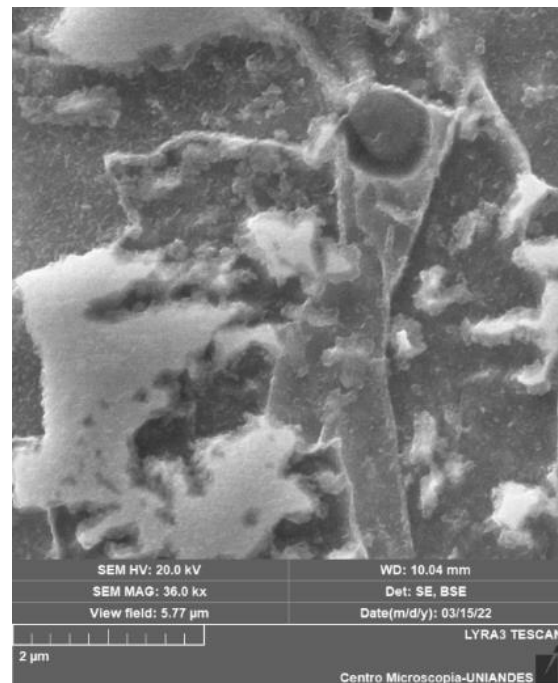
500x



2000x



6000x

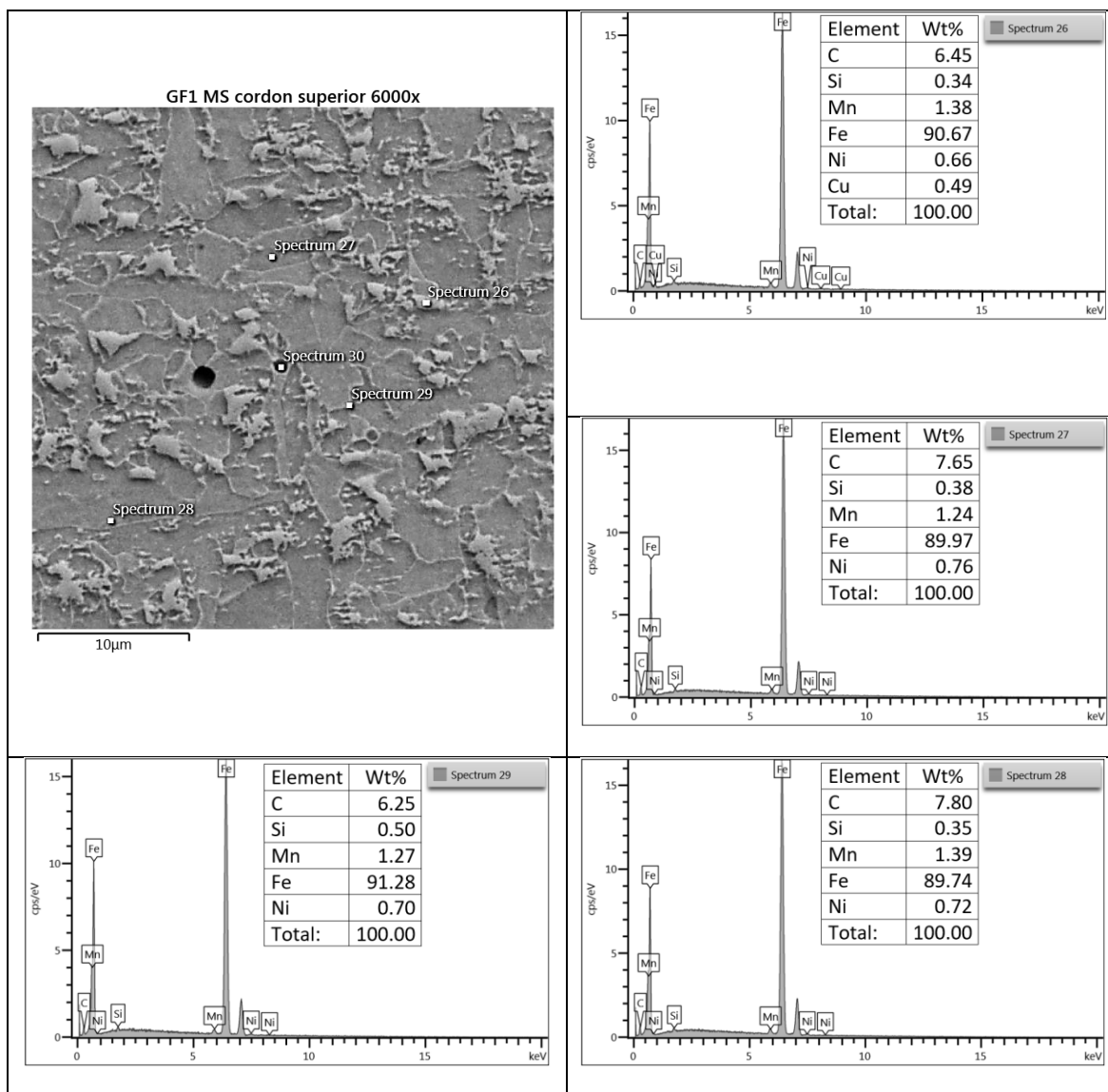


36000x

Figura 3-18. Microscopia por SEM del MS, cordón superior, junta GF1.



El cordón superior de la junta GF1, soldado con FCAW, presenta matriz ferrítica como se observa en la figura 3-18. En los espectros 27, 28 y 29 ubicados en los granos del material y al borde de este, presentan similitud en la composición elemental con contenidos de níquel, manganeso y silicio, elementos aleantes principales presentes en el electrodo empleado E81T1. El espectro 26 difiere de los demás con la presencia de cobre, elemento no presente en el electrodo. El espectro 30 de la inclusión muestra picos de oxígeno, titanio y manganeso, los dos primeros no presentes en la composición química del electrodo empleado.



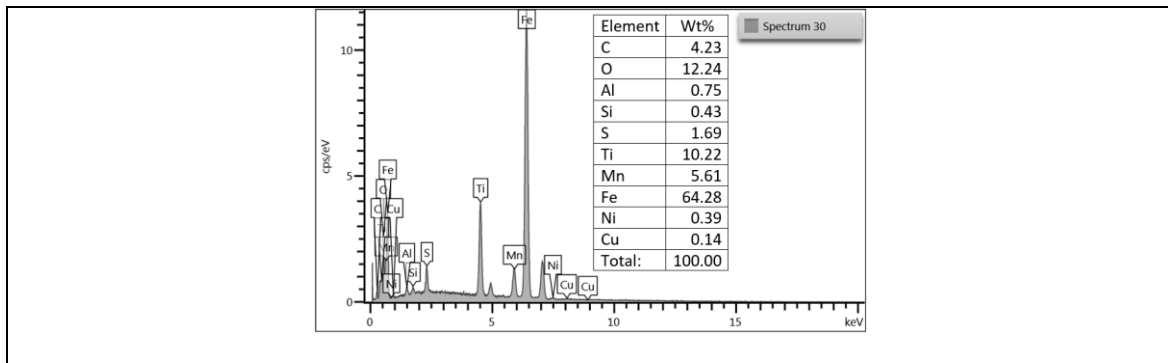
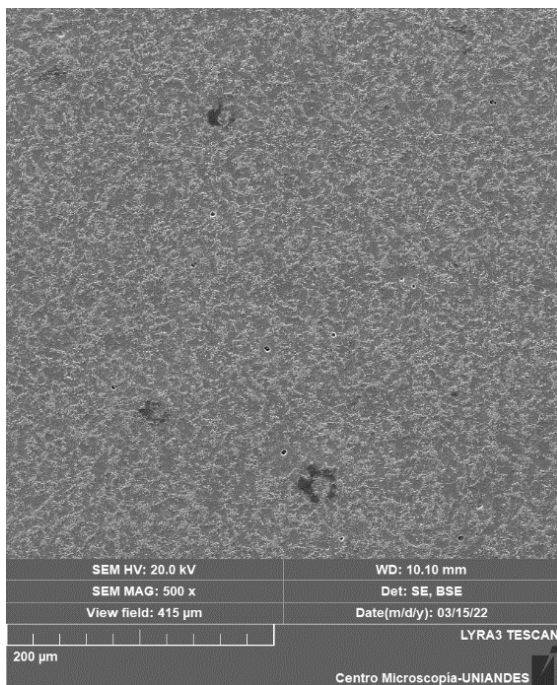
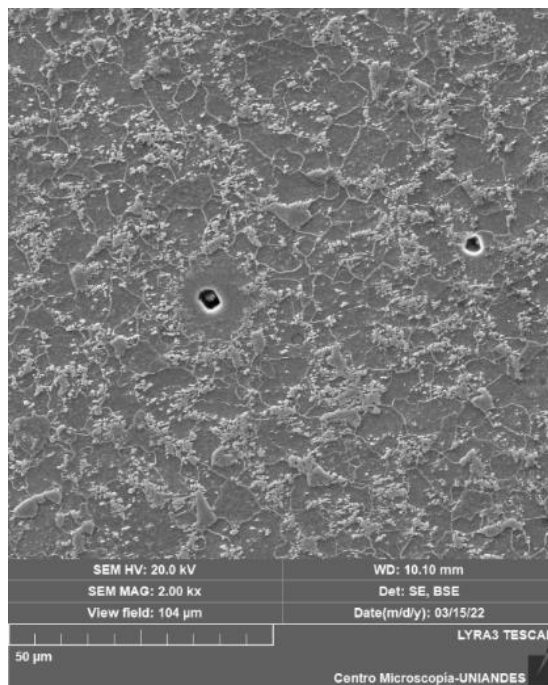


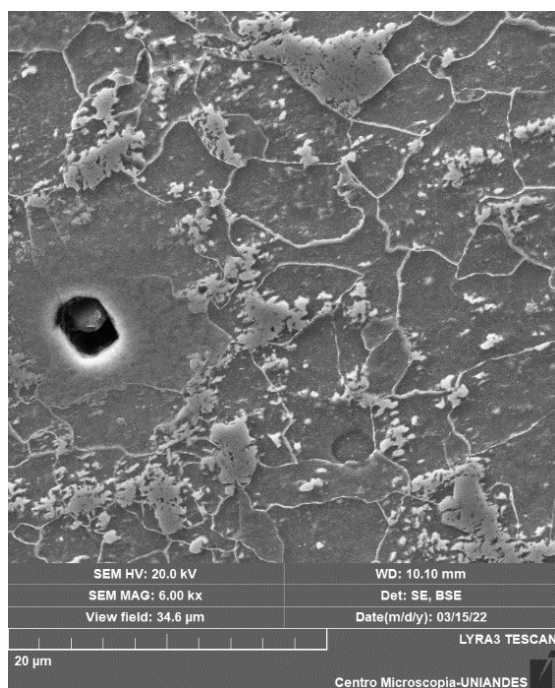
Figura 3-19. Espectro por BSE de elementos en el MS, cordón superior. Probeta GF1.



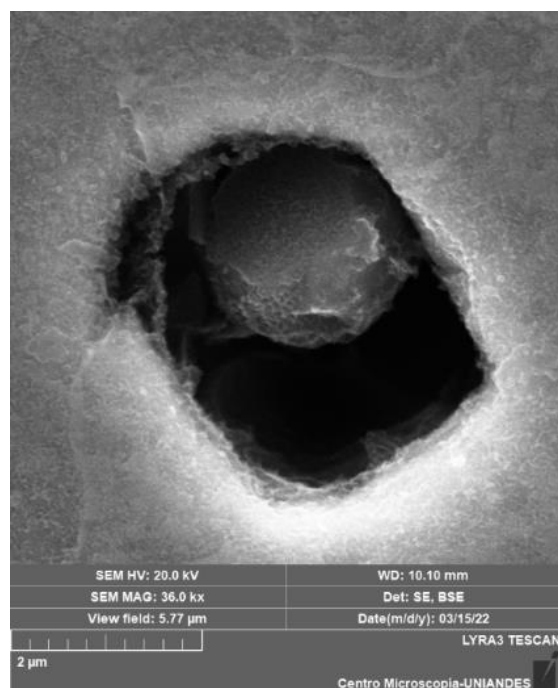
500x



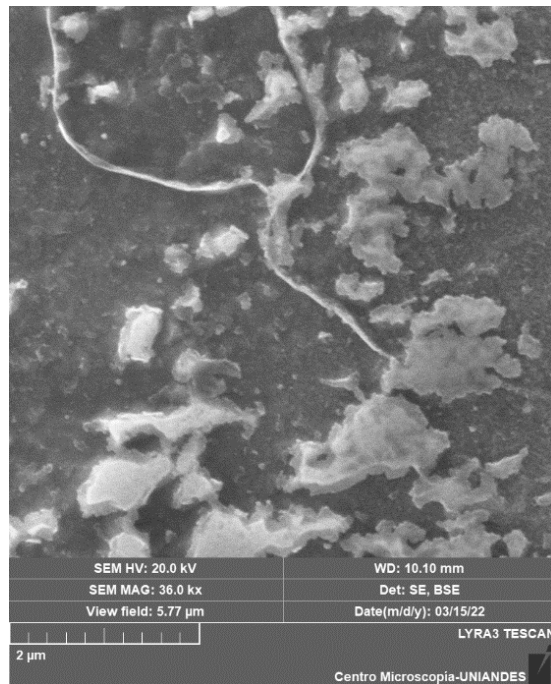
2000x



6000x



36000x

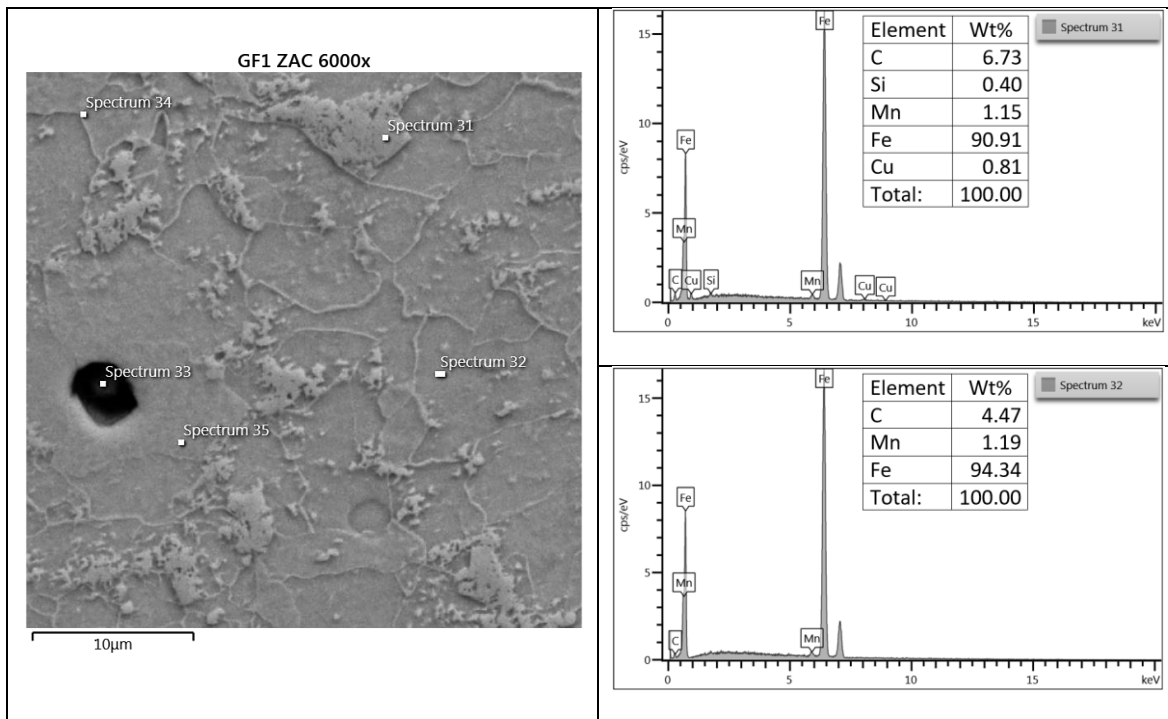


36000x (b)

Figura 3-20. Microscopia por SEM de la ZAC, junta GF1.

En la ZAC de la junta GF1, de fase ferrítica tiene poca presencia de inclusiones, ver figura 3-20. La composición de elementos en esta zona se presenta en los espectros de la figura 3-21, en la cual los elementos manganeso y silicio están presentes en los espectros 31, 34, 35. Elementos aleantes principales del acero API 5LX65. El espectro 31 adicionalmente presenta cobre, el tercer elemento aleante de este acero.

El espectro 33 muestra los elementos presentes en la inclusión, con picos de calcio y oxígeno, elementos no asociados a la composición química del material base ni del material de aporte. La inclusión también tiene un pico de aluminio de mayor valor que el presente en la composición química del material. Al ser una inclusión ubicada en la ZAC se considera que fue integrada al acero en el proceso de fabricación o en el proceso de preparación de la probeta.



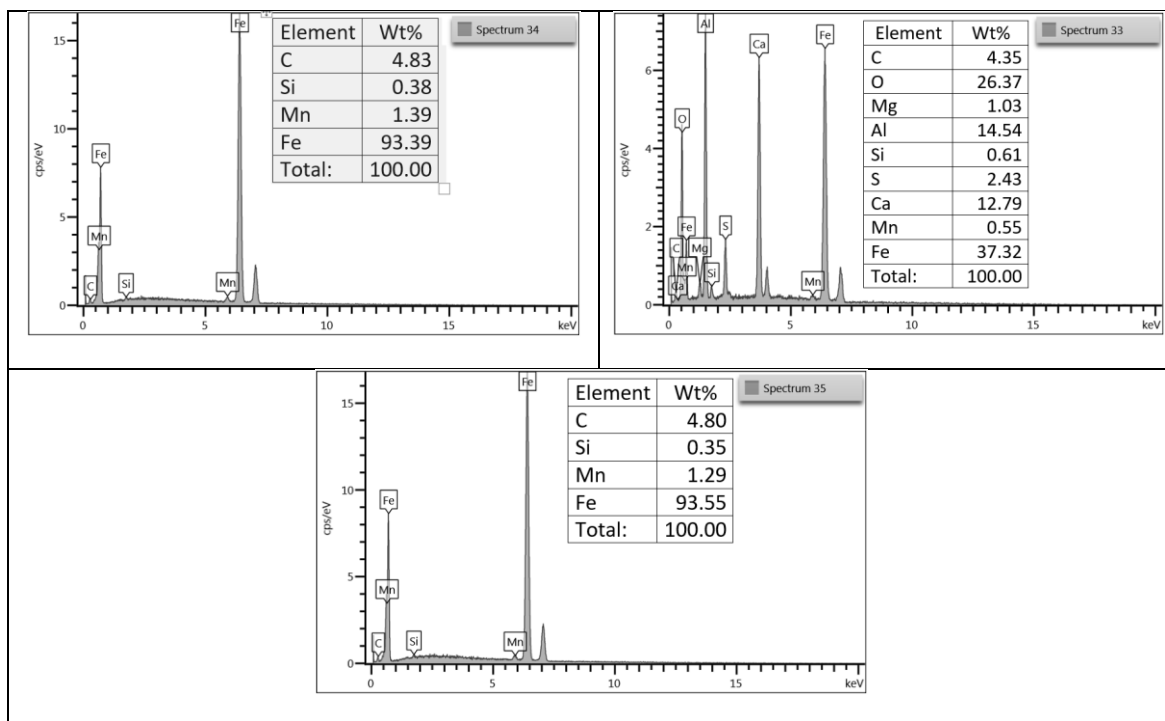
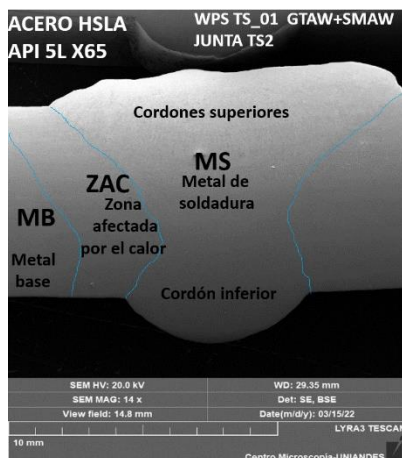


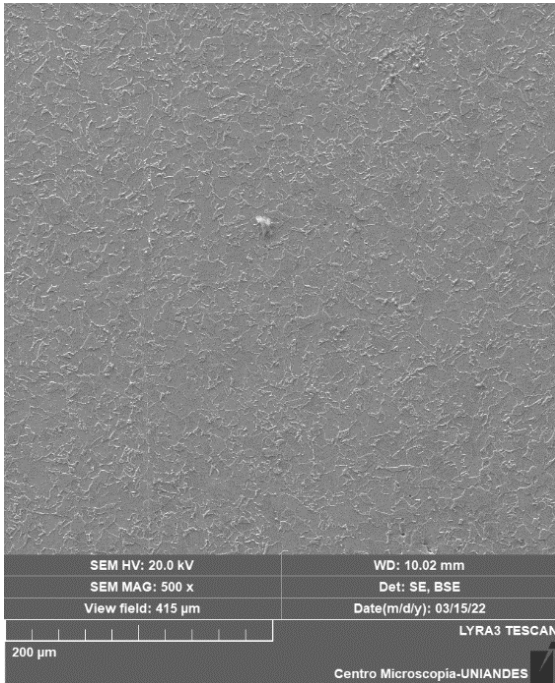
Figura 3-21. Espectro por BSE de elementos en la ZAC. Probeta GF1.

### Microscopía por SEM de la junta soldada TS2 (procesos GTAW+SMAW):

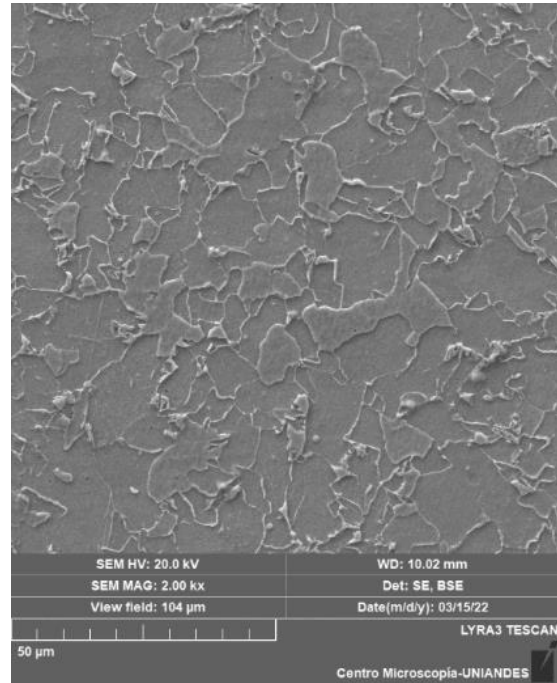
En las figuras 3-22, 3-24 y 3-26 se muestran las imágenes de microscopía por SEM a diferentes aumentos, tomadas en; el MS, cordón superior e inferior, y en la ZAC de la junta soldada TS2. Para esta misma junta, en las figuras 3-23, 3-25, 3-27 y 3-28 se observan los espectros de composición de elementos por BSE del MS y de la ZAC. Porcentaje en peso.



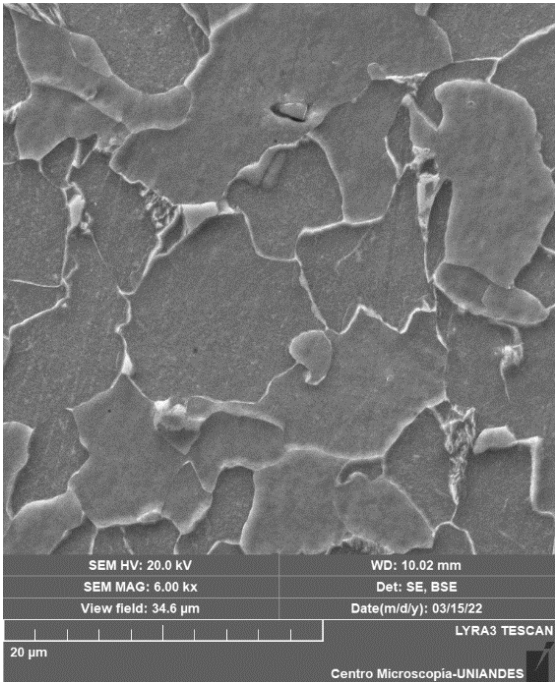
Zonas de la junta. 14X



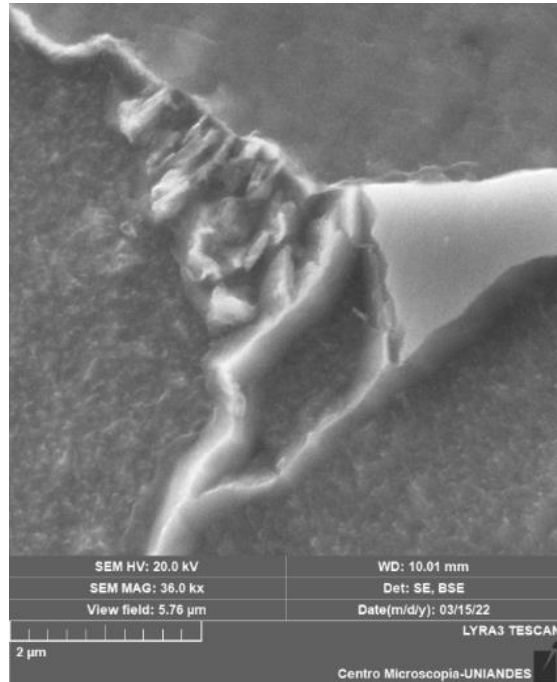
500x



2000x



6000x



36000x

Figura 3-22. Microscopia por SEM del MS, cordón inferior, junta TS2.

El cordón inferior de la junta TS2, soldado con GTAW, con matriz ferrítica como se observa en la figura 3-22, tiene níquel, manganeso y silicio como se observa en los espectros 36, 37 y 39 de la figura 3-23. Estos elementos son los presentes en la composición química del metal de aporte empleado ER80S-Ni1. El espectro 38 de la inclusión presenta valores altos de silicio y carbono, elementos presentes en el electrodo empleado pero con valores mucho menores.

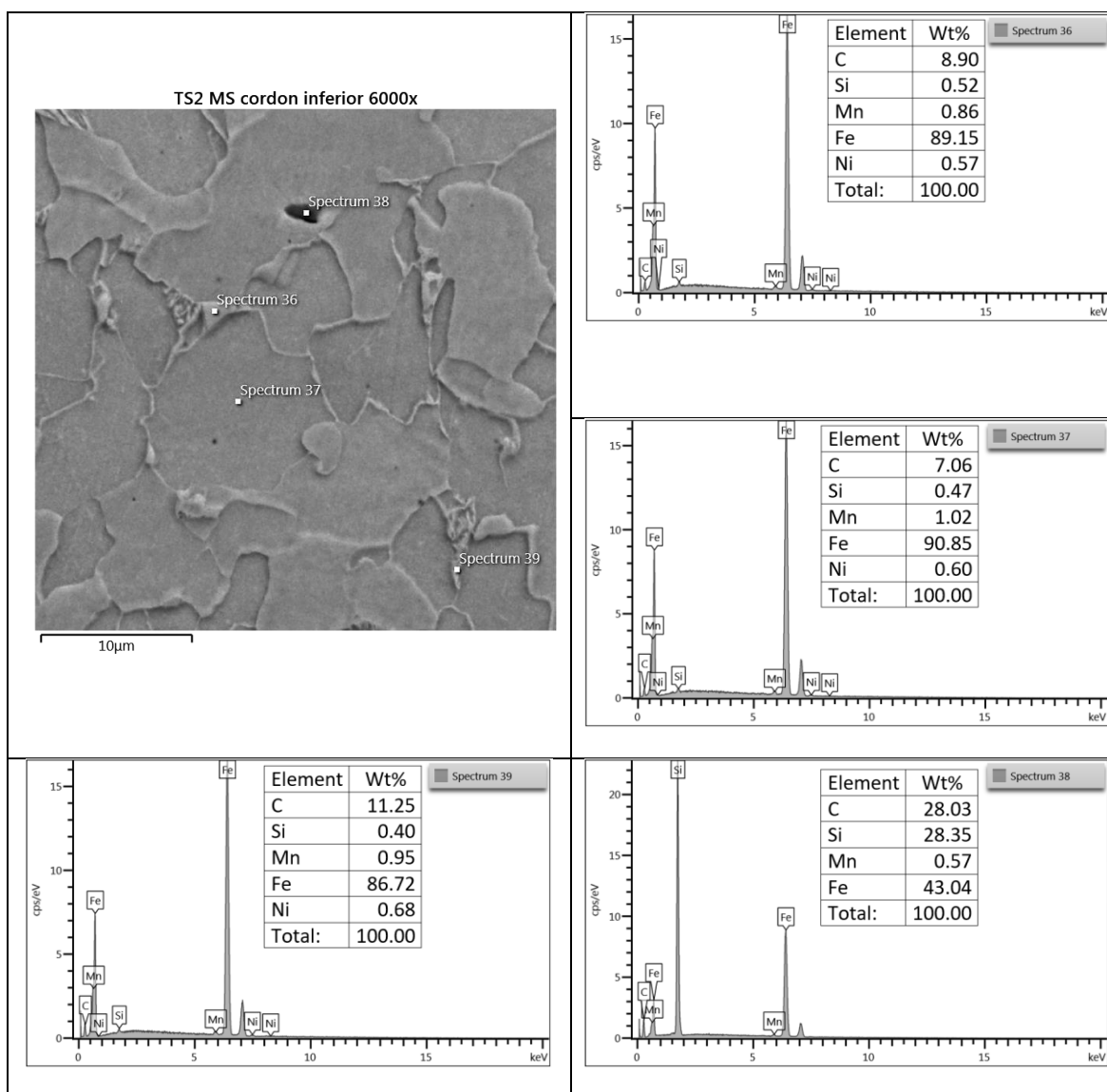
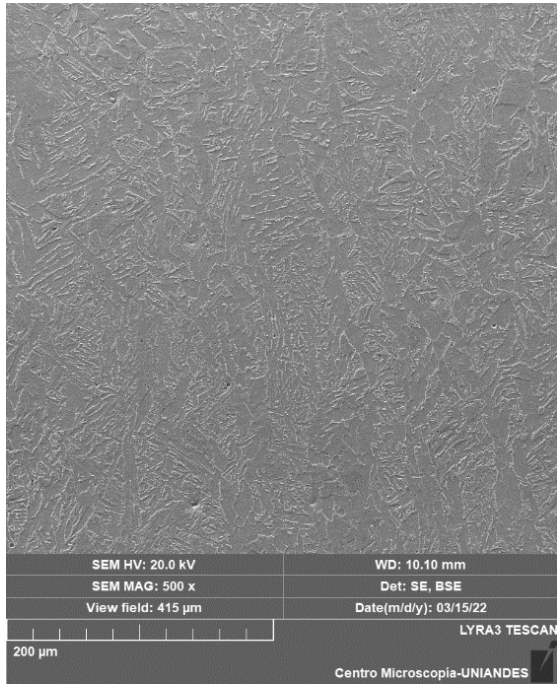
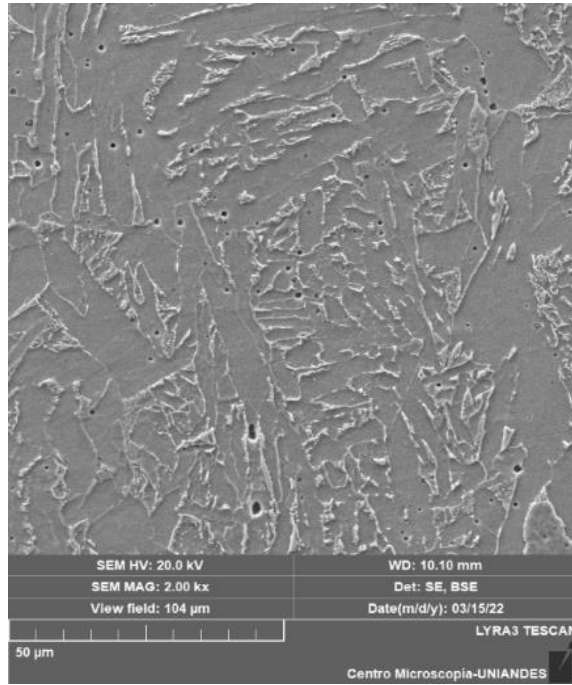


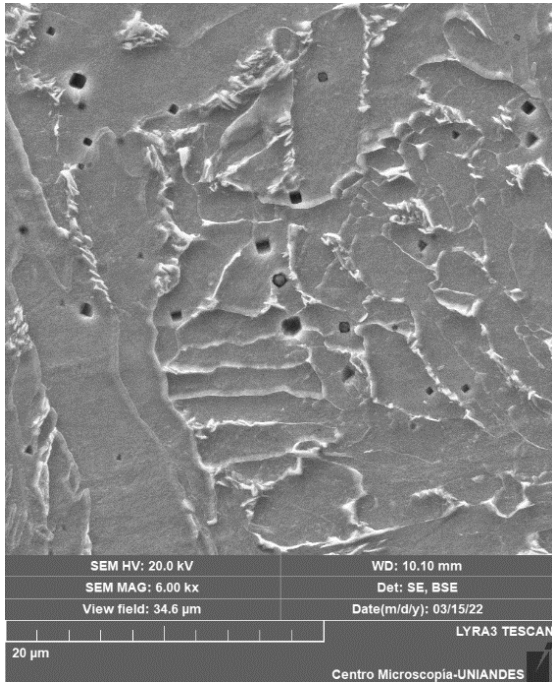
Figura 3-23. Espectro por BSE de elementos en el MS, cordón inferior. Probeta TS2.



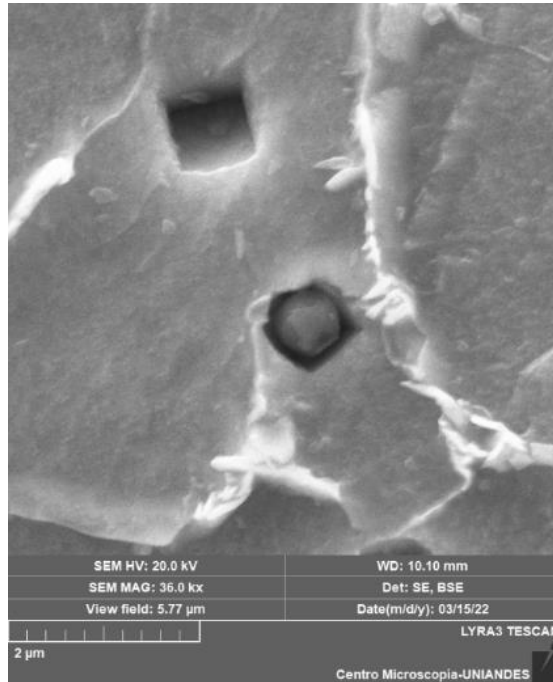
500x



2000x

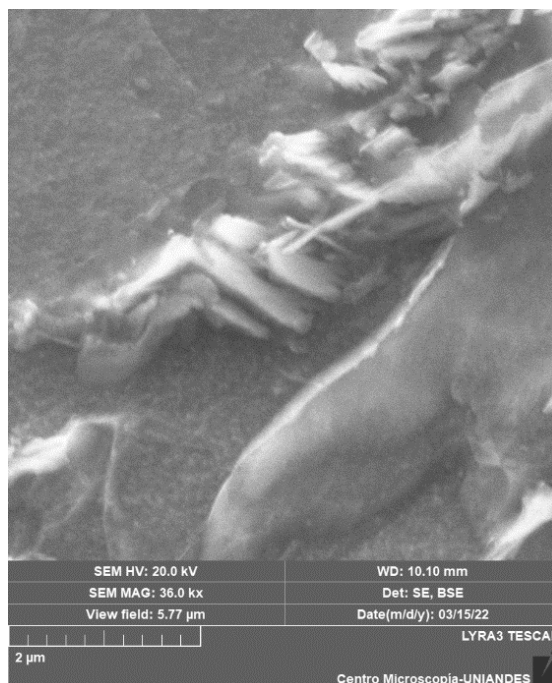


6000x



36000x

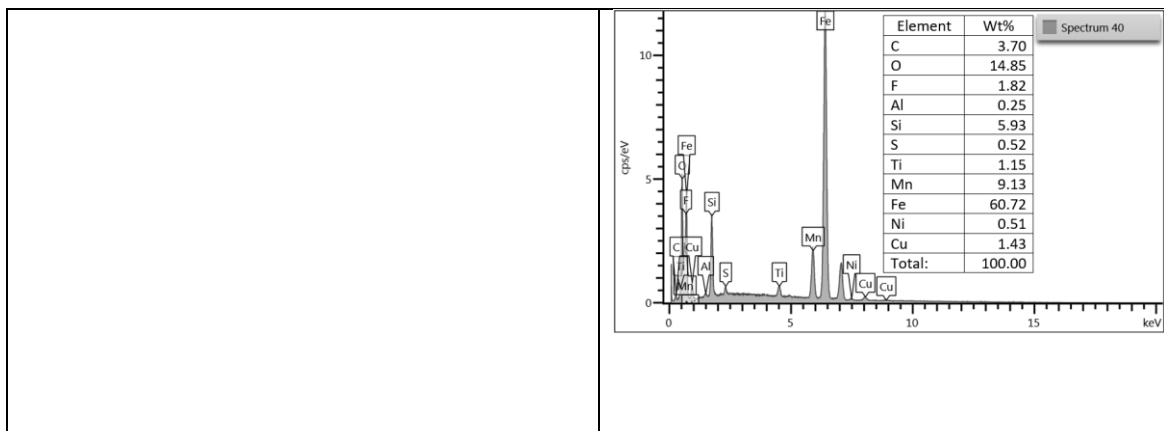




36000x (b)

Figura 3-24. Microscopia por SEM del MS, cordón superior, junta TS2.

El cordón superior de la junta TS2, soldado con SMAW, presenta matriz ferrítica como se observa en la figura 3-24, con mayor cantidad de inclusiones. El manganeso, principal elemento de aleación del electrodo E8010-G, está presente en todas las zonas del cordón superior. El níquel está presente en los espectros 41, 43 y 44 asociados a las zonas de alto relieve de las micrografías. La inclusión del espectro 40 presenta altos contenidos de oxígeno, silicio y manganeso.



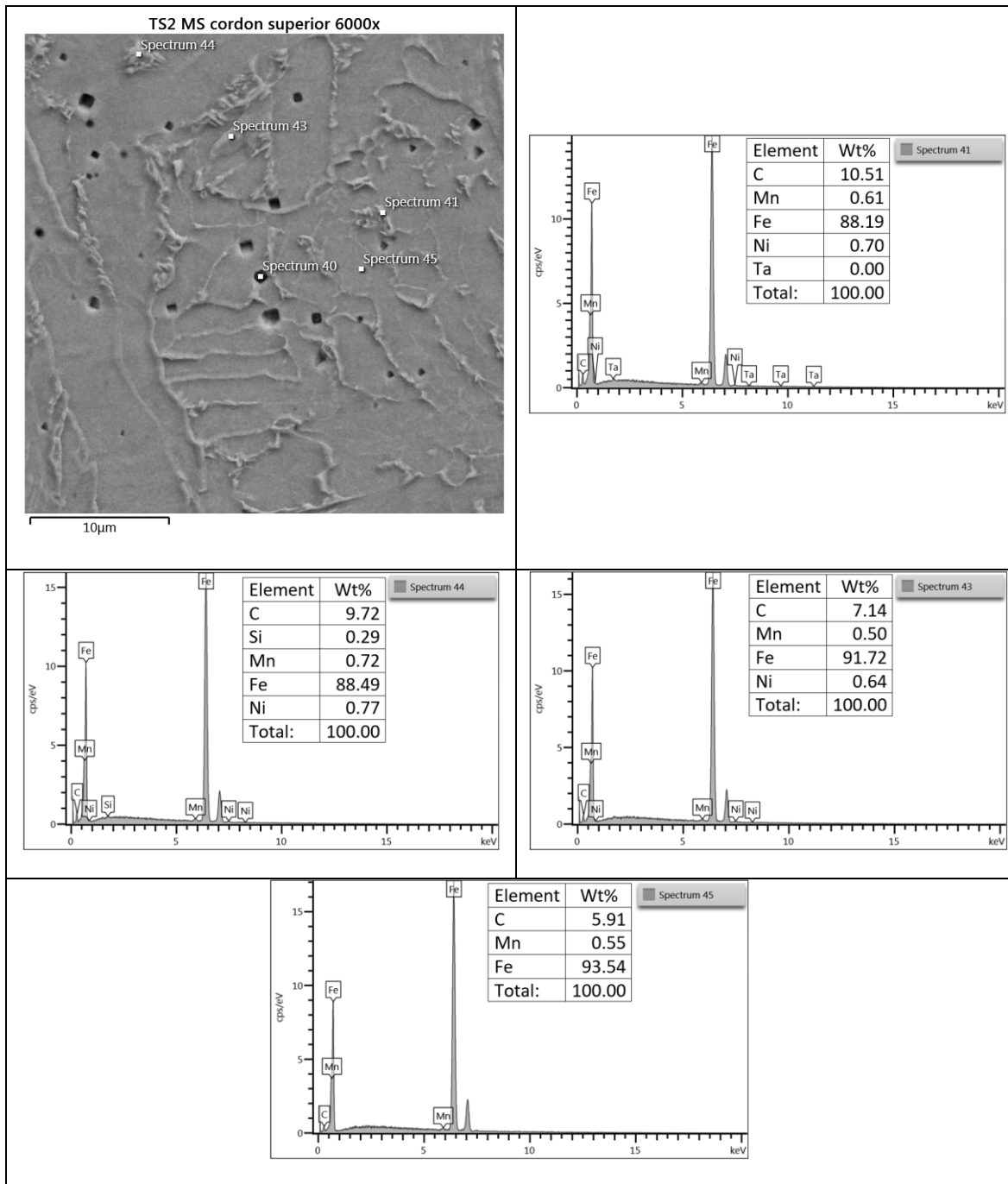
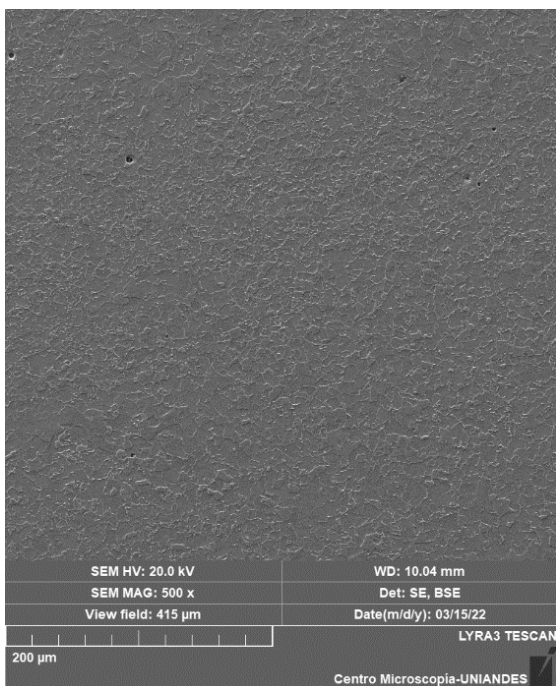
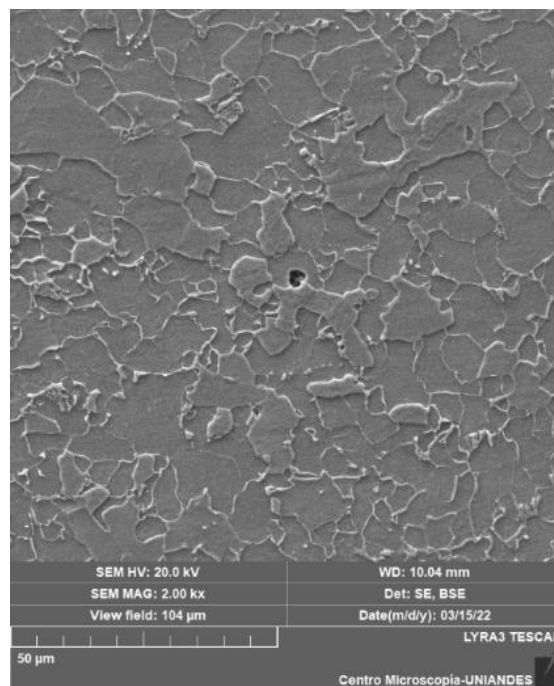


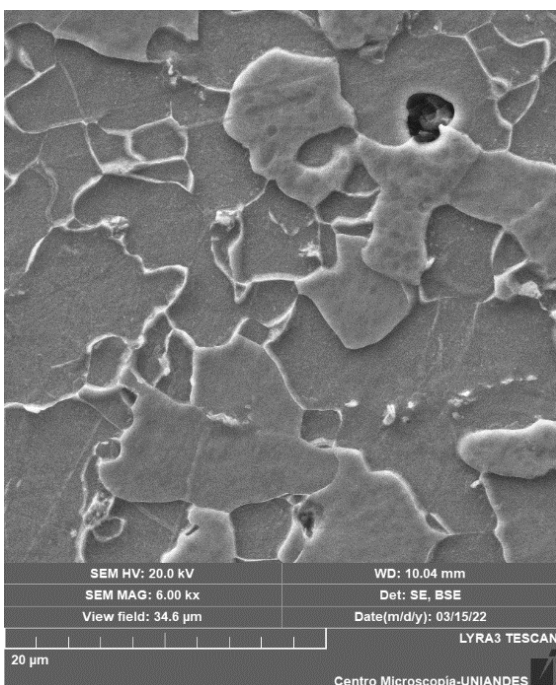
Figura 3-25. Espectro por BSE de elementos en el MS, cordón superior. Probeta TS2.



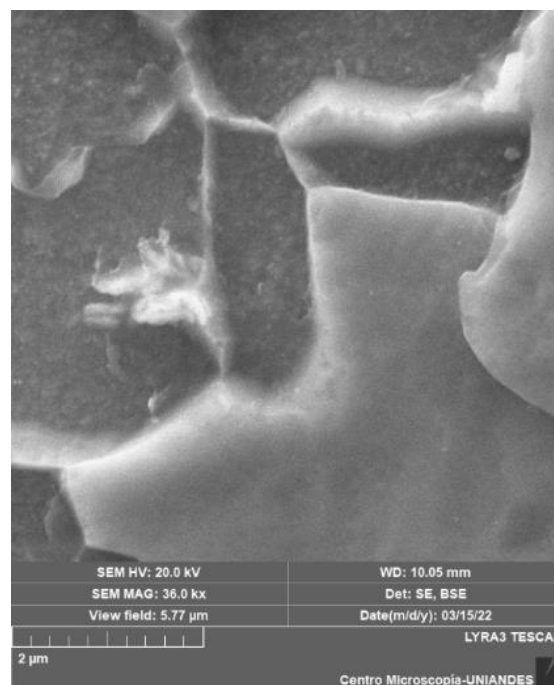
500x



2000x



6000x



36000x

Figura 3-26. Microscopia por SEM de la ZAC, junta TS2.

En la ZAC de la junta TS2, de fase ferrítica con poca presencia de inclusiones como se observa en la figura 3-26, tiene presencia de manganeso y silicio como elementos de

aleación principales y acorde a la composición química del acero API 5LX65, ver espectros 47, 48 y 50 de la figura 3-27.

El espectro 49 con alto contenido de oxígeno y carbono se puede considerar una inclusión metálica presente en esta zona.

El espectro 46 muestra los elementos presentes en la inclusión más grande, con picos de oxígeno y magnesio, elementos no presentes en la composición química del acero. En la inclusión se observa aluminio con valores muy altos respecto a la composición química del acero. Al ser una inclusión ubicada en la ZAC se considera que fue integrada al acero en el proceso de fabricación o en el proceso de preparación de la probeta.

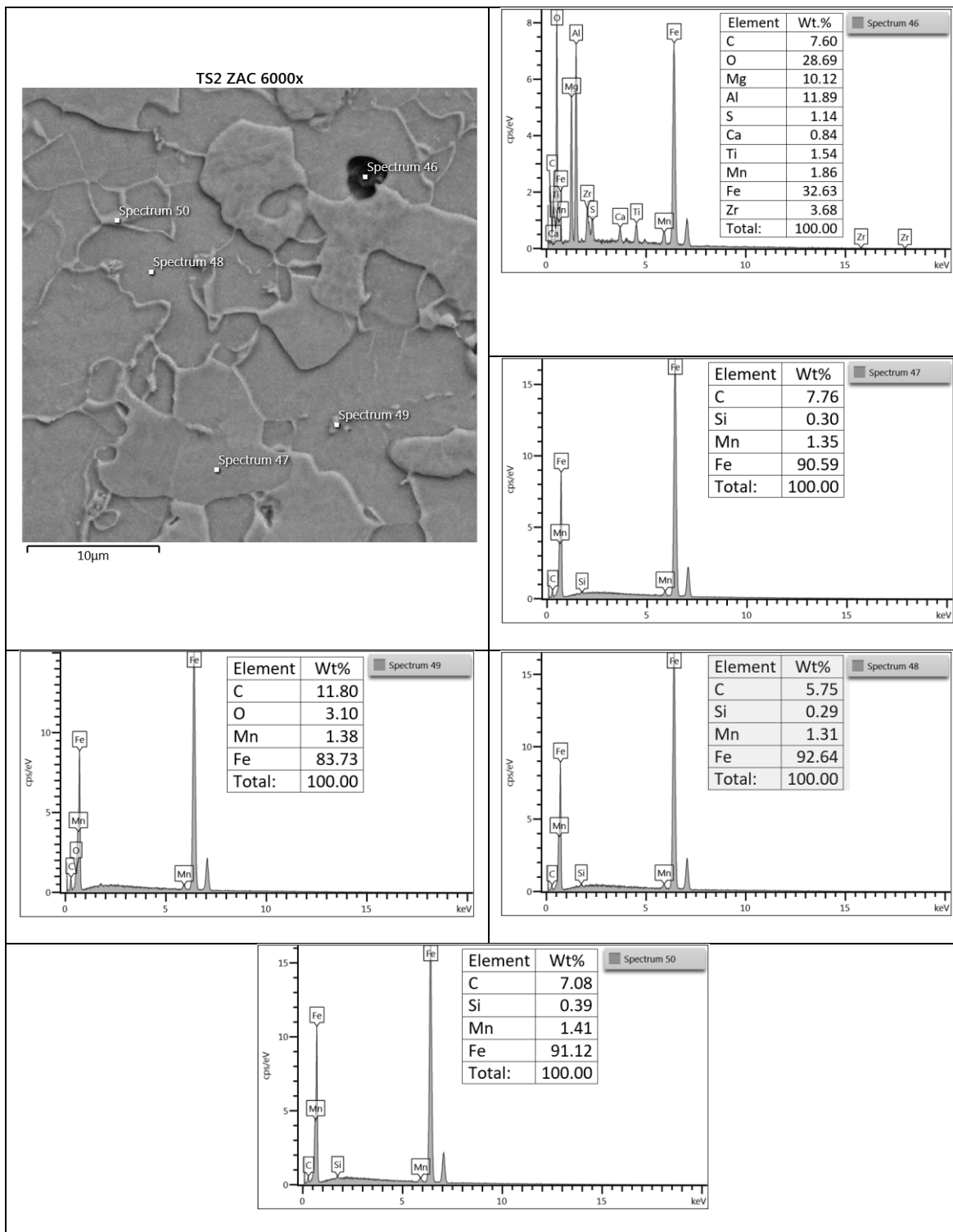


Figura 3-27. Espectro por BSE de elementos en la ZAC. Probeta TS2.

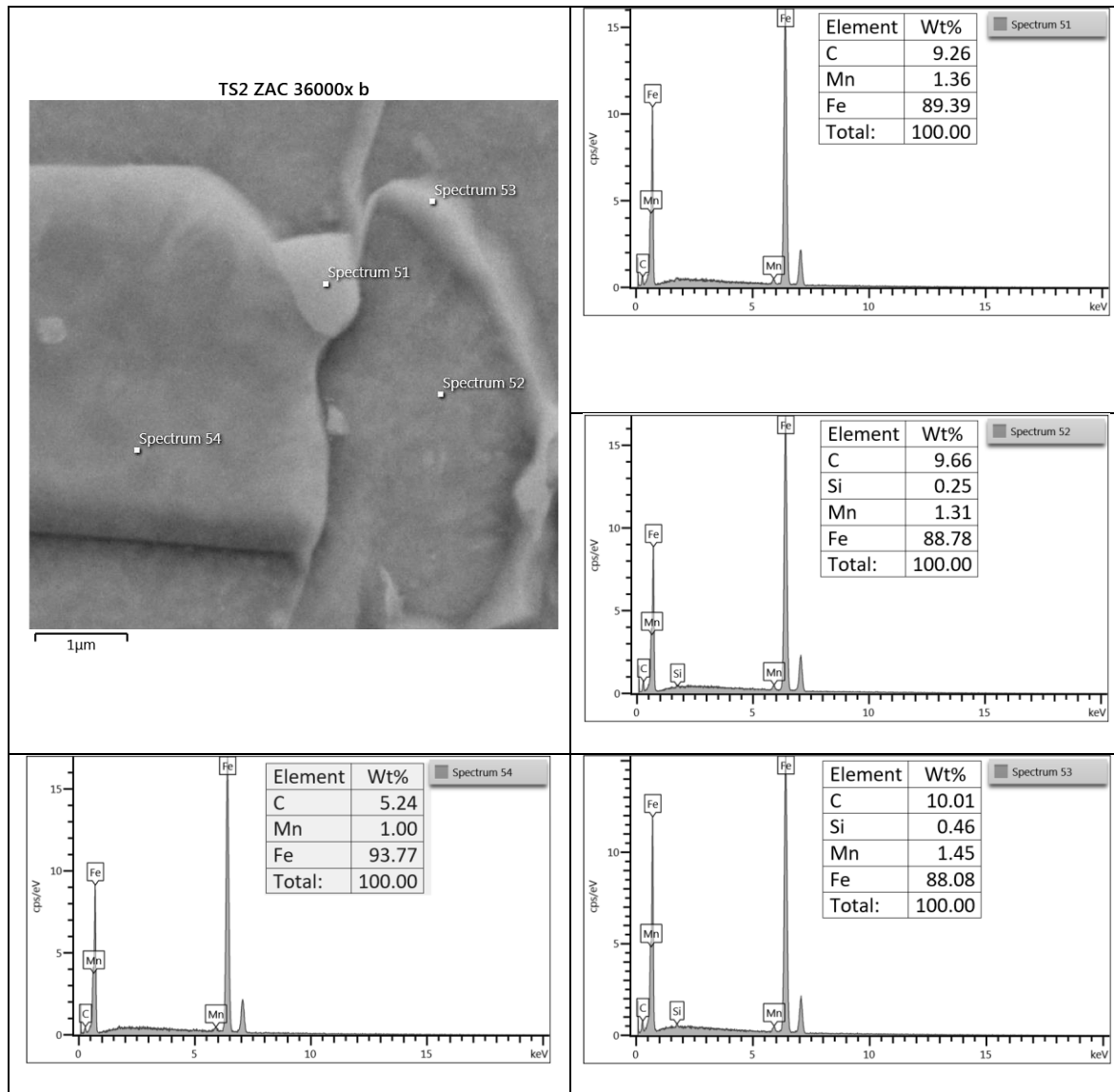


Figura 3-28. Espectro por BSE de elementos en la ZAC (b). Probeta TS2.

### 3.6 Dimensiones de la ZAC

Cada proceso de soldadura genera entradas de calor diferentes. Entre más entrada de calor se genere en el proceso, la zona afectada por el calor (ZAC) aumenta. La ZAC es una zona crítica en el metal base ya que las propiedades mecánicas y microestructurales son afectadas debido al calentamiento y a los diferentes ciclos térmicos al que está sometida, sin llegar a fundir el material. Al realizar procesos de soldadura es conveniente lograr ZAC mínimas.

La ZAC para cada proceso de soldadura se midió directamente en las juntas soldadas. En la figura 3-29 se observa un ejemplo de las dimensiones de la ZAC para la probeta 1 del WPS S\_01, soldada mediante el proceso SMAW. Mediciones realizadas con el estéreo microscopio marca Nikon modelo SMZ800 del laboratorio de ensayos mecánicos Inter facultades de la Universidad Nacional de Colombia.

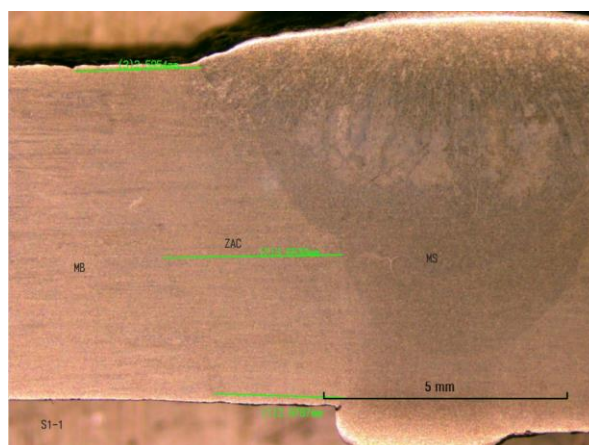


Figura 3-29. Medición de la ZAC para las juntas soldadas. WPS S\_01, probeta 1.

En la tabla 3-2 se presentan las dimensiones del ancho de la ZAC. Mediciones realizadas directamente en la junta de cada proceso de soldadura empleado.

WPS (Proceso)	Junta (dos juntas por WPS)	Probeta (extraída de la junta)			ZAC Promedio por junta (mm)	ZAC Promedio por proceso (mm)
		1	2	3		
		Ancho de la ZAC (mm)				
S_01 (SMAW)	S1	3,80	4,42	3,76	3,73	3,80
		3,48	3,84	3,10		
	S2	4,34	4,22	4,26	3,86	
		3,64	3,68	3,02		
GF_01 (GMAW+ FCAW)	GF1	6,76	6,96	6,46	6,90	5,95
		6,76	7,20	7,26		
	GF2	5,60	5,68	4,48	4,99	
		3,74	4,96	5,50		
TS_01 (GTAW+ SMAW)	TS1	2,56	3,00	2,42	2,53	2,90
		2,56	2,24	2,42		
	TS2	3,40	4,06	3,10	3,26	
		3,28	2,96	2,76		

Tabla 3-2. Dimensiones de la ZAC para cada proceso de soldadura empleado.

El WPS TS\_01 del proceso mixto GTAW+SMAW obtuvo la menor ZAC con un valor promedio de 2.90 mm (ancho de la ZAC).

El WPS S\_01 del proceso SMAW generó la ZAC de ancho intermedio respecto a los demás procesos, con un valor de 3.80 mm.

El WPS GF\_01 del proceso mixto GMAW+FCAW generó la mayor ZAC con un ancho promedio de 5.95 mm. Ancho con un 51% y 36% mayor que los procesos GTAW+SMAW y SMAW respectivamente.

Para calcular la entrada de calor, la cual genera el ancho de la ZAC, se emplea la fórmula de la ecuación 3.4 de la parte QW-409.1 de ASME Sección IX [49]:

$$\text{Entrada de calor} \left( \frac{J}{mm} \right) = \frac{\text{Voltaje (V)} \times \text{Amperaje (A)} \times 60}{\text{Velocidad de avance (mm/min)}} \quad (\text{Ec 3.4})$$

Los parámetros empleados y la entrada de calor calculada para cada WPS se presentan en la tabla 3-3. En la tabla se presenta los valores de velocidad de avance en cada pase o cordón de soldadura aplicado y los valores de entrada de calor calculados por cada pase, proceso, junta y WPS.



WPS	Junta (Nota1)	Pase	Proceso aplicado	Diámetro (in) (Nota 2)	Perímetro (m)	Tiempo (s)	Velocidad de avance (mm/min)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Entrada de calor (J/mm)	Entrada de calor promedio (J/mm)		
											por proceso	por junta	por WPS
TS_01	TS1	1	GTAW	6,065	483,97	525	55,31	12,10	133,00	1745,75	1745,75	1375,00	1596,58
		2	SMAW	6,345	506,31	162	187,52	25,10	106,00	851,29			
		3	SMAW	6,345	506,31	265	114,64	25,00	91,50	1197,27			
	TS2	4	SMAW	6,625	528,65	217	146,17	27,00	87,00	964,21	1922,59		
		1	GTAW	6,065	483,97	583	49,81	12,00	133,00	1922,59			
		2	SMAW	6,345	506,31	433	70,16	25,30	94,86	2052,40			
S_01	S2	1	SMAW	6,065	483,97	135	215,10	27,68	90,00	694,91	970,32	970,32	979,22
		2	SMAW	6,345	506,31	119	255,28	26,67	110,00	689,52			
		3	SMAW	6,345	506,31	267	113,78	24,15	96,00	1222,60			
		4	SMAW	6,625	528,65	282	112,48	26,84	89,00	1274,24			
	S1	1	SMAW	6,065	483,97	167	173,88	28,28	90,00	878,26	988,12		
		2	SMAW	6,345	506,31	109	278,70	26,57	110,00	629,21			
		3	SMAW	6,345	506,31	241	126,05	24,10	94,00	1078,32			
		4	SMAW	6,625	528,65	310	102,32	27,42	85,00	1366,71			
GF_01	GF1	1	GMAW	6,065	483,97	231	125,71	13,80	147,00	968,26	968,26	1461,51	1478,70
		2	FCAW	6,625	528,65	245	129,47	24,58	171,60	1954,77			
	GF2	1	GMAW	6,065	483,97	278	104,45	15,35	115,50	1018,40	1018,40		
		2	FCAW	6,625	528,65	244	130,00	24,80	172,40	1973,37			

Nota 1. Por cada WPS se realizaron dos juntas en tubería de Ø6".

Nota 2. El diámetro para cada pase depende de la ubicación del cordón, teniendo en cuenta el diámetro externo de tubería de 6" con espesor de pared SCH STD (40) de 0,280" (7,11mm):

- 1er pase en diámetro interno Ø6.065", perímetro interno 483.97mm
- pases intermedios en diámetro medio Ø6.345", perímetro medio 506.31 mm
- pase final en diámetro externo Ø6.625", perímetro externo 528.65 mm

Tabla 3-3. Parámetros de soldadura y entrada de calor para cada WPS.

Las juntas S1 y S2 del WPS S\_01, realizadas con el proceso SMAW, tuvieron la menor entrada de calor con 970.32 y 988.12 J/mm respectivamente.

La junta TS2 del WPS TS\_01, realizada con el proceso mixto GTAW+SMAW, presentó el mayor valor de entrada de calor con 1818.15 J/mm.

Basado en las dimensiones de la ZAC dadas en la tabla 3-2 y en los valores de entrada de calor calculados en la tabla 3-3, no se observa proporcionalidad entre estos parámetros para las juntas soldadas en esta investigación. Aunque las juntas TS1 y TS2 del WPS

TS\_01 tienen la menor ZAC con 2.53 y 3.26 mm, son la que tienen mayor entrada de calor promedio con 1596,58 J/mm.

Las juntas GF1 y GF2 tienen las mayores dimensiones de la ZAC con 6.90 y 4.99 mm respectivamente, pero las entradas de calor de estas juntas tuvieron los valores medios entre los procesos aplicados con 1461.51 y 1495.89 J/mm

Esta no relación entre el ancho de la ZAC y la entrada de calor puede ser debido a los procesos mixtos aplicados en esta investigación, ya que las velocidades de avance empleadas por cada proceso son diferentes. El ancho de la ZAC tuvo comportamientos diferentes respecto a la entrada de calor calculada, ya que la velocidad de avance de un proceso afecta la ZAC del proceso aplicado con anterioridad con otra velocidad de avance.

### 3.7 Resultados de los ensayos

Los tipos de ensayos requeridos para calificación de procedimientos de soldadura (WPS) y calificación de soldadores (WPQ) en juntas soldadas a tope, para tuberías de acero que transportan gas bajo el código ASME B31.8 [34], se encuentran indicados en el código ASME sección IX, parte QW-140 [49], ver tabla 3-4.

Ensayos para calificación de procedimientos de soldadura o para calificación de soldadores	Parte del código ASME Sección IX [49]	Observaciones
Ensayo de tensión	QW-141.1	Requerimientos indicados en QW-150
Ensayo de doblez guiado	QW-141.2	Requerimientos indicados en QW-160
Ensayo de tenacidad (si el código de referencia lo exige). El código de referencia ASME B31.8 [34] no lo exige para el diámetro y el punto de operación seleccionado.	QW-141.4	Requerimientos indicados en QW-170
Inspección por radiografía o ultrasonido. Aplica solo para calificación de soldadores o de operadores de soldadura. Este tipo de inspección puede reemplazar los ensayos mecánicos solicitados en QW- 141.	QW-142	Requerimientos indicados en la sección QW-191.1 y QW-191.2.
Inspección visual	QW-144	Requerimientos indicados en QW-194

Tabla 3-4. Ensayos requeridos por ASME sección IX para calificación de procedimientos de soldadura y para calificación de soldadores en juntas soldadas a tope [49].

---

Para cada especificación de procedimiento de soldadura (WPS) se realizó la cantidad de ensayos indicados en las tablas 2-11 y 2-12 del capítulo 2, para el PQR y WPQ respectivamente. Los resultados se presentan a continuación.

### **3.7.1 Ensayos de tensión**

Para validar cada WPS y que juntas soldadas por medio de estos procedimientos cumplen con los criterios de aceptación del ensayo de tensión, se deben tener en cuenta los criterios indicados en el Código ASME Sección IX, Artículo 1, QW-153 [49], donde se indica que la resistencia a la tensión de la probeta soldada no debe ser menor que :

- a) la resistencia a la tensión mínima especificada del metal base; o*
- b) la resistencia a la tensión mínima especificada del más débil de los dos, si los metales base utilizados tienen diferente resistencia a la tensión mínima; o*
- c) la resistencia a la tensión mínima especificada del metal de soldadura cuando la sección aplicable prevé el uso de metal de soldadura que tenga una resistencia a temperatura ambiente inferior a la del metal base;*
- d) si la probeta rompe en el metal base fuera de la soldadura o de la interfaz de la soldadura, se aceptará que la prueba cumple los requisitos, garantizando que la resistencia no sea más del 5% inferior a la resistencia a la tensión mínima especificada del metal base [49].*

La cantidad de probetas para los ensayos de tensión se indican en la tabla 2-11, Fase II, del capítulo 2. Para la realización del PQR el código ASME Sección IX [49] exige dos (2) ensayos de tensión por cada cupón o junta soldada para validar un WPS. Para un WPQ el código no exige ensayos de tensión. Total de probetas ensayadas: 12 unidades, ver tabla 3-5.

Para realizar los ensayos de tensión se empleó la máquina universal de ensayos marca SHIMADSU UH-500kNI del laboratorio de ensayos mecánicos y deformación plástica del departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia.

Los resultados de los ensayos de tensión de cada probeta ensayada para cada WPS se presentan en la tabla 3-5. En la tabla 3-6 se indica si hay cumplimiento o no con los criterios de aceptación del código ASME. En la Figura 3-30 y 3-31 se observa el resumen de los datos de tensión de cada probeta ensayada, comparando las resistencias obtenidas contra la resistencia a la tensión mínima especificada del material base y los promedios de cada WPS empleado.

La resistencia a la tensión mínima especificada del material base acero API 5LX65 es de 78.000 Psi, indicado en la QW/QB-422 del código ASME, Sección IX[49]. Se realizan dos cupones por cada WPS.

WPS	Procesos empleados	Junta (cupón soldado)	PROBETA para tensión	Esfuerzo máximo (PSI)	Esfuerzo de fluencia (PSI)	Esfuerzo de rotura (PSI)	Alargamiento (%)	Módulo elástico (PSI)
S_01	SMAW	1	S1-T1	83.786	66.188	53.875	13,4	854.136
			S1-T2	82.499	64.368	34.279	16,0	880.481
		2	S2-T1	85.326	65.316	29.658	15,0	844.849
			S2-T2	84.454	64.782	63.358	16,0	885.398
TS_01	GTAW+ SMAW	1	TS1-T1	87.582	66.754	40.213	19,0	923.616
			TS1-T2	83.858	65.275	28.616	16,0	690.604
		2	TS2-T1	85.803	64.632	37.236	15,2	945.952
			TS2-T2	84.555	63.905	29.893	11,2	703.279
GF_01	GMAW+ FCAW	1	GF1-T1	89.493	68.280	29.397	20,0	866.567
			GF1-T2	88.557	69.088	31.323	16,0	914.743
		2	GF2-T1	86.216	66.473	28.555	18,4	962.053
			GF2-T2	87.574	66.235	46.480	18,0	883.247

Tabla 3-5. Resistencias de probetas ensayadas. Esfuerzos máximos a la tensión, de fluencia, de rotura. % de alargamiento y módulo elástico por cada WPS.

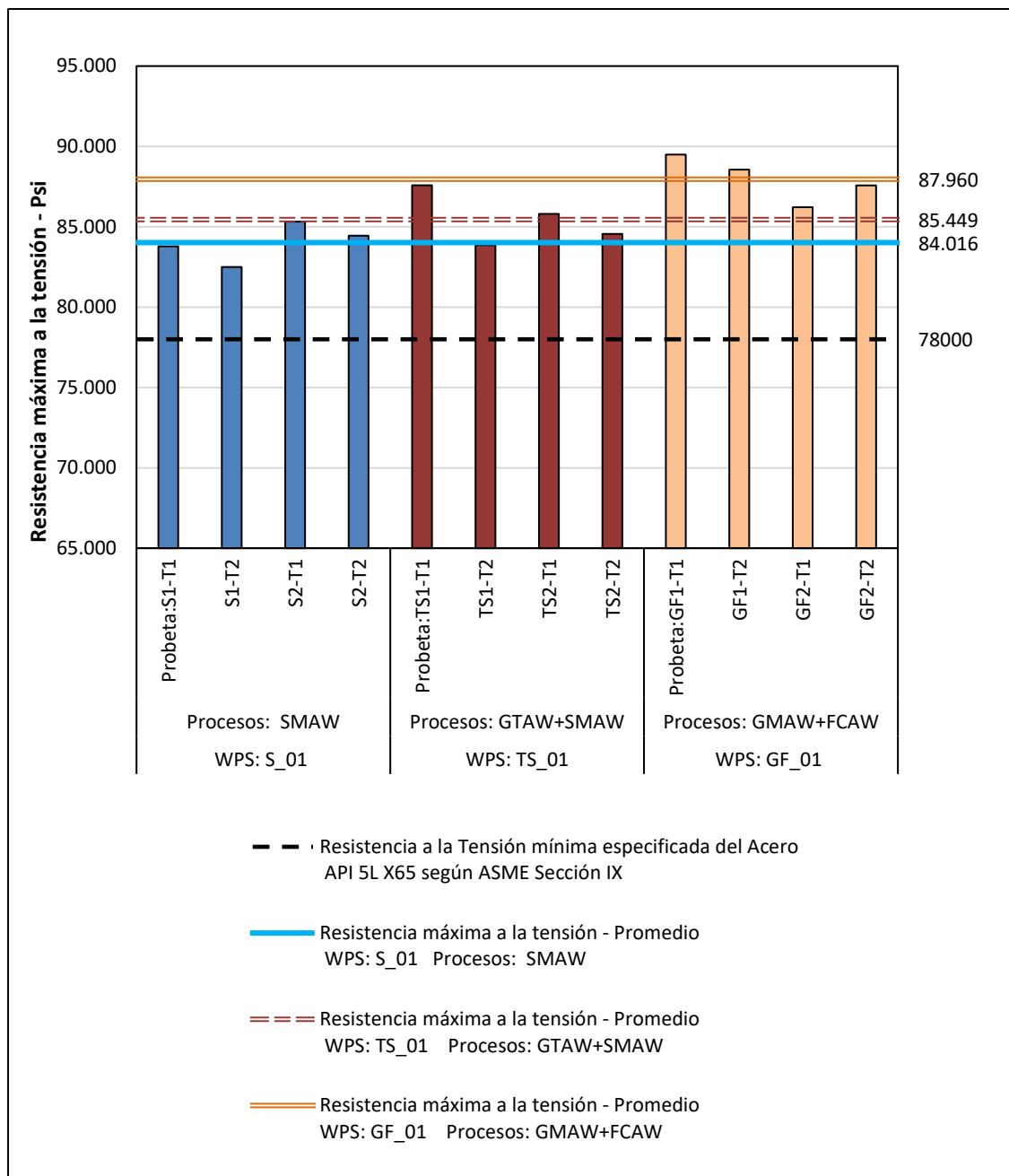


Figura 3-30. Comparación resistencia de probetas ensayadas Vs resistencia a la tensión mínima especificada del material base y promedios de cada WPS empleado.

WPS	Procesos empleados	Junta (cupón)	Probeta para tensión	Resistencia máxima a la tensión (PSI)	Cumple por ASME Sección IX, Artículo 1, QW-153 [49]	Zona de fractura	Resistencia a la tensión promedio por WPS (PSI)
S_01	SMAW	1	S1_T1	83.786	conforme	Metal de aporte	84.016
			S1_T2	82.499	conforme	Metal de aporte	
		2	S2_T1	85.326	conforme	Metal de aporte	
			S2_T2	84.454	conforme	Metal de aporte	
TS_01	GTAW+SMAW	1	TS1_T1	87.582	conforme	Metal de aporte	85.449
			TS1_T2	83.858	conforme	Metal de aporte	
		2	TS2_T1	85.803	conforme	Metal de aporte	
			TS2_T2	84.555	conforme	Metal de aporte	
GF_01	GMAW+FCAW	1	GF1_T1	89.493	conforme	Metal de aporte	87.960
			GF1_T2	88.557	conforme	Metal de aporte	
		2	GF2_T1	86.216	conforme	Metal de aporte	
			GF2_T2	87.574	conforme	Metal de aporte	

Tabla 3-6. Tabla de resistencias a la tensión indicando cumplimiento del código ASME Sección IX [49]. Ensayos para los PQR y WPQ según cada WPS.

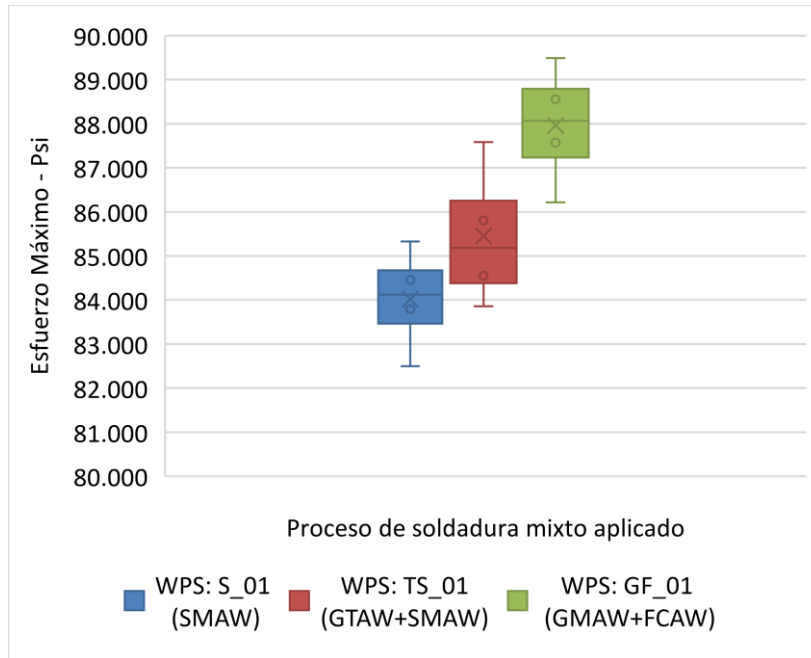


Figura 3-31. Diagrama de caja para esfuerzos máximos a la tensión de los procesos de soldadura mixtos aplicados.

---

Tomando como referencia la resistencia a la tensión mínima especificada para el material base API 5LX65 de 78000 Psi indicado en la tabla QW/QB-422 del código ASME Sección IX [49], resistencia que es el valor de referencia como criterio para aceptación o rechazo del ensayo, se observa que todas las probetas ensayadas por tensión cumplen con los criterios de aceptación del código. La probeta GF1-T1 presentó el mayor valor con 89.493 Psi del proceso de soldadura GF\_01 y el menor valor lo presenta la probeta S1-T2 con 82.499 Psi del proceso S\_01. Proceso el cual tuvo la menor dispersión de los valores de resistencia a la tensión de las probetas ensayadas del WPS S\_01.

El mayor valor promedio de resistencia a la tensión fue el del proceso GF\_01 con un valor de 87.960 Psi. Con las probetas ensayadas del proceso WPS TS\_01 se obtuvo los valores más dispersos de resistencia a la tensión, pero con mayor valor promedio de resistencia que el proceso WPS S\_01 y menor que el proceso WPS GF\_01.

El código ASME Sección IX [49] no hace exclusión si la probeta rompe en el metal de soldadura o en el metal base, al no hacer exclusión puede romper en cualquiera de estas dos zonas. El código indica que si rompe fuera de la soldadura o fuera de la interfase de la soldadura el ensayo debe ser aceptado si la resistencia no es más del 5% inferior a la resistencia a la tensión mínima especificada del metal base. En este caso todas las probetas superan este valor. Es de notar que todos los ensayos de tensión también presentaron resistencias a la tensión mayores a las resistencias mínimas de los electrodos empleados.

Los valores de resistencia a la tensión del material base empleado, Ver tabla 3-7 superan los valores requeridos por la especificación API 5L para el grado X65. Este material aunque el fabricante lo clasifica como grado X65, basado en los certificados de calidad entregados por el fabricante, podría tomarse como acero de grado X70 con los valores resistencia a la tensión y resistencia de fluencia obtenidos en los ensayos del material base. Los mayores valores de resistencia y de dureza presentados en el material base empleado frente a la resistencia de las juntas soldadas y valores de dureza en las ZAC son debidos a esta situación.

Es importante tener en cuenta que ASME sección IX no toma como criterio de aceptación la resistencia a la tensión del material (en este caso 89.496 Psi), toma en cuenta la

resistencia a la tensión mínima especificada del metal base indicada por tablas en el código ASME sección IX: 78.000 Psi.

Probeta del Metal Base	Esfuerzo Máximo (PSI)	Esfuerzo Máximo Promedio (PSI)	Esfuerzo de Fluencia (PSI)	Esfuerzo de rotura (PSI)	Alargamiento (%)
B1T	90.649	89.496	88.401	38.950	20,2
B2T	88.909		86.776	45.315	20,6
B3T	88.929		85.607	38.580	23,4

Tabla 3-7. Valores medidos de resistencia a la tensión, fluencia y rotura del material base empleado API5LX65.

En la sección IX del código ASME no hay un criterio de aceptación para % de alargamiento o elongación en juntas soldadas, por lo tanto el código no valida o invalida una junta soldada bajo este parámetro. Como referencia, en la tabla 3-5 se presentan los resultados del % de alargamiento de cada probeta ensayada, el menor porcentaje fue para el proceso S\_01 con 15.1% promedio, mientras que el mayor porcentaje lo obtuvo el proceso GF\_01 con 18.1 % promedio. Todas las probetas están por debajo del % de alargamiento indicado en los certificados de calidad del fabricante del material base: 28%. Entre mayor % de deformación el material será más dúctil y soportará mayor deformación plástica, entre menos % de deformación será más frágil.

En la Figura 3-32 se observan las curvas esfuerzo-deformación generadas por cada una de las probetas ensayadas. Por cada especificación de procedimiento se realizaron cuatro probetas, las curvas presentan deformaciones relacionadas a material dúctil por el extenso intervalo de deformación plástica antes de romper la probeta. En la figura se observa que la mayor deformación (20%) se presentó en la probeta GF1-T1, la cual también obtuvo el mayor valor de resistencia máxima a la tensión con 89.493 Psi.



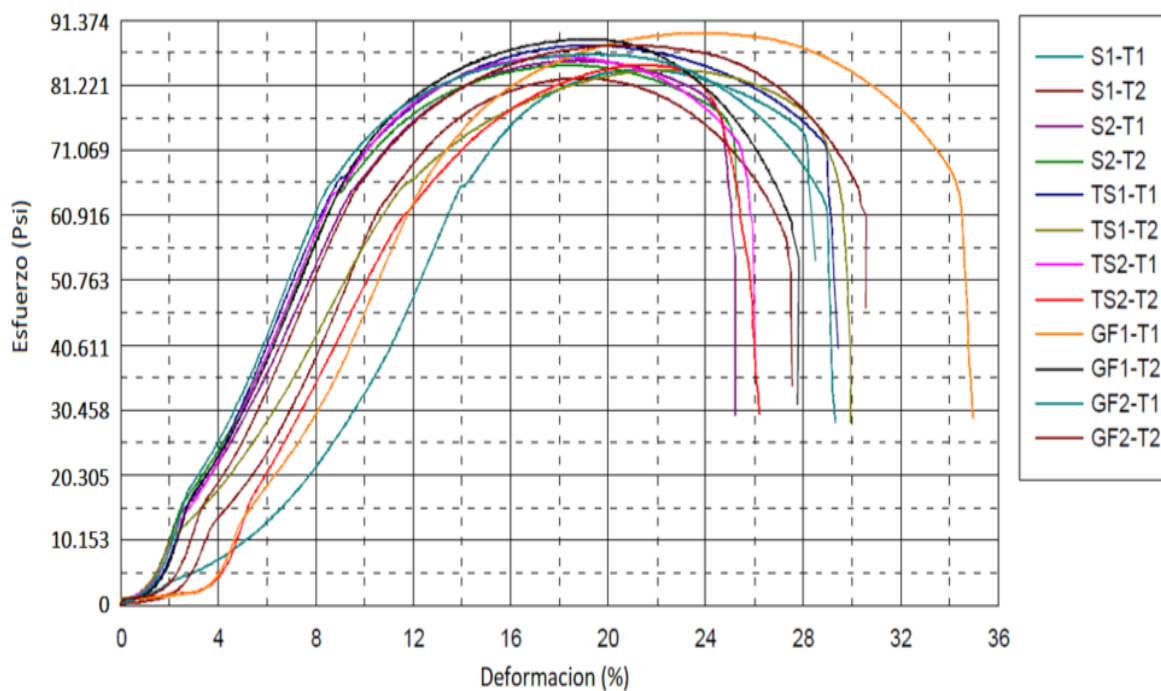
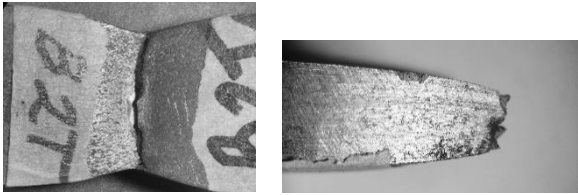
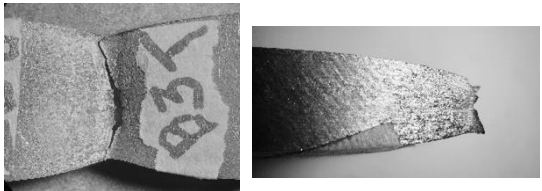
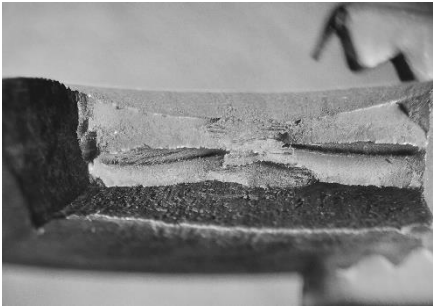

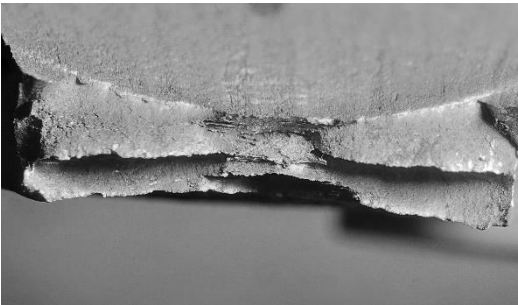
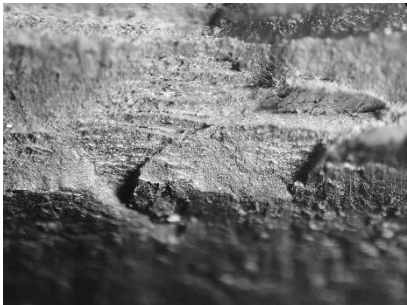
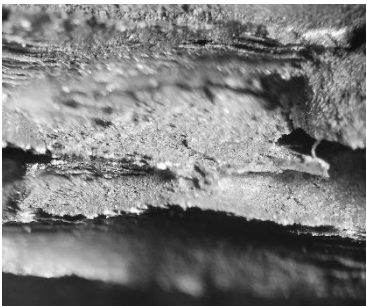
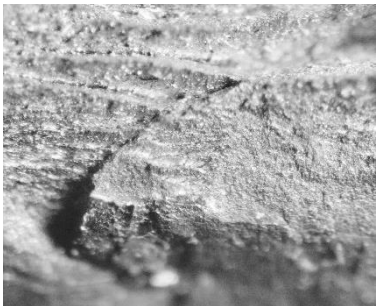
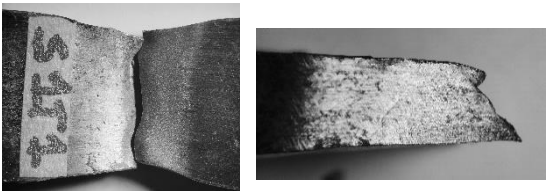
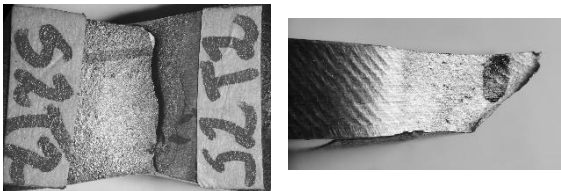








Figura 3-32. Curvas esfuerzo - deformación de las probetas ensayadas. Cuatro probetas por cada WPS diseñado.

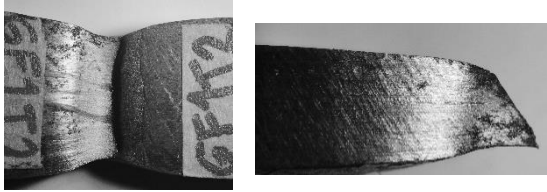


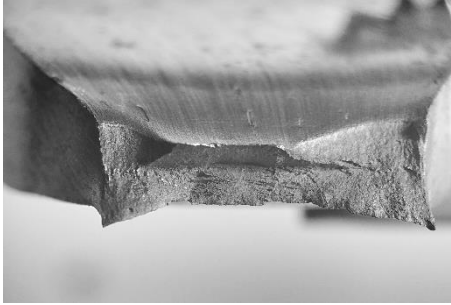
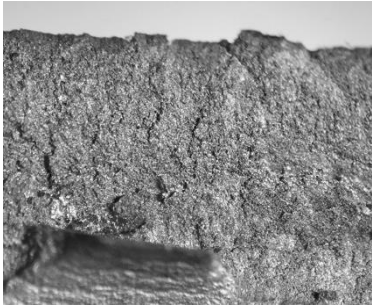



Las superficies de fractura de las probetas ensayadas para cada uno de los procesos de soldadura aplicados se muestran en la figura 3-33 (a)(b)(c)(d), observando características de deformación plástica en materiales.

MATERIAL BASE API5L X65	
B2-T Alargamiento 20.6%	B3-T Alargamiento 23.4%
	
10X 	10X 
12.5 X 	40X 
50X 	90X 

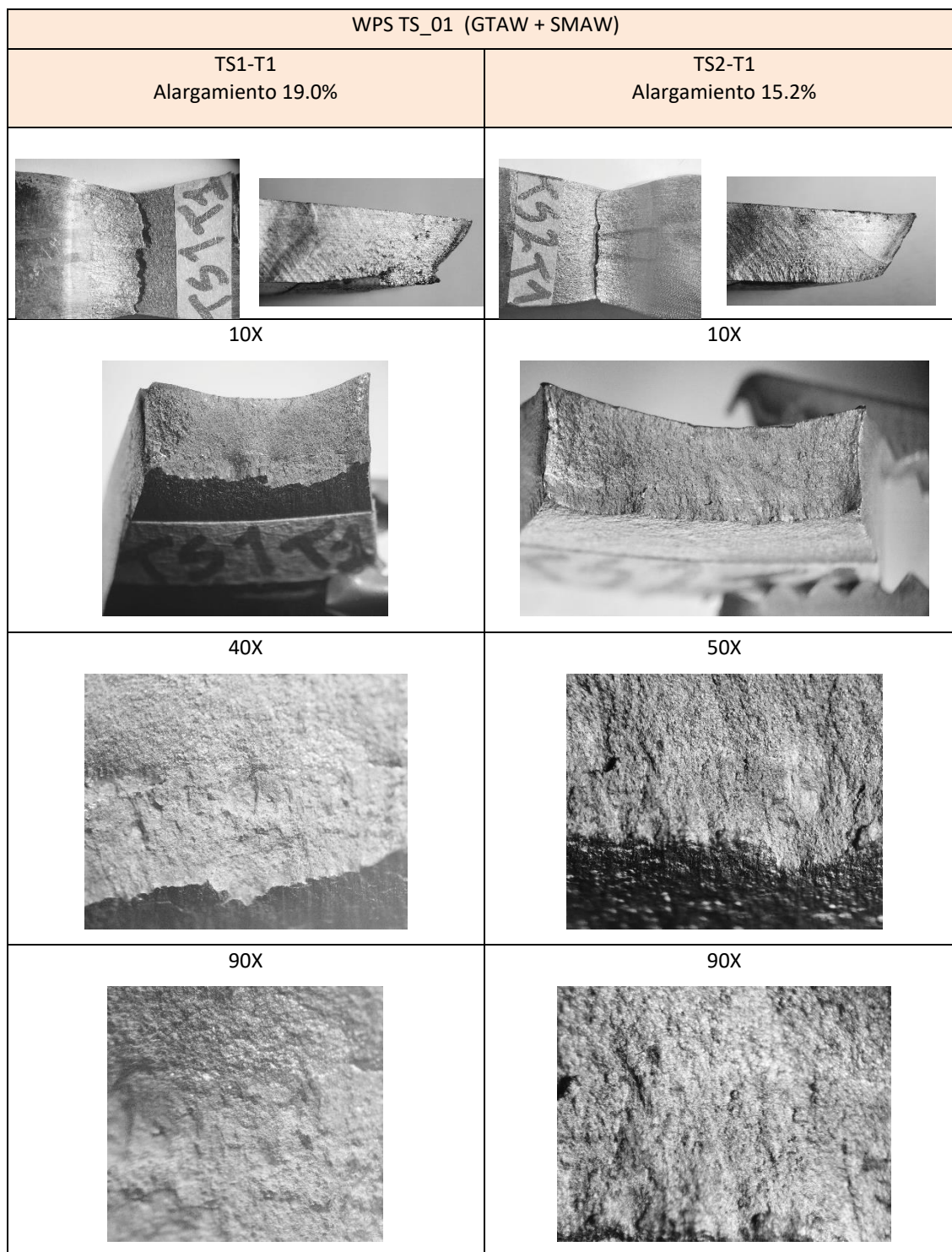
(a) Forma de falla y fractura dúctil de las probetas de tensión del metal base API 5LX65.

WPS S_01 (SMAW)	
S1-T1 Alargamiento 13.4%	S2-T2 Alargamiento 16.0%
	
10X 	10X 
40X 	40X 
90X 	50X 

(b) Forma de falla y fractura dúctil de las probetas de tensión del proceso WPS S\_01 (SMAW).

WPS GF_01 (GMAW + FCAW)	
GF1-T2 Alargamiento 16.0%	GF2-T1 Alargamiento 18.4%
	
10X 	10X 
40X 	40X 
90X 	90X 

(c) Forma de falla y fractura dúctil de las probetas de tensión del proceso WPS GF\_01 (GMAW + FCAW).



(d) Forma de falla y fractura dúctil de las probetas de tensión del proceso WPS TS\_01 (GTAW + SMAW).

Figura 3-33. Morfología y fractografías de las zonas de falla en las probetas de ensayos de tensión para cada WPS (a)(b)(c)(d).

### 3.7.2 Ensayos de doblez guiado, doblez de raíz y de cara

La prueba de doblez guiado se emplea para determinar el grado de sanidad y ductilidad de juntas soldadas a tope.

El código ASME Sección IX, Artículo 1, QW-163 [49] indica los criterios de aceptación para los ensayos de doblez de raíz y doblez de cara, exigidos por el código, para validar un WPS y un WPQ. Total de probetas dobladas 24 unidades, ver tabla 3-8.

Teniendo en cuenta el criterio de aceptación o rechazo indicado en el capítulo II -*Desarrollo experimental*- para el ensayo de doblez y los resultados dados en la tabla 3-8 se observa que las probetas son aceptadas por cumplir con el criterio de aceptación, a excepción de la probeta GF1\_DC1 por tener una discontinuidad mayor a 3mm la cual es rechazada. En todos los casos la soldadura y la zona afectada por el calor se encuentran dentro de la zona doblada del espécimen, lo cual también es un requerimiento para ensayos de doblez por ASME Sección IX parte QW-163 [49]. Es de anotar que el criterio de aceptación no indica cantidad de discontinuidades abiertas, solo indica que las continuidades no deben exceder 3 mm de longitud.

Los resultados de los ensayos de doblez guiado de cara y de raíz de las probetas, para los PQR y WPQ para cada WPS de soldadura, se presentan en la tabla 3-8, en la cual se indica si hay cumplimiento o no con los criterios de aceptación del código ASME Sección IX, QW 163 [49].

Para las pruebas de doblez guiado se empleó la máquina universal de ensayos marca SHIMADSU UH-500kNI del laboratorio de ensayos mecánicos y deformación plástica del departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia.

WPS	Junta (cupón soldado)	Ensayo Doblez de raíz			Ensayo Doblez de cara		
		Probeta	Discontinuidad ad presente / dimensión (mm)	Concepto	Probeta	Discontinuidad ad presente / dimensión (mm)	Concepto
S_01	1	S1_DR1	No	conforme	S1_DC1	No	conforme
		S1_DR2	No	conforme	S1_DC2	No	conforme
	2	S2_DR1	No	conforme	S2_DC1	No	conforme
		S2_DR2	Si / 2,6-2,9- 2,9	conforme	S2_DC2	No	conforme
TS_01	1	TS1_DR1	Si / 1,8-1,8- 1,6	conforme	TS1_DC1	Si / 2,3-2,4- 2,8	conforme
		TS1_DR2	No	conforme	TS1_DC2	No	conforme
	2	TS2_DR1	Si / 2,5-1,8	conforme	TS2_DC1	No	conforme
		TS2_DR2	Si / 2,8-2,8- 2,0	conforme	TS2_DC2	No	conforme
GF_01	1	GF1_DR1	Si / 1,4-2,0- 1,7	conforme	GF1_DC1	Si / 16,5	No conforme
		GF1_DR2	No	conforme	GF1_DC2	No	conforme
	2	GF2_DR1	No	conforme	GF2_DC1	No	conforme
		GF2_DR2	Si / 1,4	conforme	GF2_DC2	No	conforme

Tabla 3-8 Resultado de los ensayos de doblez guiado de cara y de raíz para los PQR y WPQ. WPS S\_01, TS\_01, GF\_01. Dos cupones soldados por cada WPS.

En la figura 3-34 se observan las probetas del ensayo de doblez de cara y doblez de raíz extraídas del segundo cupón soldado con el WPS GF\_01 (probetas GF2\_DR1, GF2\_DR2, GF2\_DC1, GF2\_DC2 del proceso de soldadura mixto GMAW + FCAW). En la figura se observa que las probetas, en este caso, no tienen discontinuidades abiertas a la superficie en la zona de soldadura o en la zona afectada por el calor que hayan sido generadas durante la prueba de doblez. Probetas conforme según ASME Sección IX, QW 163 [49].

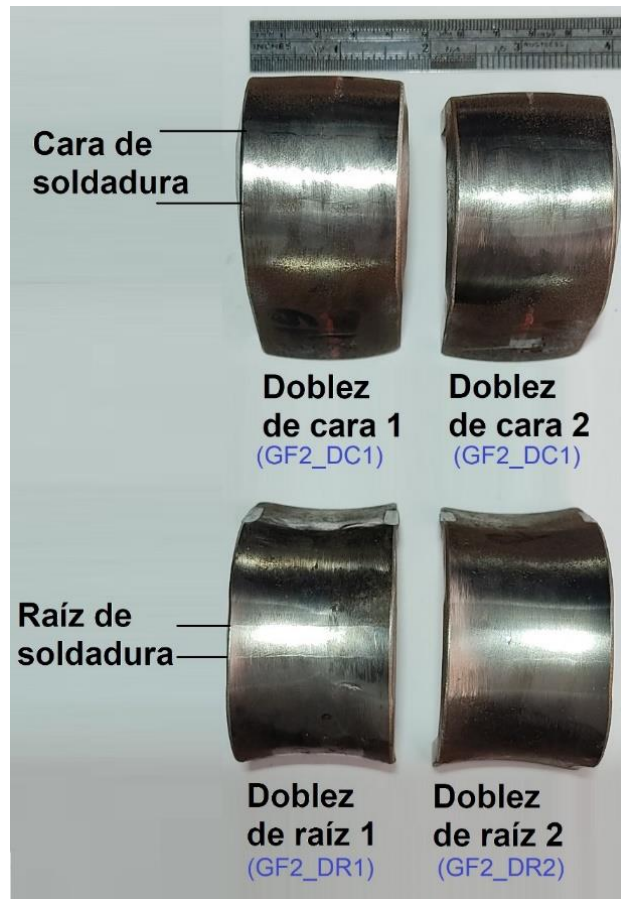


Figura 3-34. Probetas dobladas de cara y raíz del WPS GF\_01 (GMAW + FCAW) cupón 2.

En la figura 3-35, se observa una de las probetas del ensayo de doblado de raíz extraída del segundo cupón soldado con el WPS S\_01 (probeta S2\_DR2 del proceso de soldadura SMAW). Se observa que la probeta, en este caso, tiene discontinuidades abiertas a la superficie en la línea de fusión de la zona de soldadura generadas durante la prueba. La probeta presenta tres discontinuidades menores a 3 mm cada una. A pesar de presentar las discontinuidades no se puede dar rechazo a la probeta ya que esta cumple con los criterios de aceptación del código, por lo tanto es conforme según ASME Sección IX, QW 163 [49]. Medición de discontinuidades abiertas con calibrador pie de rey, precisión 0.02 mm.



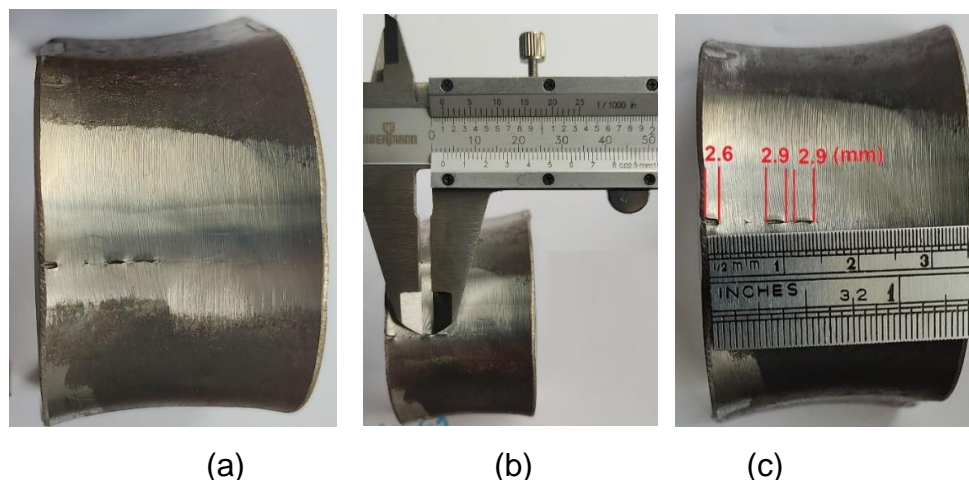


Figura 3-35. Probeta S2\_DR2 con doblez de raíz. (a) Discontinuidades abiertas. (b) Medición de discontinuidades (c) Dimensiones de discontinuidades abiertas.

En la figura 3-36, se observa una de las probetas del ensayo de doblez de cara, extraída del primer cupón soldado con el WPS GF\_01 (probeta GF1\_DC1 del proceso de soldadura GMAW+FCAW). Se observa que la probeta tiene una discontinuidad en la esquina abierta a la superficie, en la zona de soldadura generada durante la prueba de doblez, de longitud mayor a 3 mm. Se puede dar rechazo a la probeta ya que esta no cumple con los criterios de aceptación del código ASME Sección IX, QW 163 [49].

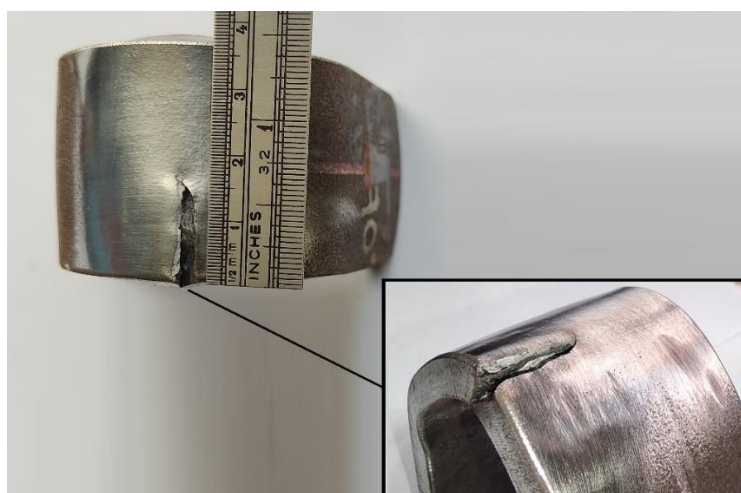


Figura 3-36. Probeta GF1\_DC1 con doblez de cara y que presenta discontinuidad.

La probeta rechazada GF1\_DC1 es del primer cupón soldado según el WPS GF\_01 (GMAW+FCAW). En la probeta antes del ensayo de doblez de cara no se observó alguna indicación o discontinuidad en la superficie que haya generado la falla, ver figura 3-37, la

discontinuidad en esta probeta se pudo generar debido a falta de fusión entre pasadas y la cara del bisel por inadecuada aplicación de la soldadura.

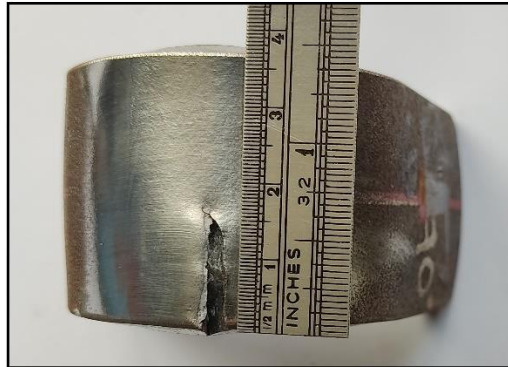


Figura 3-37. Probeta GF1\_DC1, rechazada. Antes y después del ensayo.

### **3.7.3 Ensayos de tenacidad**

El código ASME Sección IX [49] en la parte QW-170 y QW-202.2, indica que pruebas de tenacidad deben ser realizadas cuando el código de referencia lo solicita, indica así mismo que los criterios de aceptación deben ser indicados por el código de referencia que solicita los ensayos de tenacidad.

En esta investigación el código de referencia para el diseño de tuberías para gasoductos es el código ASME B31.8 [34], el cual para calificación de procedimientos de soldadura (PQR) y calificación de soldadores (WPQ) no exige ensayos de tenacidad. El código en la sección 841.1.2, literal a, indica que se debe especificar un criterio de tenacidad a la

fractura para controlar la propagación de grietas cuando uno de los siguientes enunciados se cumple:

(1) Una tubería está diseñada para operar con una tensión circunferencial (hoop stress) de más del 40 % hasta el 80 % del SMYS, en tamaños NPS 16 o mayores.

(2) una tubería está diseñada para operar con una tensión circunferencial superior al 72 % hasta el 80 % del SMYS en tamaños inferiores a NPS 16.

(3) una tubería está diseñada con una temperatura de diseño mínima por debajo de -20 °F (-29 °C) como se describe en el párrafo 812 del código [34].

Realizando el análisis para cada uno de los ítems anteriores (1), (2) y (3) para verificar si la tubería de esta investigación requiere ensayos para control de fractura se obtiene:

- En esta investigación la tubería empleada es de 6 pulgadas de diámetro, por lo cual el ítem (1) de la sección 841.1.2 queda sin efecto y por código ASME B31.8 [34] no se requiere control de fractura.

- Como se indicó en el capítulo *Diseño de Experimentos* para el cálculo del espesor de tubería, teniendo en cuenta la máxima presión de operación de 1200 Psig en puntos de entrada a sistemas de transporte exigida por la resolución GREG-054 de 2007 [45], y con un factor de prueba hidrostática del 25%, se obtiene la presión de 1500 Psi.

Para calcular el esfuerzo circunferencial (hoop stress) se emplea la fórmula dada en la sección 805.2.3 del código ASME B31.8 [34], ver ecuación 3.5:

$$S_H = \frac{PD}{2t} = \frac{1500 \text{ Psi} * 6.625 \text{ in}}{2 * 0.280 \text{ in}} = 17745.5 \text{ Psi} \quad (\text{Ec 3.5})$$

Donde:

$S_H$ : Esfuerzo circunferencial.

P: Presión, 1500Psi.

D: Diámetro nominal externo, 6.625 in.

t: espesor de pared de la tubería, 0.280 in.

Teniendo en cuenta que el SMYS del acero API 5LX65 es 65000 Psi, el  $S_H$  de la tubería de 6 pulgadas es el 27.3% del SMYS, por lo cual el ítem (2) de la sección 841.1.2 (a) queda sin efecto y por código ASME B31.8 [34] no se requiere control de fractura.

- El Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT) en Colombia, establecido en la resolución CREG-071 de 1999 [44] y complementada con la resolución GREG-054 de 2007 [45], indica que el gas debe cumplir, entre otros, los siguientes requisitos para la entrega del agente en el punto de entrada del sistema de transporte:

- Temperatura de entrega máximo 49°C.

Por lo cual la tubería de transporte de gas en Colombia no operará por debajo de -29°C. Basado en lo anterior, el ítem (3) de la sección 841.1.2 (a) queda sin efecto y por código ASME B31.8 [34] no se requiere control de fractura.

En casos de transporte de gas natural licuado (GNL), el cual debe ser llevado a temperaturas por debajo de los -162°C en plantas de licuefacción, el transporte se realiza por medio de buques o recipientes diseñados especialmente para esta aplicación. Al llegar el GNL al destino, en plantas de regasificación, se lleva nuevamente al estado gaseoso por medio del aumento de la temperatura. Posteriormente es transportado por los gasoductos a las diferentes zonas del país.

La parte QW-200.3 para calificación de procedimientos de soldadura del código ASME Sección IX [49] indica que:

*“ En general, requisitos de tenacidad son obligatorios para todos los metales P-No. 11 templados y revenidos, para aplicaciones a baja temperatura de otros metales como se aplica en la Sección VIII, y para varias clases de construcción requeridas por la Sección III. Los criterios de aceptación para los ensayos de tenacidad son los establecidos en las otras secciones del código” [49].*

El material de la tubería empleada hace parte del Grupo P-No.1, por lo tanto el anterior criterio no aplica para tenacidad de las juntas soldadas en esta investigación.

Resumiendo, para los procesos de soldadura empleados en esta investigación y teniendo en cuenta el material, las variables de diseño y de operación de la tubería seleccionada bajo el código ASME B31.8 [34], las juntas soldadas no requieren ensayos de tenacidad a la fractura para la calificación de procedimientos y calificación de soldadores por ASME Sección IX [49].

### 3.7.4 Inspección visual

Para validar que una junta soldada cumple con los criterios de aceptación por inspección visual, para calificación de soldadores, se deben tener en cuenta los criterios indicados en el Código ASME Sección IX, Artículo 1, QW-194 [49] que indica:

*“ para calificación de soldadores la junta soldada no deberá mostrar grietas y deben ser juntas de penetración completa con fusión completa entre el metal de aporte y el metal base ”* [49].

Con este criterio no se observa un procedimiento, código o estándar específico referenciado para la inspección visual, el requerimiento principal de aceptación es una junta sin grietas visibles, de penetración completa y de fusión completa.

Una grieta es una discontinuidad que se puede generar en el material de aporte o en el material base, o en ambas zonas, y que se muestra como una discontinuidad lineal generada por una fractura del material, fractura que puede generarse en el proceso de soldadura o inmediatamente después, debido al proceso de solidificación del material después de pasar por altas temperaturas. En otros casos pueden presentarse grietas por condiciones de servicio de la junta soldada.

La falta de penetración en la junta se refiere a la penetración incompleta del metal de soldadura en la raíz de la junta. La falta de fusión es una discontinuidad entre el metal de aporte y el metal base que puede presentarse en la raíz de la soldadura o en la cara del bisel. Un ejemplo de falta de fusión son los socavados.

Las anteriores discontinuidades del material pueden generar disminución de la resistencia mecánica y sirven como zonas de concentración de esfuerzos que pueden llevar a la falla del material según las condiciones de operación o servicio a la que esté sometida la junta soldada.

Los resultados de la inspección visual de las probetas soldadas, para cada uno de los procesos de soldadura, se presentan en la tabla 3-9, en la cual se indica si hay cumplimiento o no con los criterios de aceptación del código ASME:

WPS	Proceso de soldadura	JUNTA	Probeta (junta soldada)	Inspección visual (VT)	Observación
S_01	SMAW	1	S1_R	Aceptado	Reporte JCT-NAL-VT-003
		2	S2_R	Aceptado	Reporte JCT-NAL-VT-004
TS_01	GTAW + SMAW	1	TS1_R	Rechazado	<u>0°-90°:</u> 0°+105 mm - Falta de fusión. 0°+119 mm - Falta de fusión . <u>180°-270°:</u> 180°+150 mm - Falta de fusión (interior). Reporte JCT-NAL-VT-001
		2	TS2_R	Aceptado	Reporte JCT-NAL-VT-002
GF_01	GMAW (MIG) + FCAW	1	GF1_R	Aceptado	<u>180°-270°:</u> 180°+15 mm – Exceso de penetración. No contraviene los criterios de ASME. Se acepta. Reporte JCT-NAL-VT-005 – Rev. 01
		2	GF2_R	Aceptado	Reporte JCT-NAL-VT-006

Tabla 3-9. Resultado de la inspección visual de las juntas soldadas. Según ASME Sección IX Artículo 1, QW-194 [49].

Una vez obtenidos los resultados de la inspección visual se observa que:

- La probeta TS1\_R generada por los procesos GTAW + SMAW aplicados en el WPS TS\_01 fue rechazada debido a la falta de fusión entre el material de aporte y el metal base presentándose tres socavados en la junta soldada. Discontinuidades que van en contra de los criterios de aceptación del código ASME sección IX parte QW-194 [49], el cual indica que debe haber fusión completa pasando de ser discontinuidades a defectos en la soldadura. Es claro que al ser defectos puntuales en toda la longitud del cordón de soldadura se atribuyen a la habilidad del soldador y no al procedimiento de soldadura.

- La probeta GF1\_R generada por los procesos de soldadura GMAW (MIG) + FCAW, aplicados en el WPS GF\_01, se podría considerar rechazada debido al exceso de penetración de la junta soldada que se presentó en un punto específico y no en toda la junta. Es de anotar y prestar especial interés en esta indicación del inspector que realizó la inspección visual, quien a criterio técnico realiza la anotación de la indicación en la junta por el exceso de penetración, pero teniendo en cuenta lo expresado en el código ASME Sección IX parte QW-194 [49] donde:

- Se indica que los criterios de rechazo son claros en la no presencia de grietas, penetración completa, fusión completa entre el metal de aporte y el metal base, los cuales son los criterios mínimos a cumplir de aceptación para la calificación de soldadores.

- Para inspección visual no se indica exceso de penetración como criterio de rechazo según ASME.

Por lo anteriormente expuesto se debe considerar como aceptada la probeta GF1\_R ya que no contraviene lo exigido por el Código ASME Sección IX parte QW-194 [49] en inspección visual para la calificación del soldador. Aceptación dada por el inspector visual.

- Las demás probetas S1\_R, S2\_R, TS2\_R, GF2\_R, fueron aceptadas ya que en la inspección visual no se encontraron discontinuidades que se consideren defectos según ASME Sección IX parte QW-194 [49].

### **3.7.5 Ensayos de dureza**

Aunque el código ASME sección IX [49] no indica requerimientos de ensayos de dureza para calificación de soldadores o para calificación de procedimientos de soldadura realizados bajo el código ASME B31.8 [34], este ensayo se realizó en esta investigación para el análisis metalográfico y la caracterización de las juntas soldadas.

Los ensayos de dureza se realizaron según el estándar ASTM E18 [64], empleando la escala de dureza Rockwell B.

Para identificar en que escala trabajar: A, B, C u otra, del ensayo Rockwell, se empleó el código ASTM A370 [65]. Las tablas 2 y 3 de este código indican la relación de resistencia a la tensión aproximada versus la escala de dureza Rockwell. Para un acero API 5LX65 con resistencia nominal a la tensión de 77600 Psi se debe trabajar en la escala Rockwell B (HR B) según la tabla 3 del Código, ver tabla 3-10.

El equipo empleado para el ensayo de dureza es el durómetro W Testor de la marca Amsler, modelo HT2000, del laboratorio de metalografía de la universidad Nacional de Colombia. Se empleó un indentador de bola de  $\varnothing 1/16$ " con carga de 100Kg.



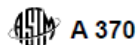


TABLE 3 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels<sup>A</sup> (Rockwell B to Other Hardness Numbers)

Rockwell B Scale, 100-kgf Load 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 60-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength ksi (MPa)
						15T Scale, 15-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	
100	240	240	251	61.5	...	93.1	83.1	72.9	116 (800)
99	234	234	246	60.9	...	92.8	82.5	71.9	114 (785)
98	228	228	241	60.2	...	92.5	81.8	70.9	109 (750)
97	222	222	236	59.5	...	92.1	81.1	69.9	104 (715)
96	216	216	231	58.9	...	91.8	80.4	68.9	102 (705)
95	210	210	226	58.3	...	91.5	79.8	67.9	100 (690)
94	205	205	221	57.6	...	91.2	79.1	66.9	98 (675)
93	200	200	216	57.0	...	90.8	78.4	65.9	94 (650)
92	195	195	211	56.4	...	90.5	77.8	64.8	92 (635)
91	190	190	206	55.8	...	90.2	77.1	63.8	90 (620)
90	185	185	201	55.2	...	89.9	76.4	62.8	89 (615)
89	180	180	196	54.6	...	89.5	75.8	61.8	88 (605)
88	176	176	192	54.0	...	89.2	75.1	60.8	86 (590)
87	172	172	188	53.4	...	88.9	74.4	59.8	84 (580)
86	169	169	184	52.8	...	88.6	73.8	58.8	83 (570)
85	165	165	180	52.3	...	88.2	73.1	57.8	82 (565)
84	162	162	176	51.7	...	87.9	72.4	56.8	81 (560)
83	159	159	173	51.1	...	87.6	71.8	55.8	80 (550)
82	156	156	170	50.6	...	87.3	71.1	54.8	77 (530)
81	153	153	167	50.0	...	86.9	70.4	53.8	73 (505)
80	150	150	164	49.5	...	86.6	69.7	52.8	72 (495)
79	147	147	161	48.9	...	86.3	69.1	51.8	70 (485)
78	144	144	158	48.4	...	86.0	68.4	50.8	69 (475)
77	141	141	155	47.9	...	85.6	67.7	49.8	68 (470)
76	139	139	152	47.3	...	85.3	67.1	48.8	67 (460)
75	137	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	66 (455)
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	65 (450)
73	132	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	64 (440)
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	63 (435)
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	62 (425)
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	61 (420)
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	60 (415)

Tabla 3-10. Relación entre dureza y resistencia a la tensión aproximada para aceros no austeníticos. Tabla 3 de ASTM A370 [65].

En la Figura 3-38 se observa la cantidad de indentaciones de dureza realizadas en las probetas por cada una de las zonas de la junta soldada. En la tabla 3-11 se consigan los valores de dureza HRB medidos en las zonas de cada probeta extraída de los cupones soldados por medio de los WPS en estudio, total seis probetas. En la tabla 3-12 se presentan los promedios de dureza HRB de las probetas por cada WPS: S\_01, TS\_01, GF\_01. El valor se obtiene de promediar las durezas tomadas en cada zona de la junta soldada: metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC), metal de soldadura o metal de aporte (MS). En cada zona se realizaron 2,4,6,4,2 indentaciones respectivamente.

En la Figura de la figura 3-39 se presenta la curva de durezas basado en la tabla 3-12, en la cual se identifica la distribución de durezas en cada una de las zonas de los cupones soldados.

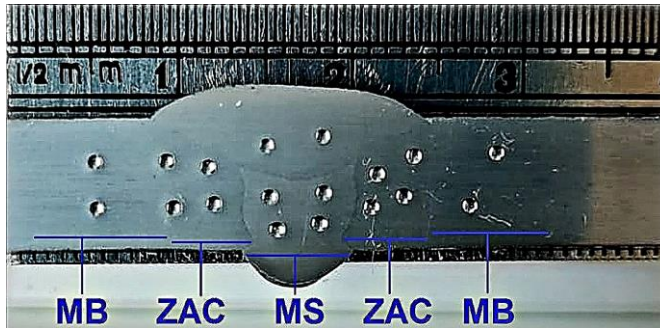


Figura 3-38 Indentaciones de dureza HRB realizadas por cada zona de la junta soldada.

WPS	Procesos empleados	Junta (cupón soldado)	PROBETA para Dureza	DUREZA – HRB (Medición directa)							
				MB	ZAC		MS	ZAC		MB	
					Grano fino	Grano grueso		Grano grueso	Grano fino		
S_01	SMAW	1	S1-D1	92	85	87	89	86	88	83	92
				93	84	85	86	87	83	83	93
				-	-	-	87	87	-	-	-
		2	S2-D1	90	85	88	86	88	87	83	91
				89	82	86	83	82	83	81	92
				-	-	-	82	84	-	-	-
TS_01	GTAW+ SMAW	1	TS1-D1	91	81	84	86	87	86	-	91
				92	-	81	84	86	85	82	92
				-	-	-	82	83	-	-	-
		2	TS2-D1	87	83	84	84	84	83	81	90
				90	80	82	83	83	82	78*	89
				-	-	-	71*	77*	-	-	-
GF_01	GMAW+ FCAW	1	GF1-D1	88	85	88	92	92	87	83	86
				92	85	89	91	92	88	84	91
				-	-	-	-	86	-	-	-
		2	GF2-D1	91	86	88	93	92	86	85	90
				92	85	86	85	84	85	84	92
				-	-	-	83	83	-	-	-

\*: Valores bajos descartados por cercanía al borde de la probeta.

Tabla 3-11. Dureza HRB de las zonas MB, ZAC, MS, de cada probeta extraída de los cupones soldados.

WPS	Procesos empleados	Junta (cupón soldado)	PROBETA para Dureza	DUREZA PROMEDIO- HRB									Promedio General de la junta-HRB
				Zona de la junta soldada					Promedios - HRB				
				MB	ZAC	MS	ZAC	MB	MB	ZAC	MS		
S_01	SMAW	1	S1-D1	92,5	85,25	87,0	84,3	92,5	92,5	84,8	87,0	88,1	
		2	S2-D1	89,5	85,25	84,2	83,5	91,5	90,5	84,4	84,2	86,3	
TS_01	GTAW+ SMAW	1	TS1-D1	91,5	82,0	84,7	84,3	91,5	91,5	83,2	84,7	86,4	
		2	TS2-D1	88,5	82,3	83,5	82,0	89,5	89,0	82,1	83,5	84,9	
GF_01	GMAW+ FCAW	1	GF1-D1	90,0	86,75	90,6	85,5	88,5	89,25	86,1	90,6	88,7	
		2	GF2-D1	91,5	86,25	86,7	85,0	91,0	91,25	85,6	86,7	87,8	

Tabla 3-12. Dureza HRB promedio de cada probeta para los WPS S\_01, TS\_01, GF\_01.

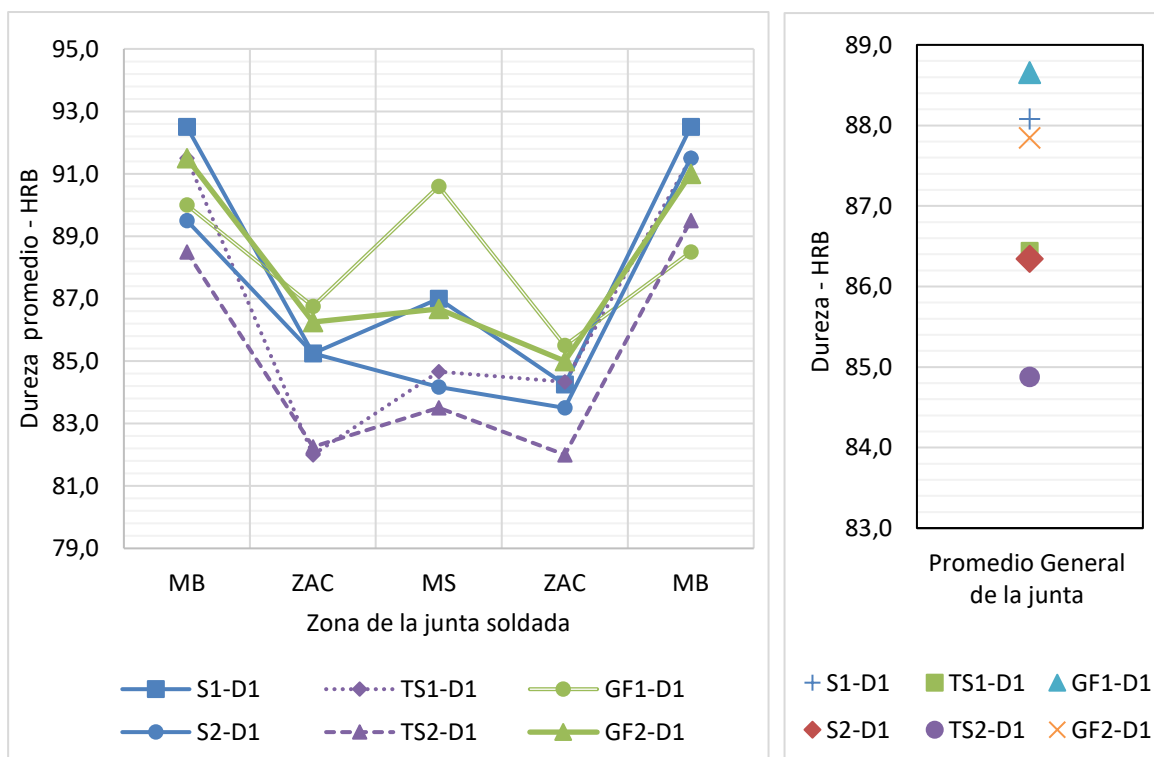


Figura 3-39. Curva de durezas HRB de probetas realizada por cada WPS S\_01, TS\_01, GF\_01.

De los resultados indicados en la tabla 3-12, los menores valores de dureza (82HRB) se encontraron en la ZAC de las probetas TS1-D1 y TS2-D1 del WPS TS\_01. La mayor dureza (92,5 HRB) se presenta en el metal base de la probeta S1-D1 del WPS S\_01. La

figura 3-39 muestra comportamientos típicos en “W” para de la dureza de todas las probetas ensayadas, en la mayoría de las probetas la dureza en el MB fue mayor que las otras zonas, las zonas con menor dureza fueron las ZAC a ambos lados del metal de soldadura mientras que la dureza en el MS generalmente se mantuvo entre la dureza del MB y la dureza de la ZAC. La probeta GF1-D1 del WPS GF\_01 tuvo la mayor dureza general promedio de las probetas realizadas, mientras que la probeta TS2-D1 realizada con el WPS TS\_01 tuvo el menor valor.

Como se observa en la figura 3-39, las juntas soldadas con:

- el WPS GF\_01 (probetas GF1-D1 y GF2-D1) generó los mayores valores de dureza.
- el WPS S\_01 (probetas S1-D1 y S2-D1) generó los valores de dureza medios.
- el WPS TS\_01 (probetas TS1-D1 y TS2-D1) generó los menores valores de dureza.

Al hacer un análisis más detallado del comportamiento de la dureza en la ZAC de cada probeta, en la ZAC de grano grueso (GG) y en la ZAC de grano fino (GF), se tienen los resultados dados en la tabla 3-13 y Figura 3-40. Como se observa en la figura 3-38, se realizaron cuatro indentaciones en la ZAC a cada lado del MS (dos para ZAC de grano grueso y dos para ZAC de grano fino, por zona), ver figura 3-41.

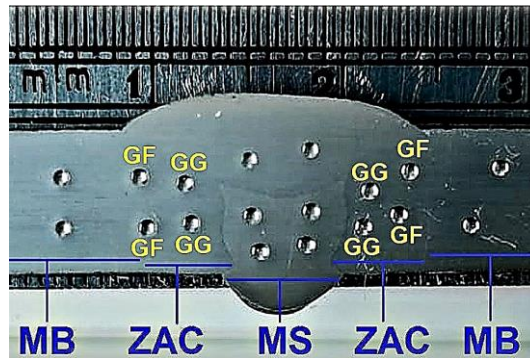


Figura 3-41. Ubicación de indentaciones para dureza HRB en la ZAC de grano grueso (GG) y en la ZAC de grano fino (GF).

WPS	Procesos empleados	Junta (cupón soldado)	PROBETA para Dureza	DUREZA PROMEDIO- HRB	
				ZAC de Grano Fino	ZAC de Grano Grueso
S_01	SMAW	1	S1-D1	83,8	85,8
		2	S2-D1	82,8	86,0
TS_01	GTAW+ SMAW	1	TS1-D1	81,5	84,0
		2	TS2-D1	81,3	82,8
GF_01	GMAW+ FCAW	1	GF1-D1	84,3	88,0
		2	GF2-D1	85,0	86,3

Tabla 3-13. Durezas HRB promedio en la ZAC-GF y en la ZAC-GG por cada WPS.

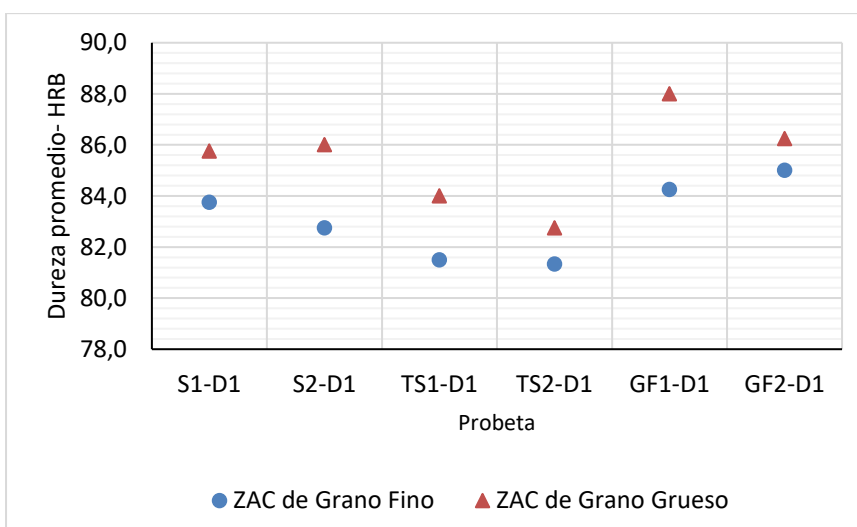


Figura 3-40. Durezas promedio HRB en la ZAC de grano fino (GF) y en la ZAC de grano grueso (GG) por cada probeta de los WPS.

Los resultados muestran que la dureza en la ZAC de grano fino es menor que en la ZAC de grano grueso en todos los procesos de soldadura empleados, esto se analizará en las mediciones de microdureza realizadas en cada una de estas zonas para cada WPS en estudio.

Para líneas de servicio que transportará gas agrio (gas con altos contenidos de ácido sulfhídrico H<sub>2</sub>S), no objeto de esta investigación, en la sección B823.2.4 del código ASME

B31.8 [34] se indica el requerimiento máximo de dureza de 250 HV en el metal de soldadura y en la ZAC. Lo anterior aplica para calificación de procedimientos de soldadura y de soldadores para líneas de servicio con gas agrio. En cualquier caso los resultados de dureza de las zonas soldadas en esta investigación están por debajo de este valor. El máximo valor de dureza medido fue 93 HRB (205 HV), ver Tablas 3-11 y 3-13.

### **3.7.6 Ensayos de Microdureza**

Aunque el código ASME sección IX [49] no indica requerimientos de ensayos de microdureza para calificación de soldadores o para calificación de procedimientos de soldadura realizados bajo el código ASME B31.8 [34], este ensayo se realizó en esta investigación para el análisis metalográfico y la caracterización de las juntas soldadas.

Los ensayos de microdureza se realizaron teniendo en cuenta el estándar ASTM E384 [66] donde se indica el método para realizar los ensayos de microdureza Vickers. El rango de carga para esta prueba micro va desde 1 hasta 1000 gf según el estándar.

La carga empleada para realizar las pruebas de microdureza fueron 475 gf. El tiempo de aplicación de la fuerza fueron 10 segundos según parágrafo 8.6.2 del estándar ASTM E384 [66].

El equipo empleado para el ensayo de microdureza Vickers fue el durómetro de la marca LECO, modelo M-400-G2, del laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional de Colombia.

En la Figura 3-42 se observa la cantidad y ubicación de indentaciones realizadas para medición de microdureza. En cada probeta se midió microdureza Vickers (HV) para las zonas de metal base (MB), ZAC de grano grueso (ZAC GG), ZAC de grano fino (ZAC GF) y metal de soldadura (MS) de las juntas soldadas por cada WPS empleado: S\_01, GF\_01, TS\_01, dos probetas por cada WPS.

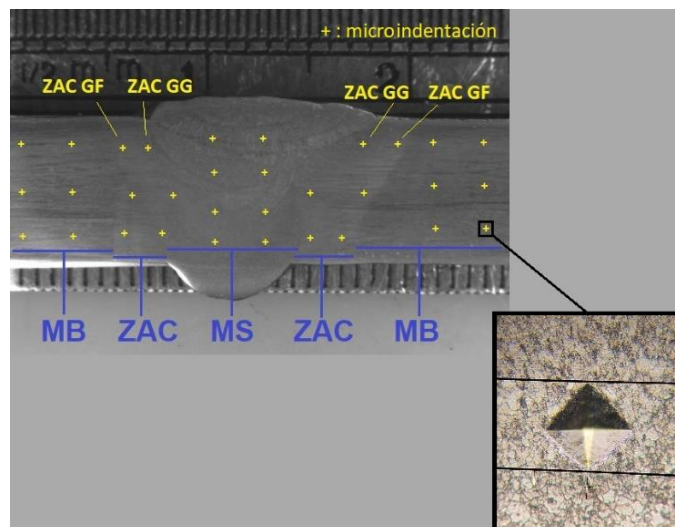


Figura 3-42. Ubicación de indentaciones realizadas para medición de microdureza Vickers HV.

Los valores de microdureza en cada zona de la junta soldada, por cada probeta y WPS, se presentan en la tabla 3-14. En la figura 3-43 se observa la distribución por cada cupón soldado.

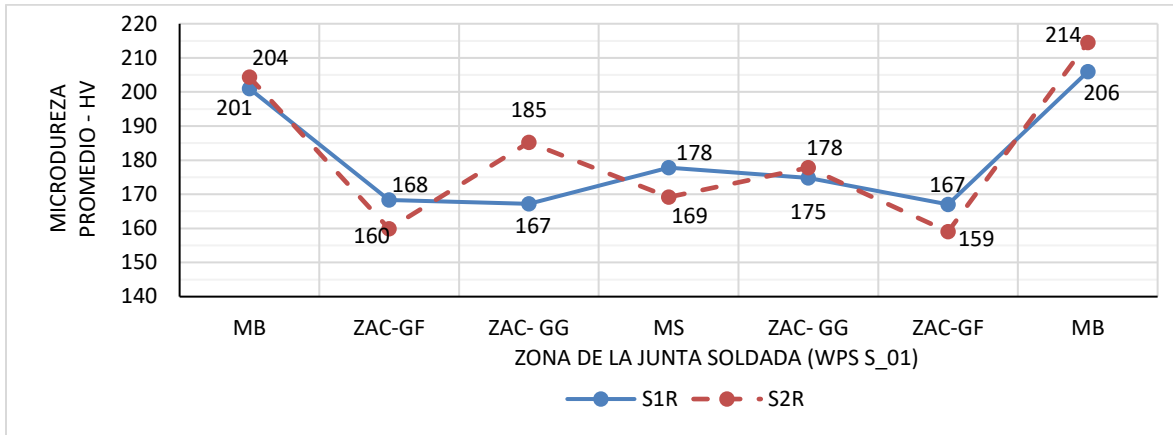
WPS	Procesos	Junta soldada (Cupón)	Probeta	Zona de la junta soldada						
				MB	ZAC-GF	ZAC-GG	MS	ZAC-GG	ZAC-GF	MB
				Microdureza promedio - HV						
S_01	SMAW	1	S1R	201	168	167	178	175	167	206
		2	S2R	204	160	185	169	178	159	214
TS_01	GTAW + SMAW	1	TS1	213	169	182	181	179	174	215
		2	TS2	213	166	181	178	180	150	208
GF_01	GMAW + FCAW	1	GF1	197	172	188	201	194	175	203
		2	GF2	207	171	191	197	198	184	202

(a)

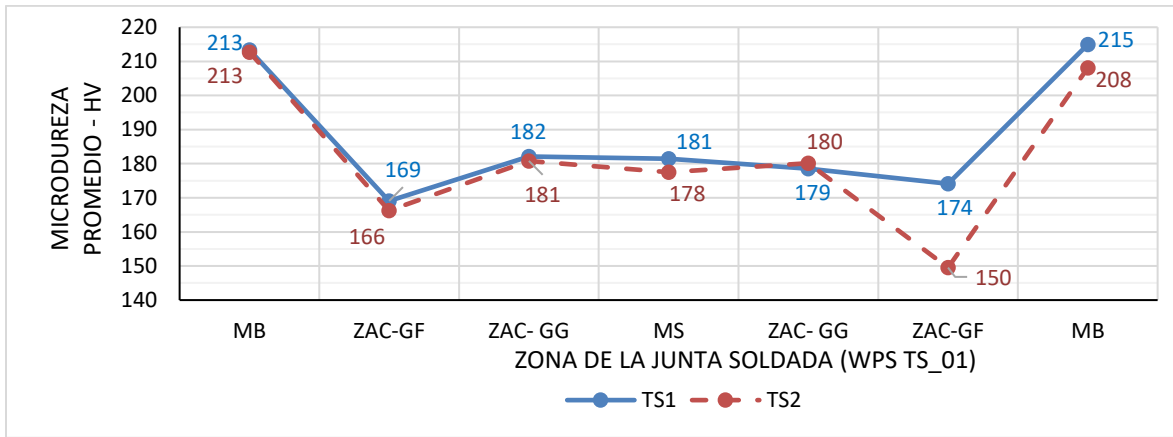
WPS	Procesos	Junta soldada (Cupón)	Probeta	Microdureza HV promedio por probeta	Microdureza HV promedio por WPS
S_01	SMAW	1	S1R	180	181
		2	S2R	181	
TS_01	GTAW + SMAW	1	TS1	188	185
		2	TS2	182	
GF_01	GMAW + FCAW	1	GF1	190	191
		2	GF2	193	

(b)

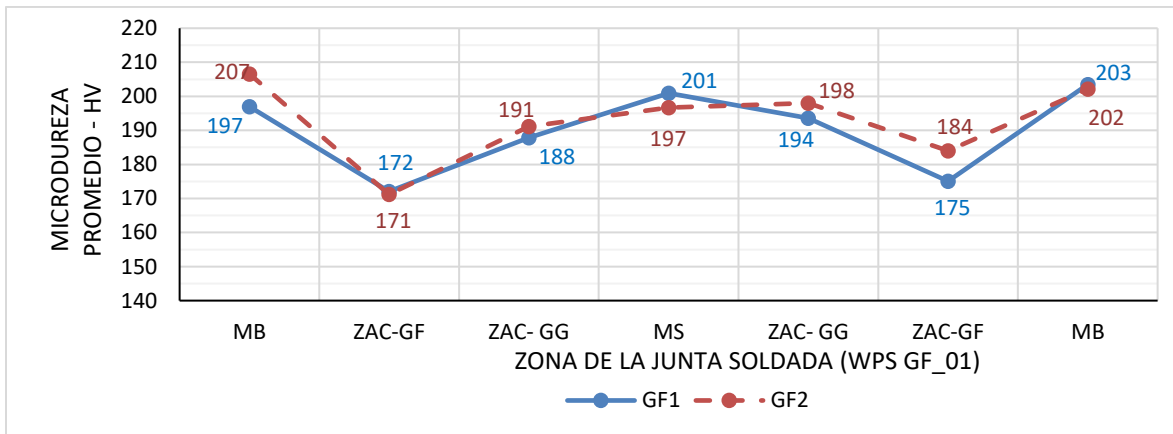
Tabla 3-14. Microdureza HV promedio para cada zona de la junta soldada (a), por cada probeta realiza y cada WPS diseñado (b).



a) WPS S\_01



b) WPS TS\_01

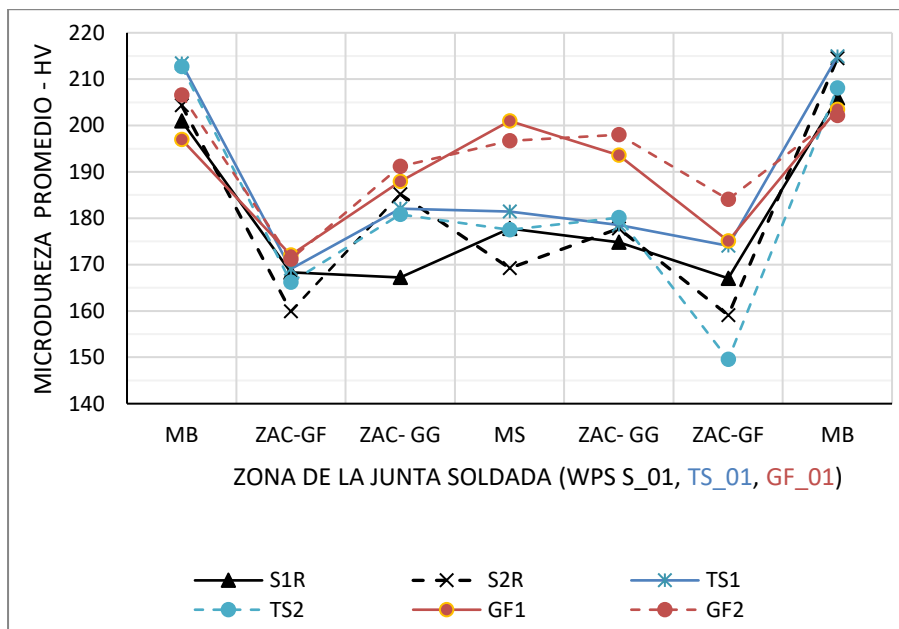


c) WPS GF\_01

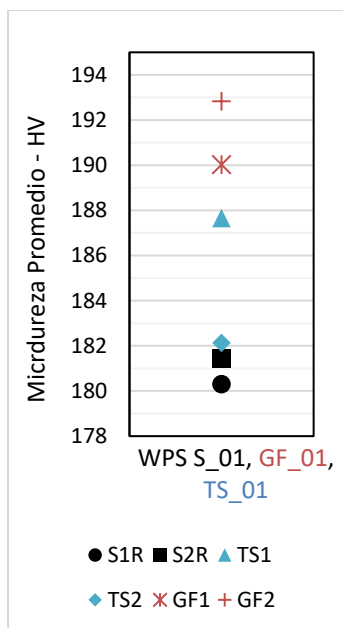
Figura 3-43. Microdureza Vickers HV por cada WPS empleado. Se realizan dos juntas o probetas por WPS.



En la figura 3-44 se observa la comparación directa de la microdureza para todas las probetas soldadas.



a) microdureza HV por zona de la junta soldada, por probeta de cada WPS.



b) Microdureza HV promedio de toda la junta soldada.

Figura 3-44. Comparación directa de microdureza para cada probeta soldada por WPS.

De la tabla 3-14 y figura 3-44 se puede concluir que el metal base (MB) tiene los mayores valores de microdureza HV para todas las probetas. Los menores valores se encuentran en la zona afectada por el calor de grano fino (ZAC-GF) a excepción de la probeta S1R con el menor valor en la zona afectada por el calor de grano grueso (ZAC-GG).

Teniendo en cuenta los valores de microdureza promedio por WPS, indicados en la tabla 3-14, frente a la resistencia a la tensión promedio de cada WPS, dados en la tabla 3-6, se encuentra una relación directa de microdureza frente a resistencia. Como se observa en la tabla 3-15 y figura 3-45, entre mayor microdureza promedio mayor es la resistencia del material. Se observa la tendencia lineal con valor del coeficiente de determinación cercano a 1, que indica poder realizar predicciones de resistencia a la tensión Vs microdureza para el material objeto de esta investigación. Para próximas investigaciones, se sugiere realizar mayor cantidad de ensayos buscando tener mayor población de la muestra para predicciones estadísticamente más certeras.

El WPS S\_01 obtuvo los menores valores de microdureza y resistencia promedio, mientras que el WPS GF\_01 tiene el mejor comportamiento con los valores más altos de microdureza y resistencia. El WPS TS\_01 tiene los valores medios.

WPS	Procesos	Microdureza promedio por WPS	Resistencia a la tensión promedio (Psi)
S_01	SMAW	181	84016
TS_01	GTAW + SMAW	185	85449
GF_01	GMAW + FCAW	191	87960

Tabla 3-15. Microdureza y resistencia a la tensión promedios por WPS.

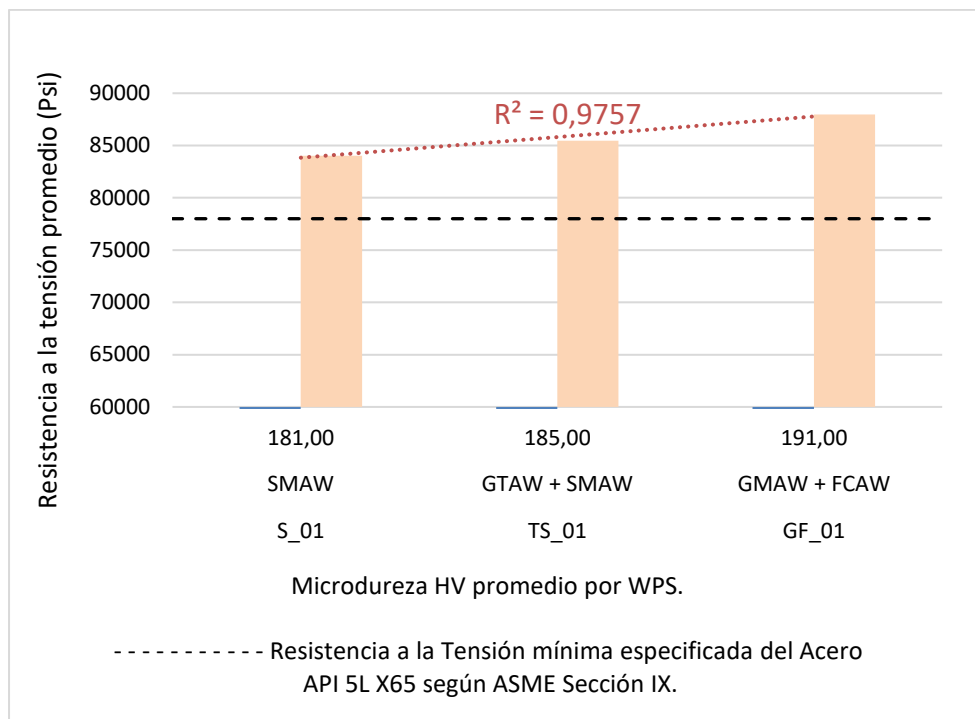


Figura 3-45. Microdureza HV promedio Vs resistencia a la tensión de los WPS diseñados.

En la tabla 3.16 y la figura 3-46 se observa la relación de microdureza frente a la dimensión de la ZAC medida directamente y frente a la entrada de calor calculada para cada proceso mixto aplicado (ver sección 3.6 Dimensiones de las ZAC).

En la figura 3-46 se observa que el WPS S\_01 con los menores valores de microdureza (180 y 181 HV), obtuvo también la menor entrada de calor calculada, mientras que el WPS GF\_01 con los mayores valores de microdureza obtuvo los valores promedio altos de entrada de calor. El WPS TS\_01 es el proceso que presenta más variabilidad en los datos con alta entrada de calor calculada frente a las menores dimensiones de la ZAC medidas directamente. Este proceso WPS TS\_01 al buscar un modelo de regresión lineal genera que el coeficiente de determinación  $R^2$  tenga valores bajos haciendo que no sea predecible un valor de respuesta de entrada de calor frente a valores de microdureza.

WPS	Procesos	Junta soldada (Cupón)	Microdureza promedio de la probeta. HV	ZAC Promedio por junta. Medición directa. (mm)	Entrada de calor promedio por junta (J/mm)
S_01	SMAW	S1R	180	3,73	988,12
		S2R	181	3,86	970,32
TS_01	GTAW + SMAW	TS1	188	2,53	1375,00
		TS2	182	3,26	1818,15
GF_01	GMAW + FCAW	GF1	190	6,90	1461,51
		GF2	193	4,99	1495,89

Tabla 3-16. Microdureza HV promedio, dimensiones de la ZAC y entrada de calor.

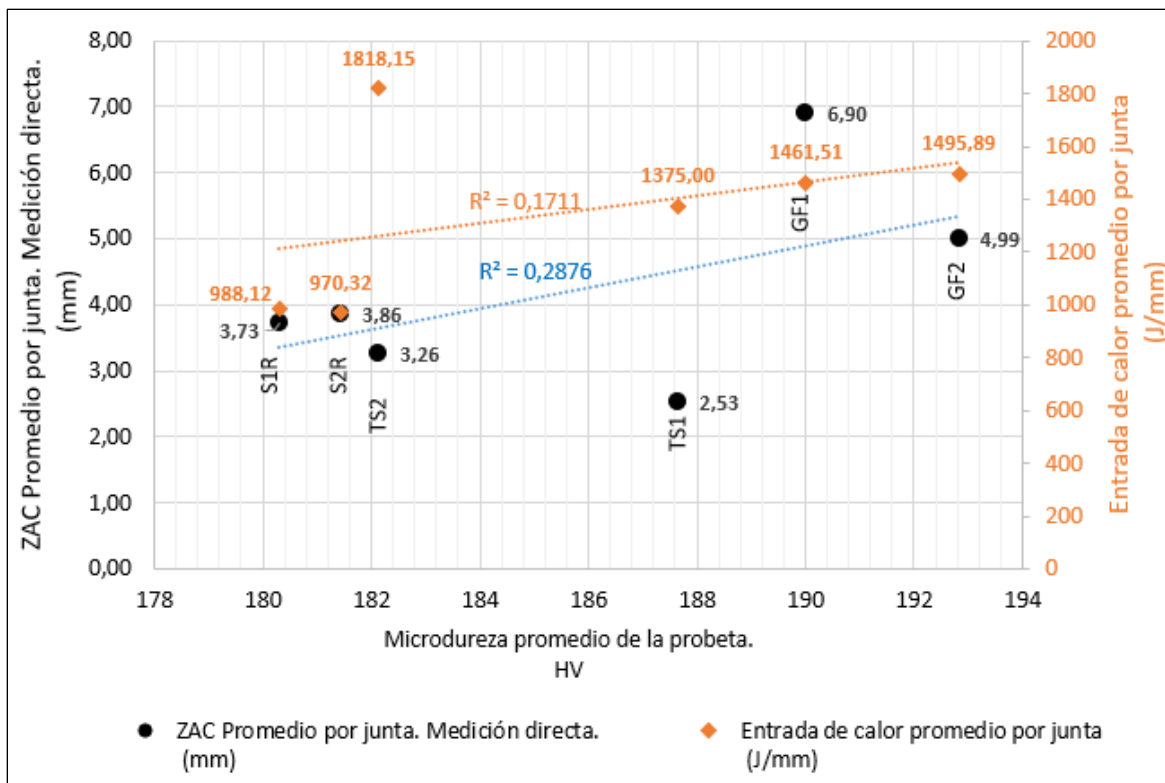


Figura 3-46. Relación de microdureza HV frente a la dimensión de la ZAC y la entrada de calor.

### 3.7.7 Tamaño de grano

Aunque el código ASME sección IX [49] no indica requerimientos para tamaño de grano en procesos de soldadura para tuberías bajo el código ASME B31.8 [34], este ensayo se realizó en esta investigación para el análisis metalográfico y la caracterización de las juntas soldadas.

La medición del tamaño de grano promedio se realizó en las zonas de grano fino y grano grueso de la zona afectada por el calor (ZAC) de cada junta soldada. En los procesos mixtos GF1 y TS1 se realizó la medición en las ZAC asociadas al cordón inferior y al cordón superior de la junta. Las mediciones se realizaron sobre las micrografías tomadas por microscopía óptica a 1000X.

Un material que presenta menor tamaño de grano tiene mayor resistencia mecánica debido a que la mayor cantidad de límites de grano presente impiden el movimiento de las dislocaciones.

Con el valor promedio del diámetro de grano  $\bar{d}$ , medido por el procedimiento de intersección lineal para esta investigación, se selecciona el correspondiente No.G para el tamaño de grano basado en la tabla 4 del estándar ASTM E112 [67] en la cual se relaciona el tamaño de grano No.G para granos equiaxiales, uniformes y orientados aleatoriamente.

La tabla del estándar indica la relación del diámetro promedio del tamaño de grano  $\bar{d}$ , medido en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), con la designación No.G del ASTM. Números G que van desde G 00, para los granos más grandes ( $\bar{d} = 508.0 \mu\text{m}$ ), hasta G 14.0 para los granos más pequeños ( $\bar{d} = 2.8 \mu\text{m}$ ). Ver tabla 3-17, columna  $\bar{d}$  *Diámetro promedio*. La tabla también relaciona otros parámetros para medir el tamaño de grano como lo son: el número de granos por unidad de área, el área promedio del grano, longitud de intercepto lineal media del grano y número de interceptos por unidad de longitud.

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{D}$ Average Diameter		$\bar{L}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Tabla 3-17. Relación del tamaño de grano con el No G. Tabla 4 tomada del estándar ASTM E112 [67].

Zona de medición por probeta (a 1000X)	Tamaño de grano en metal base API5L X65					
	GF1 R_ MB	GF2 R_ MB	S1R_MB (IZQ DEL MS)	S1R (2) - MB (IZQ DEL MS)	TS1 R_MB (IZQ DEL MS)	TS2 R_MB
METAL BASE Diámetro promedio de grano, $\bar{d}$ (μm)	4,27	4,09	3,23	3,71	4,09	4,26
Tamaño de grano ASTM No.G	13	13	13,5	13	13	13

Tabla 3-18. Diámetro promedio de grano del metal base acero API5L X65 y el correspondiente número G.

En la Tabla 3-18, se observa que el material base presenta tamaños de grano pequeño, con tamaños de grano menor a los presentados en la ZAC de las probetas soldadas como se verá más adelante.

El diámetro promedio de grano  $\bar{d}$  y el correspondiente tamaño de grano No. G se presenta en las tablas 3-19, 3-20 y 3-21 para cada uno de los procesos de soldadura empleados.

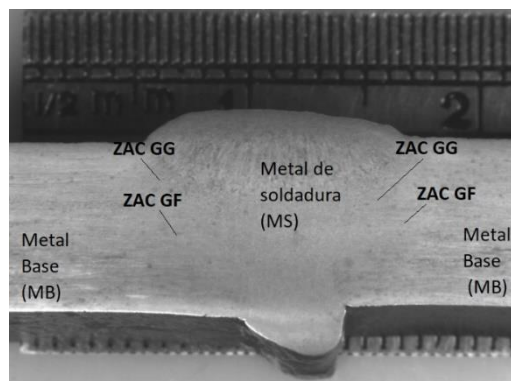


Figura 3-47. Zonas de la probeta S1R.

Zona de medición (a 1000X)	Probeta S1R (proceso SMAW)		
	ZAC GRANO FINO (IZQ DEL MS)	ZAC GRANO GRUESO (IZQ DEL MS)	MS CENTRO
Diámetro promedio de grano, $\bar{d}$ ( $\mu\text{m}$ )	6,47	8,70	6,90
Tamaño de grano ASTM No.G	11,5	10,5	11,5

Tabla 3-19. Diámetro promedio de grano en la ZAC y el correspondiente número G. Probeta S1R.

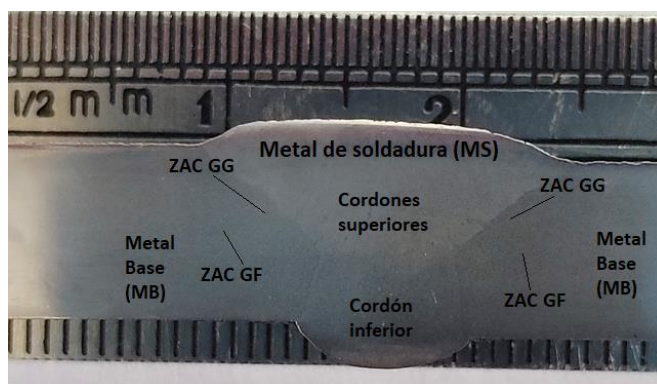


Figura 3-48. Zonas de la probeta GF1 R.

Zona de medición (a 1000X)	Probeta GF1 R (procesos GMAW+FCAW)			
	ZAC GRANO FINO (CORDON INFERIOR)	ZAC GRANO FINO (CORDON SUPERIOR)	ZAC GRANO GRUESO (CORDON INFERIOR)	ZAC GRANO GRUESO (CORDON SUPERIOR)
Diámetro promedio de grano, $\bar{d}$ ( $\mu\text{m}$ )	5,71	3,33	6,25	8,70
Tamaño de grano ASTM No.G	12	13,5	11,5	10,5

Tabla 3-20. Diámetro promedio de grano en la ZAC y el correspondiente número G. Probeta GF1R

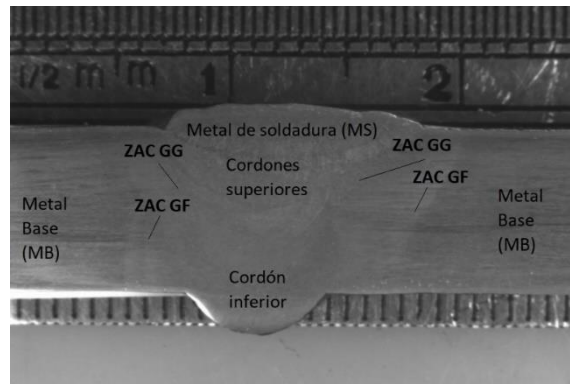


Figura 3-49. Zonas de la probeta TS1 R.

Zona de medición (a 1000X)	Probeta TS1 R (procesos GTAW+SMAW)			
	ZAC GRANO FINO (CORDON INFERIOR)	ZAC GRANO FINO (CORDON SUPERIOR)	ZAC GRANO GRUESO (CORDON INFERIOR)	ZAC GRANO GRUESO (CORDON SUPERIOR)
Diámetro promedio de grano, $\bar{d}$ ( $\mu\text{m}$ )	5,41	4,26	5,26	5,26
Tamaño de grano ASTM No.G	12	13	12	12

Tabla 3-21. Diámetro promedio de grano en la ZAC y el correspondiente número G. Probeta TS1R

En la Tabla 3-22 se presenta el consolidado de tamaños de grano promedio de las tablas 3-18, 3-19, 3-20,3-21. La representación gráfica de las diferencias del tamaño de grano se muestra en la figura 3-50.



Ubicación	Zona de medición tamaño de grano	Diámetro promedio de grano ( $\mu\text{m}$ )	Diámetro de grano promedio por proceso en <b>metal base</b> y por <b>ZAC GF</b> o <b>ZAC GG</b> en las probetas. ( $\mu\text{m}$ )
METAL BASE	METAL BASE _ S1R	3,23	3,47
	METAL BASE _ S1R (2)	3,71	
	METAL BASE _ GF1 R	4,27	4,18
	METAL BASE _ GF2 R	4,09	
	METAL BASE _ TS1 R	4,09	4,18
	METAL BASE _ TS2 R	4,26	
Pro-beta S1R	S1R _ ZAC GF	6,47	6,47
	S1R _ ZAC GG	8,70	8,70
	S1R _ MS	6,90	6,90
Pro-beta GF1 R	GF1 R _ ZAC GF (CORDON INFERIOR)	5,71	4,52
	GF1 R _ ZAC GF (CORDON SUPERIOR)	3,33	
	GF1 R _ ZAC GG (CORDON INFERIOR)	6,25	7,47
	GF1 R _ ZAC GG (CORDON SUPERIOR)	8,70	
Pro-beta TS1 R	TS1 R _ ZAC GF (CORDON INFERIOR)	5,41	4,83
	TS1 R _ ZAC GF (CORDON SUPERIOR)	4,26	
	TS1 R _ ZAC GG (CORDON INFERIOR)	5,26	5,26
	TS1 R _ ZAC GG (CORDON SUPERIOR)	5,26	

Tabla 3-22. Diámetro promedio de grano del metal base acero API5L X65 y el correspondiente número G.

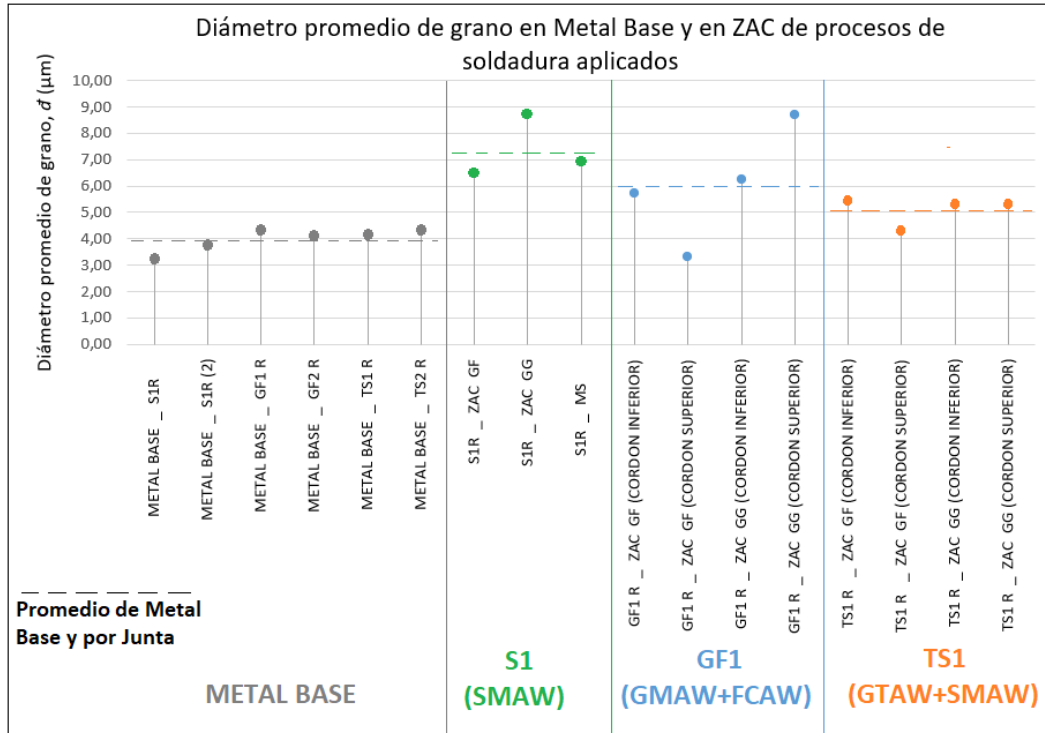


Figura 3-50. Tamaño de grano en Metal Base y en las ZAC.

Analizando la ZAC de cada junta soldada se encuentra que el proceso de soldadura GF1 tiene los granos más pequeños ( $\bar{d} = 3.33 \mu\text{m}$ ) con tamaño de grano No. G 13.5, ubicados en la ZAC de grano fino asociada al cordón superior.

Los procesos GF1 y S1 presentaron los granos más grandes ( $\bar{d} = 8.70 \mu\text{m}$ ) con tamaño de grano No. G 10.5, ubicados en la ZAC de grano grueso asociada al cordón superior del proceso GF1 y en la ZAC de grano grueso del proceso S1.

En todas las juntas soldadas se observó que el tamaño de grano es mayor en la ZAC de grano grueso que en la ZAC de grano fino.

Aunque en las ZAC se generan procesos de recristalización presentando ferrita con morfologías mixtas equiaxiales y aciculares complejas, estos procesos no logran generar refinamiento de grano con tamaños promedio menores al del material base. En el material base como se observa en la Figura 3-50 tiene granos más homogéneos que los granos de

las demás zonas de la junta soldada, esto es una indicación de la complejidad en transformaciones microestructurales en la ZAC aplicando procesos mixtos de soldadura.

Realizando el análisis general de tamaño de grano de las microestructuras presentes frente a la microdureza HV del material, con valores promedios, se encuentran los resultados indicados en la tabla 3-23. Se observa en las ZAC de las juntas que las microestructuras con tamaño de grano grueso están cercanas a la línea de fusión y de grano fino cercanas al metal base. Sin embargo, aunque se espera que al tener mayor tamaño de grano se tenga menor dureza, ya que hay más libertad para desplazamiento de las dislocaciones, en algunas zonas no se observa esta condición.

En la Figura 3-51 se observa tendencia lineal de forma general pero puntualmente, para las probetas ensayadas, en las ZAC no se cumple la relación de menor tamaño grano frente a mayor dureza, esto puede ser debido a los diferentes tratamientos térmicos generados por los procesos de soldadura mixtos aplicados. En la figura se observa que la zona que está dentro de esta relación (menor tamaño de grano Vs mayor dureza) es el metal base, debido a que es un material homogéneo no afectado por los procesos térmicos de soldadura y que tiene el menor tamaño de grano con los mayores valores de microdureza HV.

Apartándose del metal base y teniendo en cuenta solo las ZAC por ser las zonas más críticas, la junta soldada con mejor relación menor tamaño de grano Vs mayor dureza HV es el proceso TS1 R .

Zona de medición tamaño de grano a 1000X)	Diámetro de grano promedio por proceso en metal base y por ZAC GF o ZAC GG en las probetas. (µm)	Microdureza promedio por zona (HV)
METAL BASE _ S1	3,23	206
METAL BASE _ GF	4,27	202
METAL BASE _ TS	4,09	214
S1R _ ZAC GF	6,47	168
S1R _ ZAC GG	8,70	171
S1R _ MS	6,90	178
GF1 R _ ZAC GF	5,71	174
GF1 R _ ZAC GG	6,25	191
TS1 R _ ZAC GF	5,41	172
TS1 R _ ZAC GG	5,26	180

Tabla 3-23. Diámetro promedio de grano por zona de la junta soldada Vs microdureza.

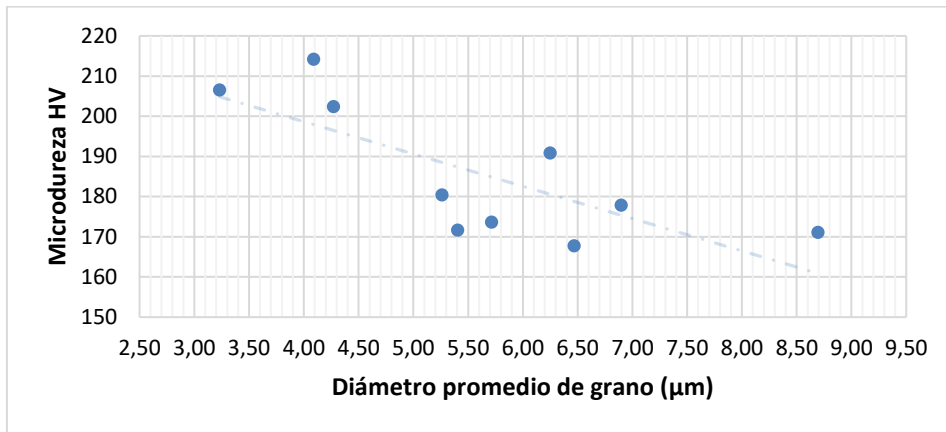


Figura 3-51. Diámetro promedio de grano Vs microdureza.

Para hallar la relación de tamaño de grano frente al esfuerzo de fluencia de las juntas soldadas se empleará la relación de Hall Petch [69][70] (ecuación 3-6). Los valores de resistencia a la fluencia promedio y los tamaños de grano promedio de cada junta se muestran en la tabla 3-24 y se grafican en la Figura 3-52.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{EC.3-6})$$

$\sigma_y$ : límite elástico

$\sigma_0$ : es una constante de materiales

$k_y$ : es el coeficiente de refuerzo (constante específica de cada material)

$d$ : es el diámetro medio del grano

	$d^{-1/2}$ promedio ( $\mu\text{m}^{-1/2}$ )	Esfuerzo de Fluencia 0,2% - promedio (Psi)
METAL BASE _ S1R	0,54	88401
METAL BASE _ GF1 R	0,49	86776
METAL BASE _ TS1 R	0,49	85607
S1R	0,37	65164
GF1 R	0,43	67519
TS1 R	0,45	65142

Tabla 3-24. Variables de la relación Hall Petch: Tamaño de grano y esfuerzo de fluencia del material para cada junta soldada

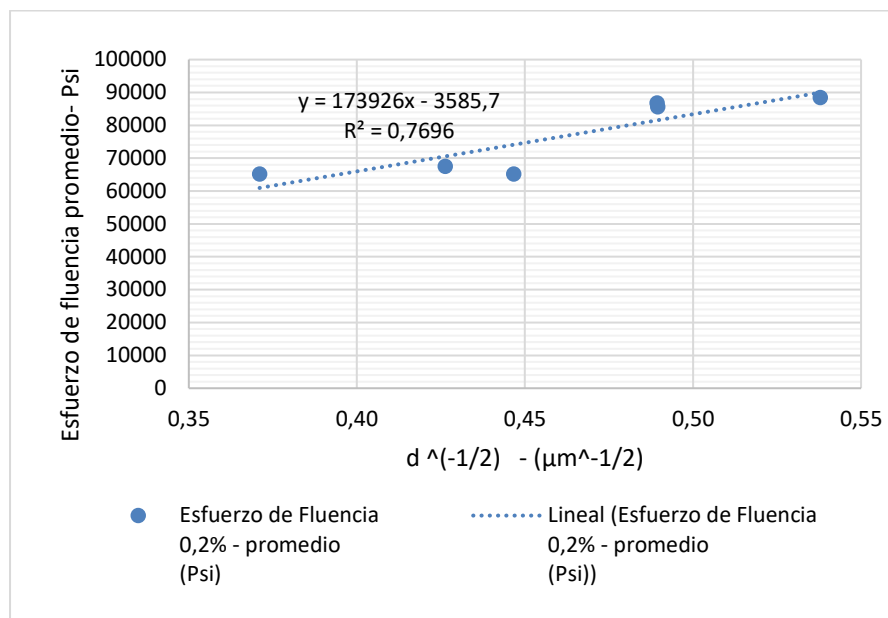
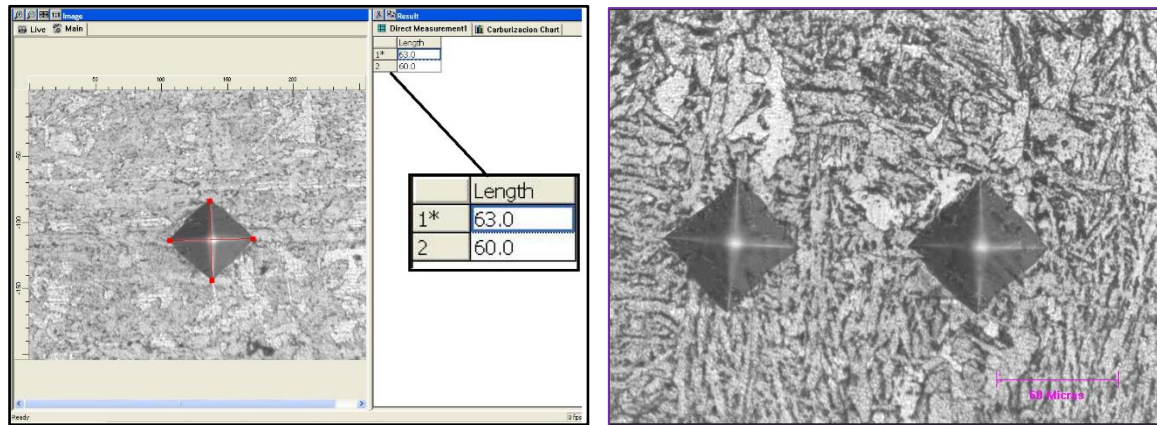


Figura 3-52. Relación tamaño de grano/ esfuerzo de fluencia para juntas soldadas.

Realizando la regresión lineal se observan valores de las constantes  $\sigma_0 = 3585.7$  y  $k_y = 173926$ , valores no acordes a la forma de la función de Hall Petch (ecuación 3-6) ya que indica que para un grano con tamaño muy grande el esfuerzo de fluencia sería 3585.7 Psi y extrapolando la línea de la gráfica da como resultado 57.000 Psi. Los datos de tamaño de grano tienen gran variabilidad en las juntas soldadas realizadas debido a que los granos tienen dimensiones muy diferentes, dependiendo de la zona de la junta soldada donde se midan. Para encontrar relaciones ajustadas a la relación de Hall Petch se debe trabajar con materiales con tendencia homogénea, caso contrario lo que sucede en el análisis de juntas soldadas con variación de procesos de soldadura y diferentes zonas relacionadas a tamaño de grano (metal base, ZAC-GG, ZAC-GF, zonas de transición, metal de aporte).

Al tener tamaños de grano promedio menores a  $9.00 \mu\text{m}$ , los valores de microdureza son representativos de una zona, más no de un tamaño de grano puntual. Esto se puede explicar teniendo en cuenta las dimensiones de la huella del indentador para realizar mediciones de microdureza HV. El indentador generó huellas mayores a  $60 \mu\text{m}$  como se observa en la figura 3-53 (a), por lo cual las mediciones de microdureza en las ZAC pueden variar dependiendo de la ubicación exacta de la indentación realizada ya que en  $60 \mu\text{m}$  caben granos con tamaños diferenciales como se observa en la figura 3-53 (b). Realizar

análisis promedio en una zona para tamaños de grano y microdureza se encuentra valido para esta investigación. Realizar análisis para tamaños de grano y microdureza analizando solo las características de un grano no es válido para esta investigación y es un tema para próximas investigaciones empleando nanoindentación.



(a)

(b) Línea de escala 60  $\mu\text{m}$ 

Figura 3-53. Huella, en  $\mu\text{m}$ , generada por el indentador para el ensayo de microdureza HV(a). Zona afectada por la indentación (b).

En la tabla 3-25 se presentan los valores promedio de microdureza promedio frente el ancho de la ZAC realizada por medición directa y frente a la entrada de calor promedio. En la tabla no se observa relación proporcional frente a alguno de las tres mediciones. Al aplicar procesos mixtos y desde el diseño de la junta con la cantidad de cordones de soldadura, los parámetros de aplicación de cada proceso como voltaje, amperaje, velocidad de avance, influyen en cada una de las características y resultados de las mediciones y ensayos realizados.

Zona de medición tamaño de grano (a 1000X)	Diámetro de grano promedio por proceso en metal base y por ZAC GF o ZAC GG en las probetas. ( $\mu\text{m}$ )	Microdureza promedio Por zona (HV)	Microdureza promedio por junta - HV	ZAC Promedio por junta. Medición directa. (mm)	Entrada de calor promedio por junta (J/mm)
METAL BASE _ S1	3,23	206			
METAL BASE _ GF	4,27	202			
METAL BASE _ TS	4,09	214			
S1R _ ZAC GF	6,47	168			
S1R _ ZAC GG	8,70	171	172	3,73	988,12
S1R _ MS	6,90	178			
GF1 R _ ZAC GF	5,71	174	182	6,90	1461,51
GF1 R _ ZAC GG	6,25	191			
TS1 R _ ZAC GF	5,41	172	176	2,53	1375,00
TS1 R _ ZAC GG	5,26	180			

Tabla 3-25. Microdureza HV promedio por zona, ancho de la ZAC realizada por medición directa y entrada de calor promedio.

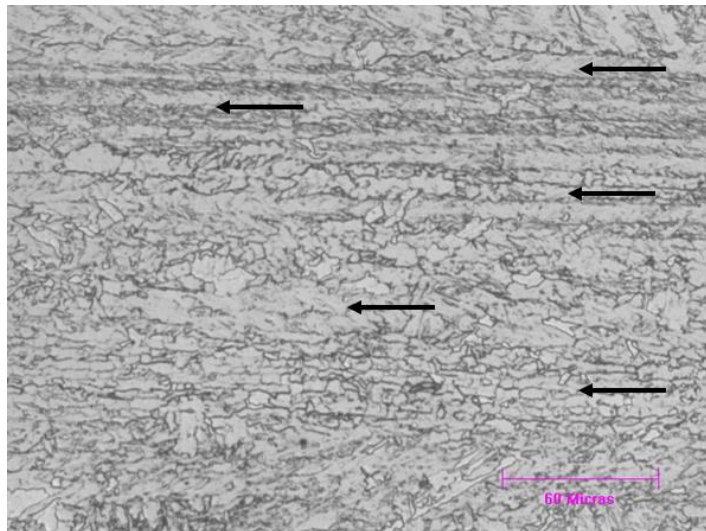
La dureza promedio del material base disminuye en la ZAC de las probetas ensayadas mientras que el tamaño de grano presentado en las ZAC aumenta respecto al material base. Los cambios microestructurales en la ZAC vienen acompañados de la variación de dureza respecto al material base. En el metal base se presenta el menor tamaño de grano, refinado, lo que genera mayor resistencia mecánica del material como puede observarse con el mayor valor de resistencia a la tensión del material base.

La disminución de dureza en la ZAC puede ser debida al crecimiento de grano en esta zona por la entrada de calor durante los procesos de soldadura y a la eliminación de la deformación plástica (que genera dureza por deformación) de los granos originales generada durante los procesos de laminación del material base para fabricación de la tubería. Resultados semejantes de aumento de tamaño de grano y disminución de dureza en la ZAC de acero API 5LX65, posterior al proceso de soldadura, fueron encontrados por Dabir et al [71].

La deformación mecánica en el centro del material base, como puede observarse en la figura 3-54, que muestra la micrografía "TS2 R\_MB-500X" y "TS2 R\_MB-1000X", con granos alargados direccionados hacia el sentido de laminación del material rolo por el

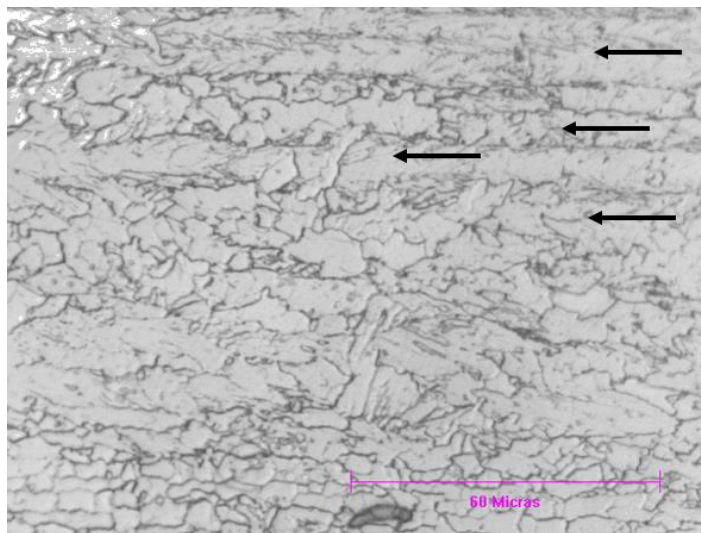
proceso de fabricación de la placa plana empleada como materia prima (antes del rolado circular final para formación del tubo) puede generar endurecimiento del material por deformación plástica. Esto puede observarse con los mayores valores de microdureza HV medidos en el metal base de las juntas soldadas.

Teniendo en cuenta los procesos de fabricación para tuberías, la especificación API 5L [35] acepta los procesos de fabricación a partir de lámina plana producida por laminación termomecánica, con formación final del tubo por rolado en frío y en caso de la tubería empleada en esta investigación con tratamiento térmico de la costura soldada en fábrica por medio de soldadura por resistencia eléctrica, ERW por sus siglas en inglés. Para especificación PSL 2 el proceso de fabricación de la lámina plana debe contemplar la práctica de grano fino, lo cual es acorde a las mediciones realizadas de tamaño de grano del material base empleado en esta investigación.



(a) 500X





(b) 1000X

Figura 3-54. Micrografías “TS2 R\_MB-500X” (a) y “TS2 R\_MB-1000X” (b) tomadas en zonas del metal base con deformación plástica por procesos de laminado.

El tamaño de grano del material API5L X65 puede variar de fabricante en fabricante y depende del proceso que la empresa manufacturera utilice, ya que las alternativas de manufactura del material son variadas y aceptadas por el estándar. Así mismo, la composición de carbono y de elementos aleantes del material varía de fabricante en fabricante como se puede inducir en las diferentes investigaciones asociadas con acero API 5LX6. En la Figura 3-55 se observan composiciones químicas diferentes para una misma especificación del acero API5L X65 empleado en investigaciones realizadas por Dabir et al [71] y Lessa et al [72].

Table 1. Chemical composition of filler metals and base metals, utilized in this work.

Element	Fe	Nb	Ni	Cr	Mn	Ti	C	S
API 5L X65	Bal	0.03	0.129	0.040	1.320	0.003	0.073	0.005

(a) Dabir et al [71]

Table 1. Chemical composition (wt. %) of the API5L X65 substrate and the Inconel 625 used to produce the clad layer.

Alloy	Ni	C	Cr	Mn	Mo	Nb	Fe
Inconel 625	65.1	0.006	21.81	-	8.63	3.48	0.44
API 5L X65	-	0.069	0.02	1.43	-	0.04	98.01

Alloy	Cu	Ti	Si	Ta	P	S	Al
Inconel 625	0.2	0.17	0.04	0.05	0.007	-	0.15
API 5L X65	-	0.015	0.32	-	0.14	0.001	0.042

(b) Lessa et al [72].

Elemento	Fe	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	V
Muestra 3311	97,963	0,038	1,304	0,01	0,004	0,236	0,125	0,043	0,064	0,043
Elemento	Mo	W	Co	Ti	Sn	Al	Nb	B	Pb	
Muestra 3311	0,029	0,003	0,007	0,01	0,006	0,031	0,07	0,0005	0,011	

(c) Tomado de la Tabla 3-1 de esta investigación.

Tomado de Dabir et al [71] (a), Lessa et al [72] (b), esta investigación (c).

Figura 3-55. Composiciones químicas de diferentes investigaciones para una misma especificación del acero API5L X65.

El análisis a nivel macroscópico cumplirá los requerimientos a nivel de fabricación exigidos por los códigos para aplicaciones de tubería API5L X65, pero el comportamiento a nivel microestructural como tamaños de grano, % de carbono, % de elementos aleantes, dureza, microdureza varían como puede observarse en las investigaciones relacionadas con el acero, por ejemplo Lessa et al [72] emplea acero API 5LX65 con la composición química indicada en la figura 3-55 (b), con aproximadamente el doble en contenido de C y mayor contenido en Mn (principal elemento aleante en este tipo de aceros) respecto al material empleado en esta investigación. Lessa et al [72] obtiene valores aproximados de

microdureza de 270 HV frente al valor promedio medido en el material base empleado de 207 HV.

J. Capelle et al. [73] en su investigación emplea acero API 5LX65 con la composición química indicada en la Figura 3-56, con microdureza de 205 HV (similar a la dureza promedio HV del material de esta investigación: 207 HV), teniendo contenido de C cercano al del material base de esta investigación y con contenidos menores de Mn, pero con valores de resistencias a la fluencia y tensión menores. Se observa que con contenidos de carbono similares se mantienen valores de dureza HV similares, pero con contenido menor de Mn los valores de resistencia disminuyeron.

<i>J. Capelle et al. / Engineering Fracture Mechanics 110 (2013) 270–280</i>											273
<b>Table 1</b>											
Typical chemical composition of pipe steel API 5L X65 (wt%) [6].											
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Al	Cu	V	Nb
Min.	0.05	0.15	1.00	–	–	–	–	0.01	–	–	–
Max.	0.14	0.35	1.50	0.020	0.005	0.25	0.25	0.04	0.080	0.080	0.040
<b>Table 2</b>											
Mechanical properties of pipe steel API 5L X65 at 20 °C.											
Yield stress $R_e$ (MPa)	Ultimate strength $R_m$ (MPa)	Elongation at failure $A$ (%)	Charpy energy $K_{CV}$ (J)	Fracture toughness $K_{Jc}$ (MP $\sqrt{am}$ )	Hardness (HV)						
465.5	558.6	10.94	285.2	280	205						

Tomado de J. Capelle et al. [73].

Figura 3-56. Composición química y propiedades mecánicas del acero API5L X65 empleado por J. Capelle et al. [73].

Dabir et al [71], empleando tubería de la misma especificación API 5LX65 para realización de juntas soldadas, con composición química de la Figura 3-57, con aproximadamente el doble de contenido de carbono respecto al material empleado en esta investigación y con valores de Mn semejantes, obtiene valores de microdureza entre 275 y 300 HV, valores superiores a la dureza obtenida en el material base de esta investigación: 207 HV promedio.

Table 1. Chemical composition of filler metals and base metals, utilized in this work.

Element	Fe	Nb	Ni	Cr	Mn	Ti	C	S
API 5L X65	Bal	0.03	0.129	0.040	1.320	0.003	0.073	0.005

Tomado de Dabir et al [71].

Figura 3-57. Composición química del acero API5L X65 empleado por Dabir et al [71].

El análisis del comportamiento del material a nivel macro puede realizarse tomando como base la normatividad vigente API 5L, pero el análisis a nivel microestructural debe realizarse de forma puntual para cada fabricante y llegar a conclusiones puntuales analizando la microestructura en cada uno de materiales a emplear.

Aunque el estándar API 5LX65 no tiene requerimientos a nivel microestructural, realizar un análisis a este nivel en el material puntual de la tubería a emplear aportará en la mejor decisión asociada a comportamiento frente a parámetros de operación y frente a agentes agresivos que causen corrosión, fatiga, agrietamientos, entre otros, ya que como se observa en los párrafos anteriores, siendo la misma especificación API5LX65, cada material puede variar considerablemente respecto a composición química y resistencia mecánica.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

La necesidad de expansión de los sistemas de transporte de gas lleva a la necesidad de buscar metodologías constructivas que generen confiabilidad durante la operación, dentro de estos métodos la selección adecuada del material y de los procesos de soldadura a aplicar con calidad cobran gran relevancia. La tubería seleccionada; acero al carbono HSLA de especificación API 5L grado X65, de 6 pulgadas de diámetro nominal y 7.11mm de espesor (Sch. 40), cumple con los requerimientos de resistencia para operar con presiones de 1200 Psi, pasando por la presión de prueba hidrostática a 1500 Psi.

Los resultados confirman que en entre mayor valor de microdureza la resistencia del material aumenta. No se encontró relación de microdureza frente a entrada de calor en las juntas ensayadas. Las mediciones confirman la relación de mayor tamaño de grano en las ZAC de grano grueso y menor tamaño de grano en las ZAC de grano fino.

En las zonas de las juntas soldadas se encontró que no siempre se cumple la relación de mayor tamaño de grano/menor dureza, en diferentes zonas de las juntas aunque se tenían granos de menor tamaño se encontraban durezas menores respecto a granos más grandes. La ecuación de Hall Petch para juntas soldadas no se cumple para predecir comportamientos de resistencia a la fluencia frente a tamaño de grano como valor entrada, basado principalmente en la gran variabilidad de tamaño de grano en las diferentes zonas de la junta.

La deformación plástica del material con granos alargados durante el rolado del material en el proceso de fabricación hace que los valores de microdureza sean mayores en el

metal base por deformación plástica que la microdureza medida en las ZAC y en el metal base. Se observa el cumplimiento de la especificación API 5L para tuberías tipo PSL2 donde se exige tamaño de grano pequeño, obteniendo un promedio de 3.94  $\mu\text{m}$  de tamaño de grano, esto también influye en el mayor valor de microdureza medido y la mayor resistencia obtenida en el material base.

Para diferentes investigaciones el análisis a nivel macroscópico cumplirá los requerimientos a nivel de fabricación exigidos por los códigos para aplicaciones de tubería API5L X65, pero el comportamiento a nivel microestructural como tamaños de grano, % de carbono, % de elementos aleantes, dureza, microdureza, varían dependiendo del fabricante del material quien selecciona el proceso de fabricación y la composición de elementos basado en el amplio rango que acepta el estándar API 5L.

Se diseñaron especificaciones de procedimiento de soldadura (WPS) que cumplen con las exigencias de calidad requeridas por el código ASME Sección IX [49]; WPS S\_01 empleando SMAW y material de aporte E8010-G, WPS GF\_01 empleando GMAW+FCAW y materiales de aporte ER70S-6 y E81T1-Ni1M-JH4 respectivamente, y WPS TS\_01 empleando GTAW+SMAW con materiales de aporte ER80S-Ni1 y E8010-G respectivamente.

Se realizaron seis juntas soldadas en la tubería seleccionada por medio de los WPS diseñados. Se realizaron las pruebas y ensayos de calidad por medio de la calificación de procedimientos de soldadura (PQR) y la calificación de soldadores (WPQ) exigidos por el código ASME Sección IX [49]. Todas las juntas soldadas dieron resistencias a la tensión mayores a la exigidas por el código. El mayor valor de resistencia a la tensión se dio en las juntas soldadas con el WPS GF\_01, mientras que las juntas soldadas con el WPS S\_01 presentaron los menores valores.

Las pruebas de doblez guiado de cara y de raíz fue superada por las juntas soldadas por medio de los tres WPS diseñados, a excepción de una probeta para doblez de cara realizada con el proceso GF\_01, falla presentada por inadecuada aplicación de la soldadura en una esquina de la junta.

---

Las juntas soldadas con el WPS TS\_01 presentaron la menor ZAC, aunque tuvieron el mayor valor calculado de entrada de calor promedio. Las juntas soldadas con el WPS GF\_01 tienen las mayores dimensiones de la ZAC, pero los valores calculados de entrada de calor en esta junta tuvieron los valores medios entre los procesos aplicados.

Las juntas soldadas con el WPS GF\_01 obtuvieron los mayores valores de dureza HRB, mientras que las juntas soldadas con el WPS TS\_01 presentaron los menores valores. En microdureza HV, las juntas soldadas con el WPS GF\_01 obtuvieron los mayores valores, mientras que las juntas soldadas con el WPS S\_01 presentaron los menores valores de microdureza HV. Se encuentra proporcionalidad directa entre valores de microdureza y valores de resistencia a la tensión.

Los análisis por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido muestran a la ferrita como la fase presente en el material base y en las juntas soldadas. Se observa que en la ZAC de cada proceso aplicado la microestructura presenta grandes variaciones, tanto en morfología como en tamaño de grano, siendo de especial atención estas zonas. Las entradas de calor y los diferentes ciclos térmicos a las que está sometida esta zona hace que la microestructura pase por fases diferentes. Las zonas con morfologías más complejas; granos gruesos, aciculares, estructuras laminares, se presentan en el último cordón aplicado y en la ZAC de grano grueso adyacente al último cordón de soldadura. Esto debido a que en el último pase aplicado no hay un tratamiento térmico post soldadura que homogenice la microestructura de los granos. Caso contrario pasa en los cordones inferiores, en los cuales la entrada de calor del siguiente cordón aplicado genera un tratamiento térmico post soldadura.

En la medición del tamaño de grano realizado en las ZAC de las juntas soldadas, se encuentra que la probeta GF1 (WPS GF\_01) tiene los granos más pequeños respecto a los demás procesos, ubicados en la ZAC de grano fino asociada al cordón superior. Las probetas GF1 (WPS GF\_01) y S1 (WPS S\_01) presentaron los granos más grandes ubicados en la ZAC de grano grueso asociada al cordón superior de la probeta GF1 y en la ZAC de grano grueso de la probeta S1. Los menores tamaños de grano en el metal de aporte y en la ZAC, analizando toda la junta, se presentan en la probeta TS1 R del WPS TS\_01.

En todas las juntas soldadas se observó que el tamaño de grano es mayor en la ZAC de grano grueso, adyacente al metal de soldadura, que en la ZAC de grano fino, adyacente al material base. Se observa que el tamaño de grano en la zona afectada por el calor varía con la distancia desde la línea de fusión hacia el metal base pasando de mayor a menor tamaño de grano.

Las microestructuras tipo widmanstätten o morfologías alargadas aciculares presentadas, generalmente en los últimos cordones de soldadura aplicados, no son convenientes ya que generan fragilidad. Aunque el código ASME Sección IX [49] no exige tratamiento térmico post soldadura para el diseño de junta empleado, se recomienda realizar esta práctica para eliminar esta morfología en la junta soldada. Los valores recomendados para este tratamiento pueden ser según las especificaciones AWS A para los consumibles de soldadura a utilizar.

Con los ensayos y análisis realizados en esta investigación los WPS diseñados; WPS S\_01, WPS GF\_01 y WPS TS\_01, pueden ser aplicados a la soldadura de producción en la construcción *de líneas para transporte de gas*.

## 4.2 Recomendaciones

Aunque el estándar API 5LX65 no tiene requerimientos a nivel microestructural, realizar un análisis a este nivel en el material puntual de la tubería a emplear aportará en la mejor decisión asociada a comportamiento frente a parámetros de operación y frente a agentes agresivos que causen corrosión, fatiga, agrietamientos, entre otros, ya que como se observa en los párrafos anteriores, siendo la misma especificación API5LX65, cada material puede variar considerablemente respecto a composición química y resistencia mecánica



Realizar análisis más detallados del comportamiento microestructural y de fases generadas en las ZAC al aplicar procesos de soldadura mixtos.

Realizar análisis por microscopía electrónica de transmisión (TEM) para estudiar la estructura interna de las zonas soldadas e identificar fases de menor tamaño presentes en la microestructura.

En todas las juntas soldadas se presentaron inclusiones con presencia de elementos no reportados en la composición química del material base o del electrodo. Es recomendable en los estudios relacionados a procesos de soldadura realizar análisis más detallados de inclusiones.

Realizar tratamientos térmicos post soldadura para eliminar microestructuras no deseadas en la junta soldada. Las temperaturas recomendadas para este tratamiento se encuentran en las especificaciones AWS A, de la American Welding Society, para los consumibles de soldadura a utilizar.

Los procesos de soldadura analizados son aplicables técnicamente para realizar soldaduras de producción en líneas de gasoductos. Por lo tanto es conveniente generar análisis de costos asociados a cada proceso, teniendo en cuenta actividades tanto en taller como en campo para instalación final de los gasoductos. Este análisis presupuestal podrá generar la preferencia de implementar un proceso frente al otro.

## Bibliografía

- [1] Unidad de planeación minero-energética UPME. Estudio técnico para el Plan de abastecimiento de gas natural. Ministerio de Minas y Energía. Colombia, Bogotá, Julio 2020. pág. 47-52, 116-117, 136-137
- [2] Ministerio de Minas y Energía. Decreto No. 2345 de 3 Dic 2015, Colombia. Artículo 4°.
- [3] AWS A3.0M/A3.0. Standard Welding Terms and Definitions. American Welding Society. 2020.
- [4] Ministerio de Minas y Energía. Decreto No. 2100 de 15 Jun 2011. Colombia. Artículo 4°.
- [5] Satish Kumar Sharma, Sachin Maheshwari. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 38 (2017) 203-217.
- [6] Ramesh Singh. *Welding and Joining Processes. Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards 2012. Chapter 3; 147-170*
- [7] Barry G.Bubar. *Welding and NDT. Pipeline Planning and Construction Field Manual 2011. Chapter 17; 357-378*
- [8] Soldexa. Manual de soldadura y catálogo de productos. 7 ed. [http://www.soldexa.com.pe/Manual\\_S/Manual\\_Soldadura.html](http://www.soldexa.com.pe/Manual_S/Manual_Soldadura.html)
- [9] M. Vural. *Welding Processes and Technologies. Comprehensive Materials Processing, volume 6, 2014; 3–48*
- [10] S.H. Hashemi, D. Mohammadyani. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2012. 98; 8-15
- [11] S. Távara, J.Barboza. Influencia de los cordones de soldadura sobre la resistencia a la corrosión del acero API5LX – 52, en agua sedimentada de crudo de petróleo. *Jornadas SAM - CONAMET – AAS 2001. Sept.*
- [12] B. Beidokhti, A.H. Kokabi, A. Dolati. A comprehensive study on the microstructure of high strength low alloy pipeline welds. *Journal of Alloys and Compounds* 2014. 597;142–147
- [13] M. Zalazar, HJ. Quesada, E.P. Asta. Microestructuras producidas en la soldadura de unión de aceros para tuberías de gran diámetro. *Rev. Metal. Madrid* 1998. 34(6);469-475
- [14] Walteros O. Estado del arte de los procesos de soldadura involucrados en el montaje de tubería API 5L para transporte de hidrocarburos. Universidad Libre de Colombia, Tesis 2012.
- [15] Kyle Siler-Evans, Alex Hanson, Cecily Sunday, Nathan Leonard, Michele Tumminello. Analysis of pipeline accidents in the United States from 1968 to 2009. *International journal of critical infrastructure protection* 2014; 7:257–269

- 
- [16] Helena Montiel, Juan A. Vilchez, Josep Amaldos, Joaquim Casal. Historical analysis of accidents in the transportation of natural gas. *Journal of Hazardous Materials* 1996;51:77-92
- [17] H. Wang, I.J. Duncan. Understanding the nature of risks associated with onshore natural gas gathering pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2014;29:49-55
- [18] Igor A. Chaves, Robert E. Melchers. Pitting corrosion in pipeline steel weld zones. *Corrosion Science* 2011; 53:4026–4032
- [19] Ahmed F, Ali L, Iqbal J, Hasan F. Failure of pipe joints during hydrostatic testing. *Eng Fail Anal* 2008;15:766–73.
- [20] J.M. Pardal, G.C. de Souza, E.C. Leao, M.R. da Silva, S.S.M. Tavares. Fatigue cracking of high pressure oil tube. *Case Studies in Engineering Failure Analysis* 2013;1:171–178
- [21] Chinedu I. Ossai, Brian Boswell, Ian J. Davies. Pipeline failures in corrosive environments – A conceptual analysis of trends and effects. *Engineering Failure Analysis* 2015;53:36–58
- [22] L.W. Wang, Z.Y. Liu, Z.Y. Cui, C.W. Du, X.H. Wang, X.G. Li. In situ corrosion characterization of simulated weld heat affected zone on API X80 pipeline steel. *Corrosion Science* 2014. 85:401–410
- [23] H.A.E.A. Atwa, N.M. Mawsouf, M.Y.A. Younan. Study of the effect of defects on the fatigue behaviour and the fracture toughness for low carbon steel (API 5L grade B) gas transmission pipelines. *Engineering Fracture Mechanics* 1993. 44(6);921–935
- [24] ASME B31.8S. Managing System Integrity of Gas Pipelines. American Society Of Mechanical Engineers. 2020
- [25] Andrés R. Galvis E, W. Hormaza. Characterization of failure modes for different welding processes of AISI/SAE 304 stainless steels. *Engineering Failure Analysis* 2011. 18;1791–1799
- [26] Jau-Wen Lin, Hsi-Cherng Chang, Ming-Hsiu Wu. Comparison of mechanical properties of pure copper welded using friction stir welding and tungsten inert gas welding. *Journal of Manufacturing Processes* 2014. 16; 296–304
- [27] T. Pasang, J.M. Sánchez Amaya, Y. Tao, M.R. Amaya-Vazquez, F.J. Botana, J.C. Sabol, W.Z. Misiólek, O. Kamiya. Comparison of Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr Welds Performed by Laser Beam, Electron Beam and Gas Tungsten Arc Welding. *Procedia Engineering* 2013.63;397 – 404
- [28] Jeong Hun Lee, Sung Hyuk Park, Hyuk Sun Kwon, Gyo Sung Kim, Chong Soo Lee. Laser, tungsten inert gas, and metal active gas welding of DP780 steel: Comparison of hardness, tensile properties and fatigue resistance. *Materials and Design* 2014. 64;559–565
- [29] Estela S. Surian, N. Mabel Ramini de Rissone, Luis A. de Vedia. Depósitos ferríticos de alta resistencia soldados por SMAW, MCAW, FCAW y SAW: el desafío es obtener la resistencia a la tracción. *SOLDAR CONARCO* 2010.133; 26-38
- [30] M. Zalazar, N. M. Ramini de Rissone y E. S. Surian. Análisis de la soldabilidad de aceros de cañerías microaleados utilizando dos procesos de soldadura. *Congreso SAM/CONAMET* 2007
- [31] Mónica Zalazar, N. Mabel Ramini de Rissone, Estela S. Surian, Roberto Bruna, Esteban Baralla. Efecto del procedimiento de soldadura sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros microaleados para cañería. *Soldagem Insp.* 2009.14(1);036-046
- [32] D. Codega, M. Zalazar. Evaluación de la susceptibilidad a la fisuración en frío en soldaduras multipasada. *Congreso SAM/CONAMET* 2007
- [33] F.P. Gomez. Influencia de la entrada de calor en las características mecánicas y microestructurales finales de la zona afectada por el calor (ZAC) en uniones soldadas en tubería para transporte de hidrocarburos. *Universidad Nacional de Colombia*. 2016

- [34] ASME B31.8. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. American Society Of Mechanical Engineers. 2018
- [35] API Specification 5L. Specification for Line Pipe. 46th edition. American Petroleum Institute. 2018
- [36] B. Vargas-Arista, J.M. Hallen, A. Albitier. Effect of artificial aging on the microstructure of weldment on API 5L X-52 steel pipe. *Materials Characterization* 2007. 58;721–729
- [37] E.Sarmiento, J.Correa. Sistema de gerenciamiento de integridad para el gasoducto de Ballena Barrancabermeja, enfocado a la optimización de los planes de operación y mantenimiento. Universidad Industrial de Santander. Tesis 2006.
- [38] E. W.McAllister. Pipe Design. Pipeline Rules of Thumb Handbook 2014. 8; 93–123
- [39] ICONTEC. Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales. Norma Técnica Colombiana NTC 2505. 2006.
- [40] ICONTEC. Gasoductos. líneas de transporte y redes de distribución de gas. Norma Técnica Colombiana NTC 3728. 2018.
- [41] ICONTEC. Gasoductos. presiones de operación permisibles para el transporte, distribución y suministro de gases combustibles. Norma Técnica Colombiana NTC 3838. 2014.
- [42] ICONTEC. Instalaciones para suministro de gas destinadas a usos industriales. Norma Técnica Colombiana NTC 4282. 2003.
- [43] ICONTEC. Gestión de integridad de gasoductos. Norma Técnica Colombiana NTC 5747. 2009.
- [44] Comisión de regulación de energía y gas. Por la cual se establece el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural -(RUT). Ministerio de Minas y energía, Colombia. Resolución 071-1999
- [45] Comisión de regulación de energía y gas. Por la cual se complementan las especificaciones de calidad del gas natural inyectado al sistema nacional de transporte, definidas en la resolución CREG 071 de 1999. Ministerio de Minas y Energía, Colombia. Resolución 054-2007
- [46] Comisión de regulación de energía y gas. Por el cual se modifica el numeral 6.3.2 del Reglamento Único de Transporte de Gas Natural, modificado mediante la resolución CREG 054 de 2007. Ministerio de Minas y energía, Colombia. Resolución 131-2009
- [47] ECOGAS. Licitación pública ecg-vid-031-03, construcción de la variante Dexton del gasoducto La Heroica – Mamonal. Empresa colombiana de gas. 2003. Pág. 43.
- [48] L. Lopez. Ingeniería conceptual en el diseño del gasoducto Santana-Aratoca. Universidad Industrial de Santander. Tesis 2010. Pag.116
- [49] ASME BPVC Section IX. Welding, Brazing and Fusing Qualifications. American Society Of Mechanical Engineers. 2021
- [51] Danut Iordachescu, Luisa Quintino. Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. *Journal of materials processing technology* 2008. 202;391–397
- [52] John Norris, Dominic Cuiuri. The controlled short circuit GMAW process: A tutorial. *Journal of Manufacturing Processes* 2014. (16) 86–92
- [53] Lincoln Electric. Lincoln Soldando. Lincoln soldaduras de Venezuela. Dic 2010.
- [55] API Standard 1104. Welding of Pipelines and Related Facilities. 22th Edition. American petroleum Institute. 2021.
- [58] Unidad de planeación minero energética UPME. Plan de abastecimiento de gas natural. Ministerio de Minas y Energía. Colombia, Bogotá, mayo 2014. pag 44.
- [59] <https://www.tgi.com.co/industria-del-gas-natural/cadena-del-gas-natural>

- 
- [60] ASME B31.4. Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries. American Society Of Mechanical Engineers. 2019
- [61] ASME B31.3. Process Piping. American Society Of Mechanical Engineers. 2020
- [62] ASME B31.1. Power Piping. American Society Of Mechanical Engineers. 2020
- [63] ASME B36.10 M. Welded and Seamless Wrought Steel Pipe. American Society Of Mechanical Engineers. 2022
- [64] ASTM E18. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials. 2022
- [65] ASTM A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. American Society for Testing and Materials. 2021
- [66] ASTM E384. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials . American Society for Testing and Materials. 2021
- [67] ASTM E112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size . American Society for Testing and Materials. 2021
- [68] MA-Table software. [www.microanalyst.mikroanalytik.de/software.phtml](http://www.microanalyst.mikroanalytik.de/software.phtml). 2015
- [69] Hall, E. O. (1951). The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. Proceedings of the Physical Society. Section B, 64(9), 747.
- [70] Petch, N. J. (1953). The cleavage strength of polycrystals. Journal of the Iron and Steel institute, 174, 25-28.
- M. Dabir, A. Bahrami, M. Shamanian, H. Saffari. Effects of ER308L buttering and post-buttering heat treatment on the microstructure and mechanical properties of API 5L X65/AISI304 dissimilar joint. International Journal of Pressure Vessels and Piping 199 (2022) 104702
- [71] L. Leesa. Two-Pass Friction Stir Welding of Cladded API X65. 23rd International Conference on Material Forming (ESAFORM 2020). Procedia Manufacturing 47 (2020) 1010–1015
- [72] J. Capelle. Design based on ductile–brittle transition temperature for API 5L X65 steel used for dense CO2 transport. Engineering Fracture Mechanics 110 (2013) 270–280
- [73]