

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**“ESTUDIO DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO EN LAS  
REPETIDAS REPARACIONES POR SOLDADURA SOBRE LA  
DUREZA, RESISTENCIA AL IMPACTO Y MICROESTRUCTURA EN  
TUBERÍAS DE ACERO ALEADO ASTM A335 GRADO P5”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN  
INGENIERÍA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**AUTOR:**

Saul Cesar Caballero Espinoza

**ASESOR:**

Paul Pedro Lean Sifuentes

Setiembre 2019

## RESUMEN

Los aceros aleados ferríticos ASTM A335 son ampliamente utilizados en la industria petroquímica y plantas de energía, debido a su adecuada resistencia mecánica ( $-29^{\circ}\text{C}$  a  $593^{\circ}\text{C}$  con presiones de  $105.5 \text{ kg/cm}^2$  [ $10.4 \text{ MPa}$ ] y  $13.4 \text{ kg/cm}^2$  [ $1.3 \text{ MPa}$ ] respectivamente [1]) y resistencia a la corrosión frente a los aceites crudos que contienen sulfuro de hidrogeno y otros agentes corrosivos [2] y [3]. Los aceros ASTM A335 Gr. P5, son usados como tuberías para vapor, intercambiadores de calor, condensadores y catalizadores [3].

Al soldar, reparar o deformar los aceros ASTM A335 Gr. P5, las transformaciones microestructurales y las tensiones internas residuales pueden reducir la fiabilidad y durabilidad de la tubería en servicio; con el fin de reducir la influencia de tales transformaciones microestructurales y tensiones internas, se realiza la operación de tratamiento térmico, tal como lo especifican los códigos de construcción (ASME B31.3 [4], ASME B31.1 [5] y Welding Procedure GP 18-07-01 [6]).

En la presente tesis se realizó la soldadura de cupones simulando las repetidas reparaciones en donde se varió las condiciones (configuraciones) del tratamiento térmico con el objetivo de obtener valores de dureza y energía absorbida mediante el ensayo Charpy V que cumplan con los requerimientos de los códigos de construcción, además que la microestructura obtenida sea aceptable; otro de los objetivos es determinar la variación de dureza, resistencia al impacto y microestructura simulando las repetidas reparaciones desde la primera hasta la cuarta reparación con la mejor condición (configuración) de tratamiento térmico obtenida.

La metodología seguida fue la siguiente: PRIMERO, se caracterizó el metal base en estado virgen (o suministro); SEGUNDO, se determinó de acuerdo a la revisión del estado del arte el óptimo valor del parámetro “P” del PWHT de las uniones soldadas del acero ASTM A335 Gr. P5, este parámetro fue seleccionado buscando los mayores valores de resistencia al impacto; TERCERO, se elaboró la Especificación del Procedimiento de Soldadura ( $\text{WPS}_{\text{tesis}}$ ), las variables de soldadura de este  $\text{WPS}_{\text{tesis}}$  no fueron utilizadas para los

tratamientos térmicos, ya que cada tratamiento térmico tiene una condición (configuración) específica; CUARTO, se realizó la soldadura de un cupón utilizando las variables del  $WPS_{\text{tesis}}$  y el óptimo valor del parámetro “P” obtenido, después se realizaron los ensayos de Dureza, Impacto Charpy V y Análisis de la Microestructura con la finalidad de que los valores obtenidos sean razonablemente comparables con los valores obtenidos en estudios anteriores, y sirvan de comparación con los valores obtenidos en la soldadura de cupones simulando las repetidas reparaciones; QUINTO, se soldaron cupones simulando tres y cuatro reparaciones utilizando las variables del  $WPS_{\text{tesis}}$  con cuatro condiciones (configuraciones) diferentes de tratamiento térmico, antes de tales reparaciones, los cupones fueron soldados utilizando las variables del  $WPS_{\text{tesis}}$  con el parámetro “P” = 20.26; SEXTO, se realizó la soldadura de los cupones simulando las repetidas reparaciones desde la primera hasta la cuarta reparación utilizando las variables del  $WPS_{\text{tesis}}$  con la mejor condición (configuración) del tratamiento térmico obtenida.

Los resultados de los valores de dureza y resistencia al impacto de los cupones soldados con tres y cuatro reparaciones son cercanos entre sí, y sus microestructuras son similares; el análisis de los efectos de las configuraciones de tratamiento térmico son: *con parámetro “P” = 20.26*, han disminuido en promedio en -9% (ZAC) y 8% (ZAC) la dureza y resistencia al impacto respectivamente con respecto al “cupón soldado sin reparación”; *con parámetro “P” = 21.79*, han disminuido en -34% (ZAC) y -34% (MA) en dureza y resistencia al impacto respectivamente con respecto al “cupón soldado sin reparación”; *con PWHT a 950°C por 2h*, han disminuido en promedio en -27% (ZAC) y -96% (MA) en dureza y resistencia al impacto respectivamente con respecto al “cupón soldado sin reparación”, además su microestructura presenta los mayores tamaños de grano de ferrita y colonias de carburos coagulados en los bordes de grano; con tratamiento térmico antes (950°C por 2h) y después (725°C por 2h) de la soldadura, han variado en promedio en -9% (ZAC) y +21% (ZAC) en dureza y resistencia al impacto respectivamente con respecto al “cupón soldado sin reparación”, además la dureza ha disminuido en -25% en el MB.

Los resultados y análisis de los valores de dureza y resistencia al impacto de los cupones soldados desde la primera hasta la cuarta reparación con PWHT con la mejor condición (configuración) del tratamiento térmico obtenido en el párrafo anterior, son: la máxima disminución en promedio de dureza es -13% (ZAC) en la cuarta reparación, y la máxima disminución en promedio en resistencia al impacto es - 12% en la segunda reparación.

*Se concluye que la configuración óptima del tratamiento térmico para las juntas soldadas con tres y cuatro reparaciones del acero ASTM A335 Gr. P5 es cuando presenta un PWHT con parámetro “P” = 20.26, ya que presenta disminuciones pequeñas en la dureza y resistencia al impacto, además la microestructura es favorable ya que presenta principalmente una matriz de ferrita con carburos dispersos aleatoriamente. Otra conclusión es que la configuración del tratamiento térmico para las juntas soldadas reparadas antes (950°C por 2h) y después (725°C por 2h) de la soldadura es *aceptable*, ya que los valores de dureza, resistencia al impacto y microestructura son cercanos a lo obtenido en el “cupón soldado sin reparar”, sin embargo, se requiere mayores recursos y tiempo para ejecutar los tratamientos térmico antes y después de la soldadura. Otra conclusión es que la configuración del PWHT para las juntas soldadas reparadas con parámetro “P” = 21.79 *no es aceptable*, ya que la dureza y la resistencia al impacto presentan disminuciones considerables. Otra conclusión es que la configuración del PWHT para las juntas soldadas reparadas a 950°C por 2h *no es aceptable*, ya que la dureza y la resistencia al impacto presentan disminuciones severas, además su microestructura es frágil debido al incremento en el tamaño de grano y los carburos coagulados en los bordes de grano.*

Además, se concluye se concluye que las juntas soldadas reparadas del acero ASTM A335 Gr. P5, pueden ser reparadas hasta cuatro veces, con PWHT con parámetro “P” = 20.26 aplicado desde la primera hasta la cuarta reparación, debido a que no se obtuvo disminuciones severas en la dureza, resistencia al impacto y microestructura comparado con los resultados obtenidos en el “cupón soldado sin reparar”.

## **DEDICATORIA**

*A mi esposa Rosse P., por apoyarme y motivarme en todo momento.*

*A mi hijo Saúl Adriano por motivarme con su bella sonrisa.*

*A mi Mamá, su energía inagotable, su humildad y bondad.*

*A Papá, por su responsabilidad ante la familia.*

*A mi hermana Diana, por sus consejos y orientación.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer en primer lugar, a Dios por darme salud y trabajo para poder costearme la Maestría.

A mi esposa, a mi hijo (Saúl Adriano) y mis padres por motivarme y darme las fuerzas necesarias para iniciar, desarrollar y culminar la presente Tesis.

A mi asesor, el Dr. Paul Lean Sifuentes, por su tiempo, paciencia, consejo y apoyo en el desarrollo de la presente tesis; así como también por sus enseñanzas dentro y fuera del aula.

A las empresas Miller-Tecsup por brindarme las instalaciones, equipos de soldadura y su conocimiento para realizar las pruebas de soldadura.

A los analistas del laboratorio CITEmateriales (PUCP), a mi grupo de compañeros de la maestría, a cada profesor, y a todas las personas que me ayudaron a realizar la presente tesis.

Muchas Gracias

## INDICE

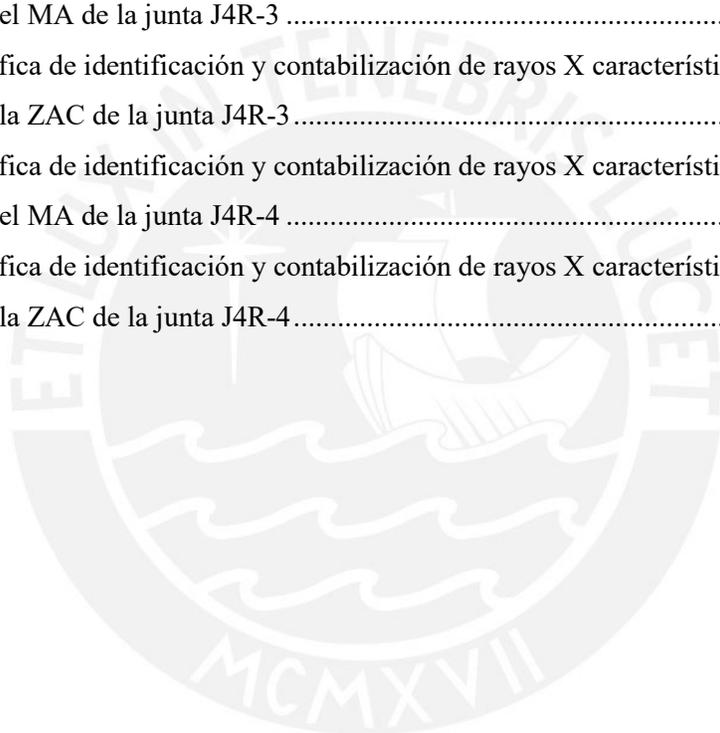
RESUMEN.....	i
DEDICATORIA .....	iv
INDICE .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
1.1. Aceros Aleados.....	4
1.1.1. El Propósito de la Aleación .....	4
1.1.2. Efectos de los Elementos de Aleación en la Ferrita.....	5
1.1.3. Efectos de los Elementos de Aleación en el Carburo .....	6
1.2. Aceros Cromo-Molibdeno .....	8
1.2.1. Designación y Especificación.....	8
1.2.2. Metalurgia de la Soldadura de los Aceros Cr-Mo.....	10
1.2.3. Diagramas de Transformación de Enfriamiento Continuo (CCT).....	10
1.3. Especificación de las Tuberías de Acero Aleado Ferrítico ASTM A335 Gr. P5.....	11
1.4. Consideraciones y Requerimientos Generales de la Soldadura de los Aceros Cr-Mo .....	13
1.4.1. Procesos de Soldadura .....	13
1.4.2. Metales de Aporte.....	14
1.4.3. Gas de Respaldo.....	15
1.4.4. Pre calentamiento y Mantenimiento de Temperatura .....	15
1.4.5. Tratamientos Térmicos .....	17
1.4.5.1. Deshidrogenado.....	17
1.4.5.2. Tratamiento Térmico Después de la Soldadura (PWHT) .....	19
1.4.6. Criterios de Aceptación de las Juntas Soldadas.....	19
1.4.6.1. Dureza máxima permitida .....	19
1.4.6.2. Energía Absorbida en el Ensayo de Impacto Charpy V .....	21
1.5. Consideraciones y Requerimientos de las Reparaciones por Soldadura de los Aceros Aleados Ferríticos .....	22
1.6. Parámetro “P” .....	23

1.7. Microestructura de las Juntas Soldadas del Acero Aleado 5%Cr-0.5%Mo.....	24
1.7.1. Microestructura del Acero ASTM A335 Gr. P5 de Suministro.....	24
1.7.1.1. Microestructura del Acero Soldado 5%Cr-0.5Mo sin PWHT.....	25
1.7.1.2. Microestructura del Acero Soldado 5%Cr-0.5Mo con PWHT .....	26
1.8. Mecanismos de Endurecimiento de Aceros Aleados.....	30
1.8.1. Por Dispersión de Precipitados.....	30
1.9. Influencia del Tamaño de Grano.....	32
CAPÍTULO II .....	33
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	33
2.1. Descripción de los Equipos.....	34
2.1.1. Máquina de Soldar .....	34
2.1.2. Equipo de Calentamiento por Inducción.....	34
2.1.3. Horno de Cámara .....	36
2.1.4. Horno Portátil.....	38
2.1.5. Esmeriladoras Angulares .....	38
2.1.6. Equipos Utilizados para Control de Calidad.....	39
2.2. Descripción de los Materiales .....	40
2.2.1. Metal Base (MB) en Estado Virgen y Metal de Aporte (MA).....	40
2.2.2. Gas de Protección y Respaldo.....	40
2.2.3. Discos Abrasivos y Cepillo Circular.....	40
2.2.4. Fibra Cerámica.....	41
2.3. Identificación Positiva del Metal Base en Estado Virgen y del Metal de Aporte .....	41
2.3.1. Identificación Positiva del Metal Base (MB) en Estado Virgen .....	41
2.3.2. Identificación Positiva del Metal de Aporte.....	42
2.4. Determinación del Óptimo Valor del Parámetro “P” .....	42
2.5. Generación de la “Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS <sub>tesis</sub> )” .....	45
2.6. Soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 con PWHT.....	47
2.6.1. Actividades Antes y Durante la Soldadura .....	47
2.6.2. Actividades Después de la Soldadura .....	51
2.7. Soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 sin PWHT.....	51
2.8. Soldadura de Cupones Simulando Tres y Cuatro Reparaciones Variando las Variables del “Tratamiento Térmico” .....	52

2.9. Soldadura de Cupones Simulando Repetidas Reparaciones con la Mejor Configuración de Tratamiento Térmico (Obtenido en el Capítulo 2.8).....	55
2.10. Ensayos de Caracterización.....	56
2.10.1. Dureza Vickers HV10.....	56
2.10.2. Ensayo Charpy V-muesca (Ensayo de Impacto).....	58
2.10.3. Análisis Metalográfico.....	59
2.10.3.1. Preparación Superficial de las Probetas.....	59
2.10.3.2. Ataque Superficial de las Probetas.....	61
2.10.4. Análisis Micrográfico.....	62
CAPÍTULO III.....	63
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	63
3.1 Caracterización del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro.....	64
3.1.1 Análisis Químico del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro.....	64
3.1.2 Valores de Dureza del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro.....	64
3.1.3 Energía Absorbida del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro.....	64
3.1.4 Microestructura del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro.....	65
3.2 Caracterización de las Juntas “J1 sin PWHT” y “J1 con PWHT”.....	66
3.2.1 Caracterización de la Junta “J1 sin PWHT”.....	66
3.2.1.1 Análisis Metalográfico.....	66
3.2.1.2 Ensayo de Dureza Vickers a Temperatura Ambiente.....	68
3.2.2 Caracterización de la Junta “J1 con PWHT” o “J1”.....	69
3.2.2.1 Ensayo de Dureza Vickers a Temperatura de Ambiente.....	69
3.2.2.2 Ensayo de Impacto Charpy V a -29 °C.....	70
3.2.2.3 Análisis Metalográfico.....	71
3.3 Caracterización de las Juntas con Tres (J3R) y Cuatro (J4R) Reparaciones Variando las Variables del “Tratamiento Térmico”.....	73
3.3.1 Dureza Vickers a Temperatura de Ambiente.....	74
3.3.1.1 Comparación de Valores de Dureza de las Juntas J3R-1 y J3R-4 con Respecto a la Junta J1	80
3.3.1.2 Comparación de Valores de Dureza de las Juntas J3R-2 y J3R-3 con Respecto a la Junta J1	81

3.3.1.3 Comparación de Valores de Dureza de las Juntas J4R-1 y J4R-4 con Respecto a la Junta J1	82
3.3.1.4 Comparación de Valores de Dureza de las Juntas J4R-2 y J4R-3 con Respecto a la Junta J1	83
3.3.2 Ensayo de Impacto Charpy V a -29°C .....	84
3.3.2.1 Comparación de la Energía Absorbida de las Juntas J3R-1 y J3R-4 con Respecto a la Junta J1	87
3.3.2.2 Comparación de la Energía Absorbida de las Juntas J3R-2 y J3R-3 con Respecto a la Junta J1	87
3.3.2.3 Comparación de la Energía Absorbida de las Juntas J4R-1 y J4R-4 con Respecto a la Junta J1	88
3.3.2.4 Comparación de la Energía Absorbida de las Juntas J4R-2 y J4R-3 con Respecto a la Junta J1	89
3.3.3 Análisis Metalográfico .....	89
3.3.3.1 Análisis Metalográfico de las cuatro configuraciones de las juntas J3R.....	90
3.3.3.2 Análisis Metalográfico de las Cuatro Configuraciones de las Juntas J4R .....	91
3.3.4 Análisis Micrográfico mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	101
3.3.4.1 Determinación de los Kilo-Voltios Óptimo para la Realización de los Análisis de Micrografía Mediante el SEM .....	101
3.3.4.2 Análisis Micrográfico mediante la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	107
a) Análisis Micrográfico de la Junta J4R-1 .....	107
b) Análisis Micrográfico de la Junta J4R-3 .....	111
c) Análisis Micrográfico de la Junta J4R-4 .....	115
3.4 Caracterización de las Juntas con Repetidas Reparaciones con la Mejor Configuración de Tratamiento Térmico (Obtenido en el Capítulo 2.8).....	119
3.4.1 Ensayo de Dureza Vickers a Temperatura de Ambiente.....	119
3.4.2 Ensayo de Impacto Charpy V a -29°C .....	123
3.4.3 Análisis Metalográfico de las Juntas con Repetidas Reparaciones .....	126
CONCLUSIONES .....	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXOS .....	135
Anexo 1.1: Hoja técnica del metal de aporte E8018-B6 .....	135

Anexo 1.2: Hoja técnica del metal de aporte ER80S-B6 .....	136
Anexo 1.3: WPS de la empresa “SSK Ingeniería y Construcción SAC” .....	137
Anexo 1.4: Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en el MA de la junta J4R-1 .....	139
Anexo 1.5: Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en la ZAC de la junta J4R-1 .....	141
Anexo 1.6: Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en el MA de la junta J4R-3 .....	143
Anexo 1.7: Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en la ZAC de la junta J4R-3 .....	146
Anexo 1.8: Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en el MA de la junta J4R-4 .....	149
Anexo 1.9: Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en la ZAC de la junta J4R-4 .....	151



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Comportamiento de los elementos individuales en un acero recocido (Adaptado del libro de E.C. Bain y H.W. Paxton, Alloying elements in Steel, 2da. Ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961.) [13].....	5
<b>Tabla 1.2:</b> Designación de Aceros Cromo-Molibdeno (extracto de las tablas QW/QB-422, ASME BPVC.IX-2017) [12].....	9
<b>Tabla 1.3:</b> Requerimientos químicos, tratamiento térmico y resistencia a la tracción del acero ASTM A335 Gr.P5 [15].....	13
<b>Tabla 1.4:</b> Metales de aporte recomendados para unir aceros %5Cr – ½%Mo .....	15
<b>Tabla 1.5:</b> Temperatura de precalentamiento y mantenimiento de la temperatura para el acero 5%Cr – ½%Mo.....	16
<b>Tabla 1.6:</b> Temperatura y tiempo de mantenimiento para el acero de composición nominal 5%Cr – ½%Mo (P-No 5B).....	20
<b>Tabla 1.7:</b> Límites de Dureza de Materiales [23].....	20
<b>Tabla 1.8:</b> Requisitos de dureza máxima para acero aleados con P-número [24].....	21
<b>Tabla 1.9:</b> Valores mínimos requeridos de impacto Charpy V-Notch [4] .....	22
<b>Tabla 1.10:</b> Ejemplo del cálculo del parámetro “P”.....	24
<b>Tabla 1.11:</b> Composición química de las fases de la microestructura del espécimen con “P = 22.37” (en %) [26] .....	29
<b>Tabla 2.1.</b> Identificación del Metal Base y Metal de Aporte.....	40
<b>Tabla 2.2.</b> Variables de soldadura del WPS <sub>tesis</sub> para soldar aceros ASTM A335 Gr. P5 .....	46
<b>Tabla 2.3:</b> Configuraciones de tratamiento térmico realizado antes y después de la soldadura de las juntas J3R-x y J4R-x.....	54
<b>Tabla 3.1.</b> Análisis Químico del Metal Base.....	64
<b>Tabla 3.2.</b> Valores de Dureza en el Metal Base .....	64
<b>Tabla 3.3.</b> Valores de Energía Absorbida en el Ensayo de Impacto Charpy V en el Metal Base ....	64
<b>Tabla 3.4.</b> Valores de dureza en la línea superior a temperatura ambiente correspondiente a la junta “J1 sin PWHT”.....	69
<b>Tabla 3.5.</b> Valores de dureza en la superficie externa a temperatura ambiente correspondiente a la junta “J1 sin PWHT”.....	69
<b>Tabla 3.6:</b> Valores de energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy V a -29°C de la junta J171	

<b>Tabla 3.7.</b> Configuraciones de tratamiento térmico para las juntas J3R y J4R.....	74
<b>Tabla 3.8.</b> Valor de dureza promedio de las juntas J3R y J4R de las cuatro configuraciones de tratamiento térmico .....	75
<b>Tabla 3.9.</b> Energía Absorbida de Impacto (a -29°C) de las Probetas de las Juntas J3R-x y J4R-x..	84
<b>Tabla 3.10.</b> Variación de la Resistencia al Impacto Promedio (a -29°C) de las Juntas J3R y J4R ..	85
<b>Tabla 3.11.</b> Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS en los bordes de grano (sitios 1 y 2) del MA correspondiente a la junta J4R-4 a 30KV .....	102
<b>Tabla 3.12.</b> Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS dentro de los granos (sitios 1, 2 y 3) del MA correspondiente a la junta J4R-4 a 30KV .....	102
<b>Tabla 3.13.</b> Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS dentro de los granos (sitios 1, 2 y 3) del MA correspondiente a la junta J4R-4 a 10KV .....	103
<b>Tabla 3.14.</b> Porcentaje en átomo y en peso de los elementos obtenidos mediante EDS en los bordes (sitios 1, 2 y 3) y dentro (sitios 4, 5 y 6) de los granos del MA correspondiente a la junta J4R-1 .	109
<b>Tabla 3.15.</b> Porcentaje en átomo y en peso de los elementos obtenidos mediante EDS en el borde (sitios 1, 2 y 3) y dentro (sitios 4, 5 y 6) de los granos de la ZAC correspondiente a la junta J4R-1 .....	109
<b>Tabla 3.16.</b> Fórmula promedio y rango de concentraciones de átomos metálicos para carburos comunes [37].....	110
<b>Tabla 3.17.</b> Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS, dentro (sitios 1, 2 y 3 en puntos llanos; sitios 4, 5 y 6 en puntos pequeños con relieve redondo) y en los bordes de grano (sitios 7, 8 y 9) en el MA correspondiente a la junta J4R-3, a 10KV, con magnificación 4000.....	114
<b>Tabla 3.18.</b> Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS, dentro (sitios 1, 2 y 3 en un micro-constituyente con relieve rugoso; sitios 7, 8 y 9 en otro micro-constituyente con relieve llano) y en los bordes de grano (sitios 4, 5 y 6) en la ZAC correspondiente a la junta J4R-3, a 10KV, con magnificación 4000.....	115
<b>Tabla 3.19.</b> Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS, dentro (sitios 1, 2 y 3) y en los bordes de grano (sitios 4, 5 y 6) en el MA correspondiente a la junta J4R-4, a 10KV, con magnificación 1000.....	118
<b>Tabla 3.20.</b> Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS, dentro (sitios 4, 5 y 6) y en los bordes de grano (sitios 1, 2 y 3) en la ZAC correspondiente a la junta J4R-4, a 10KV, con magnificación 4000.....	118
<b>Tabla 3.21.</b> % Variación de la dureza promedio de las juntas J1R, J2R, J3R y J4R con respecto a la junta J1 (sin reparación) en la LS y LI.....	122

<b>Tabla 3.22.</b> Valores de energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy V a $-29^{\circ}\text{C}$ .....	123
<b>Tabla 3.23:</b> % Variación de la resistencia al impacto con respecto a la junta J1 a $-29^{\circ}\text{C}$ en la ZAC y MA .....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Probable efecto de endurecimiento de varios elementos disueltos en hierro alfa (Tomada del libro de E.C. Bain y H.W. Paxton, <i>Alloying elements in Steel</i> , 2da. Ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961.) [13] .....	6
<b>Figura 1.2:</b> Menor efecto del cromo en los aceros recocidos, comparado con su gran efecto como reforzador mediante la influencia que ejerce sobre la estructura de los aceros enfriados en aire. (Tomada del libro de E.C. Bain y H.W. Paxton, <i>Alloying elements in Steel</i> , 2da. Ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961.) [13] .....	7
<b>Figura 1.3:</b> Diagrama CCT del acero 5Cr – 0.5Mo (SAE 51501) [14]: composición: 0-14% C – 0.45% Mn – 0.26% Si – 0.016% P – 0.025% S – 4.66% Cr – 0.56% Mo – 0.13% Ni; tamaño de grano: 8-9; austenizado a $920^{\circ}\text{C}$ ( $1688^{\circ}\text{F}$ ); A = Austenita, B = Bainita, P = Perlita, M = Martensita .....	12
<b>Figura 1.4:</b> Microestructura del tubo de suministro [26] .....	25
<b>Figura 1.5:</b> Microestructura del acero soldado 5%Cr-0.5%Mo sin PWHT; a) $100\ \mu\text{m}$ y b) $20\ \mu\text{m}$ [9] .....	25
<b>Figura 1.6:</b> Junta soldada después del PWHT $500^{\circ}\text{C}$ - 1 h [26] .....	26
<b>Figura 1.7:</b> Microestructura de Junta soldada después de PWHT $750^{\circ}\text{C}$ - 1 h [9] .....	27
<b>Figura 1.8:</b> Microestructura de Junta soldada después de PWHT $800^{\circ}\text{C}$ – 7h [9] y [26] .....	28
<b>Figura 1.9:</b> Microestructura de junta soldada de acero 5%Cr-0.5%Mo del espécimen con “P = 22.37” (caracteres - ubicación de las áreas de análisis de la composición química) [26] .....	29
<b>Figura 1.10.</b> Diagramas de fase de equilibrio que ilustran varias condiciones para la precipitación de una segunda fase. En todos los casos, la matriz del producto de dos fases tiene la misma estructura cristalina que la monofase inicial, pero con una composición de equilibrio diferente ( $\alpha$ o $\beta$ ) [31] .....	31
<b>Figura 2.1.</b> Equipo de soldadura PipeWorx 400 con registrador de datos conectado a la laptop ....	35
<b>Figura 2.2.</b> Equipo de calentamiento por inducción: con su registrador de datos, usando dos termocuplas de control .....	36

<b>Figura 2.3.</b> Horno de cámara: figura 2.3a, manteniendo la temperatura de 800°C; figura 2.3b, manteniendo la temperatura de 950°C; figura 2.3c y 2.3d ingreso de cupones soldados al horno ...	37
<b>Figura 2.4.</b> Horno portátil conservador y secador de electrodos revestidos .....	38
<b>Figura 2.5:</b> Dependencia de propiedades de la unión soldada del acero 5%Cr-0.5%Mo con el parámetro “P” [26]: figura 2.5a, resistencia al impacto con el parámetro “P”; figura 2.5b, resistencia a la fluencia con el parámetro “P” .....	43
<b>Figura 2.6:</b> Dependencia de propiedades de la unión soldada del acero 5%Cr-0.5%Mo con el parámetro “P” [28]: figura 2.6a, resistencia a la fluencia con el parámetro “P”; figura 2.6b, resistencia a la tracción con el parámetro “P”; figura 2.6c, resistencia al impacto con el parámetro “P” .....	44
<b>Figura 2.7.</b> Preparación de cupón: a) soldadura en los biseles de los semi-niples y en la plancha que forma el semi-cupón; b); c); y d) soldadura de una termocupla por resistencia eléctrica .....	48
<b>Figura 2.8.</b> Introducción de la manguera del gas de respaldo dentro de la fibra cerámica .....	49
<b>Figura 2.9.</b> Instalación del equipo de calentamiento por inducción, figuras 2.9a y 2.9b; soldadura del cupón, figura 2.9c y 2.9d; medición de la temperatura entre pases, figura 2.9e .....	50
<b>Figura 2.10:</b> flujograma de la soldadura de cupones simulando tres y cuatro reparaciones variando las variables del tratamiento termico.....	53
<b>Figura 2.11:</b> Localización de las Indentaciones de Dureza Vickers [10].....	57
<b>Figura 2.12:</b> Equipo de Dureza Zwick/Roell ZHV; a) Indentando la probeta con código de prueba 7, b) Después de la indentación (finalizado el tiempo de aplicación de la carga, c) Valor de dureza HV10 obtenido.....	58
<b>Figura 2.13:</b> Dimensiones de la sección transversal para calcular el área transversal en la zona de la entalla, para el cálculo de la resistencia al impacto.....	59
<b>Figura 2.14.</b> Equipo de Impacto; a) Equipo ajustado en la marca “0”, b) Datos del equipo, c) sub-probetas enfriadas a -29°C, listas a ser ensayadas, d) sub-probeta colocada en los apoyos del equipo .....	60
<b>Figura 2.15:</b> Microscopio óptico de luz reflejada para análisis metalográfico .....	61
<b>Figura 2.16:</b> Microscopio electrónico de barrido (SEM).....	62
<b>Figura 3.1.</b> Microestructura del metal base (suministro) a 100X, 200X y 500X .....	65
<b>Figura 3.2.</b> Microestructura capturada del microscopio óptico a diferentes aumentos en la línea superior del metal de aporte: 100X, figura 3.2a; 200X, figura 3.2b y 500X, figura 3.2c .....	67

<b>Figura 3.3.</b> Microestructura capturada del microscopio óptico a 500X en la línea superior de la zona afectada por el calor.....	68
<b>Figura 3.4:</b> Perfil de dureza de la junta “J1” a través de la zonas de interés de la sección transversal de la soldadura .....	70
<b>Figura 3.5.</b> Microestructura de la junta J1 a 500X en la línea superior del metal de aporte (MA)..	72
<b>Figura 3.6.</b> Microestructura de la junta J1 a 500X en la línea superior de la ZAC .....	73
<b>Figura 3.7.</b> Comparación de los perfiles de dureza en la línea superior (línea paralela a la superficie externa de la tubería, a 1.5 mm) de las juntas reparadas J3R con cuatro configuraciones de tratamiento térmico (tabla 3.7).....	76
<b>Figura 3.8.</b> Comparación de los perfiles de dureza en la línea inferior (línea paralela a la superficie interna de la tubería, a 1.5 mm) de las juntas reparadas J3R con cuatro configuraciones de tratamiento térmico (tabla 3.7).....	77
<b>Figura 3.9.</b> Comparación de los perfiles de dureza en la línea superior (línea paralela a la superficie externa de la tubería, a 1.5 mm) de las juntas reparadas J4R con cuatro configuraciones de tratamiento térmico (tabla 3.7).....	78
<b>Figura 3.10.</b> Comparación de los perfiles de dureza en la línea superior (línea paralela a la superficie interna de la tubería, a 1.5 mm) de las juntas reparadas J4R con cuatro configuraciones de tratamiento térmico (tabla 3.7).....	79
<b>Figura 3.11.</b> Comparativo de la Resistencia al Impacto (a -29°C) en la ZAC de las juntas J3R .....	86
<b>Figura 3.12.</b> Comparativo de la Resistencia al Impacto (a -29°C) en la ZAC de las juntas J4R .....	86
<b>Figura 3.13.</b> Microestructuras de la junta J3R-1 a 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.13a; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.13b .....	93
<b>Figura 3.14.</b> Microestructura de la Junta J3R-2 con PWHT (800°C, 2h) a 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.14a; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.14b .....	94
<b>Figura 3.15.</b> Microestructura de la Junta J3R-3 con PWHT (950°C, 2h) a 200X y 500X: Metal Base (MB), figuras 3.15a y 3.15b; Metal de Aporte (MA), figuras 3.15c y 3.15d; y Zona Afectada por el Calor (ZAC), figuras 3.15e y 3.15f .....	95
<b>Figura 3.16.</b> Microestructura de la Junta J3R-4 con BWHT (950°C, 2h) y PWHT (725°C, 2h) a 200X y 500X: Metal Base (MB), figuras 3.16a y 3.16b, Metal de Aporte (MA), figura 3.16c y 3.16d; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figuras 3.16e y 3.16f .....	96
<b>Figura 3.17.</b> Microestructuras de la junta J4R-1 a 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.17a; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.17b .....	97

<b>Figura 3.18.</b> Microestructura de la Junta J4R-2 con PWHT (800°C, 2h) a 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.18a; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.18b .....	98
<b>Figura 3.19.</b> Microestructura de la Junta J4R-3 con PWHT (950°C, 2h) a 200X y 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.19a y 3.19b; y Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.19c y 3.19d.....	99
<b>Figura 3.20.</b> Microestructura de la Junta J4R-4 con BWHT (950°C, 2h) y PWHT (725°C) a 500X: Metal Base (MB), figuras 3.20a y 3.20b; Metal de Aporte (MA), figura 3.20c; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.20d.....	100
<b>Figura 3.21.</b> Identificación y contabilización de rayos X característicos en los bordes de grano del MA correspondiente a la junta J4R-4, 30KV, con magnificación de 1000: figura 3.21a, localización de los sitios 1 y 2; figuras 3.21b y 3.21c, identificación y contabilización de Rayos X característicos.....	104
<b>Figura 3.22.</b> Identificación y contabilización de rayos X característicos dentro de los granos del MA correspondiente a la junta J4R-4, 30KV, con magnificación de 1000: figura 3.22a , localización de los sitios 1, 2 y 3; figuras 3.22b, 3.22c y 3.22d, identificación y contabilización de Rayos X característicos.....	105
<b>Figura 3.23.</b> Identificación y contabilización de rayos X característicos dentro de los granos del MA correspondiente a la junta J4R-4, 10 KV, con magnificación de 1000: figura 3.23a , localización de los sitios 1, 2 y 3; figuras 3.23b, 3.23c y 3.23d, identificación y contabilización de Rayos X característicos.....	106
<b>Figura 3.24.</b> Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano del MA correspondiente a la junta J4R-1 (con PWHT, T=725°C), a 10KV, con magnificación de 4000: ubicación de los sitios, del 1 al 3 - límite de grano y del 4 al 6 - dentro de los granos .....	108
<b>Figura 3.25.</b> Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano de la ZAC correspondiente a la junta J4R-1 (con PWHT, T=725°C), a 10KV, con magnificación de 4000: ubicación de los sitios, del 1 al 3 - límite de grano y sitios del 4 al 6 - dentro del grano.....	108
<b>Figura 3.26.</b> Localización de los sitios (figuras 3.26a y 3.26b) dentro y en los bordes de grano en el MA correspondiente a la junta J4R-3, a 10KV, con magnificación 4000: ubicación de los sitios dentro del grano, sitios 1, 2 y 3 - superficie llana y sitios 4, 5 y 6 – superficie con resalte; ubicación de los sitios en los bordes de grano, sitios 7, 8 y 9.....	113
<b>Figura 3.27.</b> Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano en la ZAC correspondiente a la junta J4R-3, a 10KV, con magnificación 4000: sitios dentro del grano, 1, 2 y 3 en un micro-constituyente con relieve rugoso; sitios dentro del grano, 7, 8 y 9 en otro micro-constituyente con relieve llano; sitios en los bordes de grano, 4, 5 y 6 .....	113

<b>Figura 3.28.</b> Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano en el MA correspondiente a la junta J4R-4, a 10KV, con magnificación 1000: sitios del 1 al 3 – dentro del grano; sitios del 4 al 6 – bordes del grano.....	117
<b>Figura 3.29.</b> Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano en la ZAC correspondiente a la junta J4R-4, a 10KV, con magnificación 4000: sitios 4, 5 y 6 – dentro del grano; sitios 1, 2 y 3 – borde de grano.....	117
<b>Figura 3.30.</b> Comparación de perfiles de dureza en la línea superior (línea paralela a la superficie externa de la tubería, a 1.5 mm) de las probetas de las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R con parámetro “P = 20.26” .....	120
<b>Figura 3.31.</b> Comparación de perfiles de dureza en la línea inferior (línea paralela a la superficie inferior de la tubería, a 1.5 mm) de las probetas de las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R con parámetro “P = 20.26” .....	121
<b>Figura 3.32.</b> Comparativo de la resistencia al impacto (a -29°C) en la ZAC, MA y metal base de suministro con parámetro “P” = 20.26.....	124
<b>Figura 3.33.</b> Microestructuras de la junta J1R a 500X: metal de aporte (MA), figura 3.33a; zona afectada por el calor (ZAC), figura 3.33b .....	127
<b>Figura 3.34.</b> Microestructuras de la junta J2R a 500X: metal de aporte (MA), figura 3.34a; zona afectada por el calor (ZAC), figura 3.34b .....	128

## INTRODUCCIÓN

Al soldar, reparar o deformar mecánicamente los aceros ASTM A335, las transformaciones micro-estructurales y las tensiones internas residuales pueden reducir la fiabilidad y durabilidad de la tubería en servicio; con el fin de reducir la influencia de tales transformaciones micro-estructurales y las tensiones internas en la juntas soldadas, se realiza la operación de tratamiento térmico [7] y [8]. Al reparar las tuberías ASTM A335, la temperatura y el tiempo de exposición del tratamiento térmico, aumentan considerablemente para garantizar el valor de dureza requerido, ya que el valor de dureza del metal es el principal criterio de evaluación de la efectividad del tratamiento térmico [9].

El acero ASTM A335 Gr. P5 (5% Cr - 0.5% Mo de bajo carbono) es unido mediante procesos de soldadura por arco eléctrico, generalmente con los procesos GTAW y/o SMAW [10], tal como lo especifican los códigos de construcción ASME B31.3 [4], ASME B31.1 [5] y Welding Procedure GP 18-07-01 [6]. Los procesos de soldadura son aplicados con Especificaciones de Procedimiento de Soldadura (WPS) y ejecutado por Soldadores con la Habilidad Calificada (WPQ), no obstante, frecuentemente se presentan defectos de sanidad en las juntas soldadas, los cuales son detectados por Ensayos No Destructivos (END) volumétricos (UT y/o RT), estos defectos deben ser reparados y ensayados mínimamente con el mismo método de END mediante el cual fue detectado el defecto, y en el caso de que continúe el defecto, se procederá a reparar nuevamente con la penalidad respectiva (se incrementa el porcentaje de END), y así sucesivamente hasta que la junta ensayada sea aceptable [4] y [5]. Sin embargo, no se puede afirmar que una junta soldada con END aceptable que ha sido reparada repetidas veces, sea liberada considerando solamente la sanidad volumétrica, sin considerar el efecto del tratamiento térmico aplicado sobre la variación en la dureza, resistencia al impacto y los cambios en la microestructura. No se ha determinado adecuadamente en los códigos de calificación y construcción qué impacto tiene las repetidas reparaciones y la intensidad del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas y tenacidad del acero soldado con 5% Cr - 0.5% Mo de bajo carbono. Una referencia encontrada en la cual se indica el número de reparaciones de soldadura permitido,

es un documento de propiedad de la empresa TRT (TECNICAS REUNIDAS TALARA), “Requisitos de Calidad para Subcontratistas PP-02070-I-203-Att01 Rev.1” [11], en la cual detalla que no son admisibles más de 2 reparaciones en soldaduras de aceros con P-número diferente al P1, el acero ASTM A335 Gr. P5 tiene P-número 5B (según ASME Secc. IX [12]).

Objetivos principales: en la presente tesis se determinara el efecto del tratamiento térmico en las reparaciones repetidas por soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 sobre la dureza, resistencia al impacto y microestructura, determinando las configuraciones de tratamiento que son aceptables y no aceptables; otro de los objetivos es determinar la variación de dureza, resistencia al impacto y microestructura simulando desde la primera hasta la cuarta reparación con la mejor condición (configuración) de tratamiento térmico obtenido.

Objetivos específicos:

- Se verificará si el metal base cumple con algunos requerimientos de la especificación ASTM A335, la finalidad es asegurar que los valores obtenidos en los ensayos de los cupones soldados sean correctos;
- Determinar en base a la revisión del estado del arte, el óptimo valor del parámetro “P”, buscando los máximos valores de resistencia al impacto para el acero soldado ASTM A335 Gr. P5;
- Caracterizar las muestras del “cupón soldado sin reparación” mediante los ensayos de dureza, impacto charpy V y análisis de la microestructura, con la finalidad de que estos valores sean razonablemente comparables con los valores obtenidos en estudios anteriores, y que estos valores sean usados como referencia para los valores obtenidos de los cupones soldados con repetidas reparaciones;
- Confirmar la presencia de los carburos en las microestructuras tanto en el metal de aporte como en la zona afectada por el calor.



**CAPÍTULO I**

**FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## **1.1. Aceros Aleados**

Los aceros al carbono son muy satisfactorios donde la resistencia y otros requisitos no son muy severos. Estos aceros se utilizan también con mucho éxito a las temperaturas comunes y en atmósferas que no son altamente corrosivas, pero su templabilidad relativamente baja limita la resistencia que puede obtenerse, excepto en secciones regularmente delgadas. Casi todos los aceros endurecidos son sometidos a la operación de revenido para reducir las tensiones internas. Los aceros al carbono muestran una disminución en resistencia mecánica y dureza con el incremento de la temperatura de revenido. Este comportamiento disminuirá su aplicabilidad para piezas que requieren dureza por arriba de la temperatura de ambiente. La mayoría de las limitaciones de los aceros al carbono pueden vencerse mediante el uso de elementos de aleación. Un *acero aleado* puede definirse como aquel cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente del carbono. Aunque todos los aceros al carbono contienen moderadas cantidades de manganeso (hasta del 0.90%) y silicio (hasta del 0.30%) no se consideran aleados, porque la función principal del manganeso y del silicio es actuar como desoxidantes. Estos se combinan con el oxígeno y con el azufre, para reducir el efecto nocivo de dichos elementos. [13]

### **1.1.1. El Propósito de la Aleación**

Los elementos de aleación se añaden a los aceros para muchos propósitos, entre los cuales los más importantes son [13]:

1. Aumentar la templabilidad;
2. Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas;
3. Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima;
4. Aumentar la resistencia al desgaste;
5. Aumentar la resistencia a la corrosión, y
6. Mejorar las propiedades magnéticas.

Los elementos de aleación pueden clasificarse de acuerdo con la forma en que se distribuyen en los dos grupos principales de un acero recocido [13].

Grupo 1 Elementos que se disuelven en ferrita, y

Grupo 2 Elementos que se combinan con carbono para formar carburos simples o complejos

### 1.1.2. Efectos de los Elementos de Aleación en la Ferrita

Desde el punto de vista técnico, probablemente hay alguna solubilidad de todos los elementos en la ferrita, pero ciertos elementos no se encuentran extensivamente en la fase carburo. De esta manera, el níquel, el aluminio, el silicio, el cobre y el cobalto se hallan ampliamente disueltos en ferrita. En ausencia de carbono, se encontrarán disueltas en ferrita grandes proporciones de elementos del grupo 2; por lo tanto, la tendencia a formar carburos es obvia sólo cuando hay gran cantidad de carbono. La tabla 1.1 muestra el comportamiento de los elementos individuales, y la tendencia relativa de ciertos elementos a existir en ambos grupos son indicados por el tamaño de la punta de las flechas. [13]

Tabla 1.1: Comportamiento de los elementos individuales en un acero recocido (Adaptado del libro de E.C. Bain y H.W. Paxton, *Alloying elements in Steel*, 2da. Ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961.) [13]

Elemento de Aleación	Grupo 1: disuelto en ferrita	Tendencia de los elementos	Grupo 2: combinado en carburo
Níquel (Ni)	Ni		
Silicio (Si)	Si		
Aluminio (Al)	Al		
Cobre (Cu)	Cu		
Manganeso (Mn)	Mn	↔	Mn
Cromo (Cr)	Cr	↔	Cr
Tungsteno (W)	W	↔	W
Molibdeno (Mo)	Mo	↔	Mo
Vanadio (V)	V	↔	V
Titanio (Ti)	Ti	↔	Ti

Cualquier elemento disuelto en ferrita aumenta su dureza y su resistencia mecánica de acuerdo con los principios generales del endurecimiento por solución sólida. El orden de incremento de efectividad en hierro reforzado, basada en adiciones iguales por peso, parece ser como sigue: cromo, tungsteno, vanadio, molibdeno, níquel, manganeso y silicio (figura 1.1). El efecto de endurecimiento de los elementos disueltos es realmente insignificante en

los aceros recocidos e ilustra cuán relativamente pequeña es la contribución del reforzamiento de la ferrita a la resistencia mecánica total del acero. Esto se muestra en la figura 1.2 para aleaciones al cromo de aceros de bajo carbono, la curva superior indica la influencia del cromo para modificar la resistencia tensil cambiando la micro-estructura en aceros enfriados al aire, en tanto que la curva inferior indica la menor influencia del cromo sin variar la micro-estructura esencialmente en aceros enfriados en horno. [13]

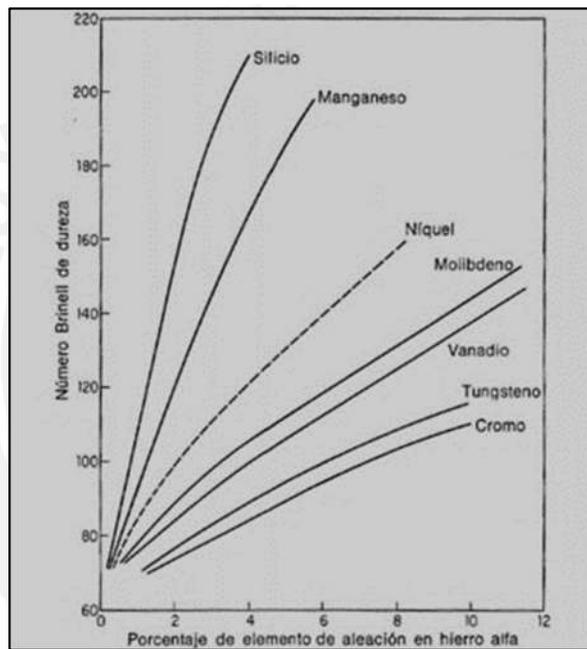


Figura 1.1: Probable efecto de endurecimiento de varios elementos disueltos en hierro alfa (Tomada del libro de E.C. Bain y H.W. Paxton, *Alloying elements in Steel*, 2da. Ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961.) [13]

### 1.1.3. Efectos de los Elementos de Aleación en el Carburo

Como todos los carburos encontrados en los aceros son duros y frágiles, su efecto en las propiedades tensiles a temperatura ambiente es análoga, sin importar la composición específica. La presencia de elementos que forman carburos influyen en la temperatura de endurecimiento y en el tiempo necesario para obtener un calentamiento total y uniforme. [13]

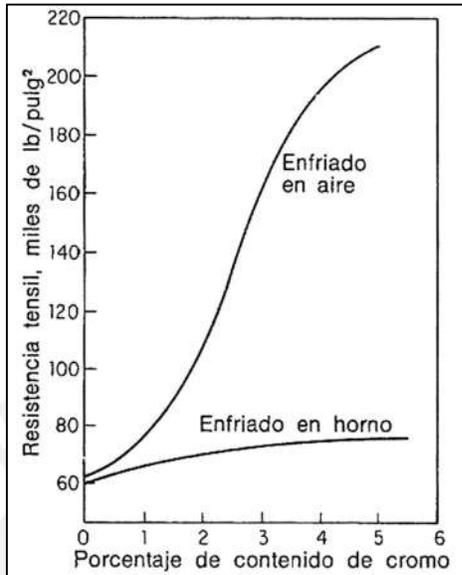


Figura 1.2: Menor efecto del cromo en los aceros recocidos, comparado con su gran efecto como reforzador mediante la influencia que ejerce sobre la estructura de los aceros enfriados en aire. (Tomada del libro de E.C. Bain y H.W. Paxton, *Alloying elements in Steel*, 2da. Ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961.) [13]

Los carburos complejos son lentos de disolver y tienden a no disolverse en austenita. Esto hace que disminuyan los contenidos de carbono y aleación en la austenita a una cantidad por debajo de la cual tiene el acero en general. Los carburos no disueltos también actúan para reducir el crecimiento de grano. Ambos efectos tienden a reducir la templabilidad. Cuando están disueltos en austenita, los elementos formadores de carburo favorecen grandemente el endurecimiento profundo. [13]

Aunque todos los carburos encontrados en el acero son compuestos duros y frágiles, los carburos de cromo y vanadio resultan excepcionales en dureza y resistencia al desgaste. La dureza y la resistencia al desgaste de los aceros aleados ricos en carburos las determinan en gran medida la cantidad, el tamaño y la distribución de estas partículas duras. A su vez, estos factores son controlados por la composición química, el método de manufactura y el tratamiento térmico. [13]

## **1.2. Aceros Cromo-Molibdeno**

Los aceros de cromo-molibdeno (Cr-Mo) se utilizan ampliamente en la industria del petróleo y en la generación de energía, debido a su adecuada resistencia mecánica ( $-29^{\circ}\text{C}$  a  $593^{\circ}\text{C}$  con presiones de  $105.5\text{ kg/cm}^2$  [ $10.4\text{ MPa}$ ] y  $13.4\text{ kg/cm}^2$  [ $1.3\text{ MPa}$ ] respectivamente [1]) y resistencia a la corrosión frente a los aceites crudos que contienen sulfuro de hidrogeno y otros agentes corrosivos [2] y [3]. Los aceros ASTM A335 Gr. P5, son usados como tuberías para vapor, intercambiadores de calor, condensadores y catalizadores [3].

Los aceros Cr-Mo contienen de 0.5 a 9 por ciento de cromo y 0.5 a 1 por ciento de molibdeno. El contenido de carbono es normalmente inferior al 0.20 por ciento para una buena soldabilidad, sin embargo, las aleaciones tienen alta templabilidad (endurecimiento). El cromo proporciona una mejor resistencia a la oxidación y corrosión y el molibdeno aumenta la resistencia a temperaturas elevadas. Normalmente se suministran en estado recocido o normalizado y revenido. [8]

### **1.2.1. Designación y Especificación**

Los aceros Cr-Mo son identificados por la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM), y la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) con un número de especificación. Cada especificación incluye información respecto a rangos de composición química, dimensiones y tolerancias, propiedades mecánicas mínimas y otros requerimientos funcionales. La designación ASTM comienza con la letra A, seguida del número de la especificación, y otras letras o números para distinguir diferentes elementos o grados específicos de material. La designación ASME es idéntica, excepto que todas las especificaciones comienzan con las letras SA. El número de especificación o norma cambia según el proceso de fabricación (fundido, forjado, etc.) o la forma de presentación (lámina, tubo, etc.) del material. En la tabla 1.2 se muestran varias designaciones de aceros aleados ferríticos.

Tabla 1.2. Designación de Aceros Cromo-Molibdeno (extracto de las tablas QW/QB-422, ASME BPVC.IX-2017) [12]

Nominal composition	Plate	Seamless Pipe	Fusion welded Pipe	Casting	Forgings	Piping fittings
<b>C-0.5Mo</b>	SA-204 Gr. A; SA-204 Gr. B y SA-204 Gr. C	SA-335 Gr. P1	SA-672 Gr. L65; SA-672 Gr. L70; SA-672 Gr. L75; SA-691 Gr. CM-65; SA-691 Gr. CM-70; SA-691 Gr. CM-75	SA-217 Gr. WC1; SA-352 Gr. LC1; SA-356 Gr. 2	SA-182 Gr. F1; SA-336 Gr. F1	SA-234 Gr. WP1
<b>1.25Cr-0.5Mo-Si</b>	SA-387 Gr. 11, CL1	SA-335 Gr. P11	SA-691 Gr. 1.25Cr, CL. 1; SA-691 Gr. 1.25Cr, CL 2		SA-182 Gr. F11 CL. 2; SA-182 Gr. F11 CL. 3; SA-182 Gr. F11 CL. 1; SA-336 Gr. F11, CL. 2; SA-336 F11, CL. 3; SA-336 Gr.F11, CL. 1; SA-541 Gr. 11, CL. 4	SA-234 Gr. WP11, CL. 1; SA-234 Gr. WP11, CL. 3
<b>2¼Cr-1Mo</b>	SA-387 Gr. 22, CL. 1; SA-387 Gr. 22, CL. 2; SA-542 Gr. A, CL. 1; SA-542 Gr. A, CL. 2; SA-542 Gr. A, CL. 3; SA-542 Gr. A, CL. 4; SA-542 Gr. A, CL. 4a; SA-542 Gr. B, CL. 1; SA-542 Gr. B, CL. 2; SA-542 Gr. B, CL. 3; SA-542 Gr. B, CL. 4; SA-542 Gr. B, CL. 4a	SA-335 Gr. P22	SA-691 Gr. 2.25Cr, CL. 1; SA-691 Gr. 2.25Cr, CL. 2	SA-487 Gr. 8, CL. A; SA-487 Gr. 8, CL. B; SA-487 Gr. 8, CL. C; SA-217 Gr. WC9	SA-508 Gr. 22, CL. 3; SA-541 Gr. 22, CL. 3; SA-541 Gr. 22, CL. 4; SA-541 Gr. 22, CL. 5; SA-541 Gr. 22V; SA-182 Gr. F22, CL. 1; SA- 182 Gr. F22, CL. 3	SA-234 Gr. WP22, CL. 1; SA-234 Gr. WP22, CL. 3
<b>5Cr-½Mo</b>	SA-387 Gr. 5 CL. 1	<b>SA-335 Gr. P5</b>	SA-691 Gr. 5Cr, CL. 1; SA-691 Gr. 5Cr, CL. 2	SA-217 Gr. C5	SA-336 Gr. F5; SA-182 Gr. F5; SA-182 Gr. F5a	SA-234 Gr. WP5, CL. 1; SA-234 Gr. WP5, CL. 3
<b>9Cr-1Mo</b>	SA-387 Gr. 9, CL. 1 SA-387 Gr. 9, CL. 2	SA-335 Gr. P9	---	SA-217 Gr. C12	SA-182 Gr. F9; SA-336 Gr. F9	SA-234 Gr. WP9, CL. 1; SA-234 Gr. WP9, CL. 3
<b>9Cr-1Mo-V</b>	SA-387 Gr. 91, CL. 2	SA-335 Gr. P91	SA-691 Gr. 91	SA-217 Gr. C12A; SA-356 Gr. 12A	SA-182 Gr.F91; SA-336 Gr. F91; SA/EN 10222-2 Gr. X10CrMoVNb9-1	SA-234 WP91

### **1.2.2. Metalurgia de la Soldadura de los Aceros Cr-Mo**

Los aceros cromo-molibdeno se endurecen cuando se enfrían a partir de la temperatura de austenización, y son sensibles al agrietamiento inducido por el hidrógeno. Al soldar, reparar o deformar mecánicamente los aceros cromo-molibdeno, las transformaciones microestructurales y las tensiones internas residuales pueden reducir la fiabilidad y durabilidad de la tubería en servicio.

Los procedimientos de soldadura deben contener las salvaguardas necesarias para evitar el agrietamiento en el metal de soldadura y la zona afectada por el calor. Esto incluye el agrietamiento de temple y el agrietamiento inducido por hidrógeno. Se debe utilizar un adecuado precalentamiento y consumibles para evitar grietas.

Un tratamiento térmico posterior a la soldadura se utiliza para reducir la influencia de las transformaciones micro-estructurales y las tensiones internas residuales, y para mejorar la tenacidad del metal de soldadura y la zona afectada por el calor, considerando el contenido de carbono del metal base y del metal de aporte, así como los efectos de la dilución [7] y [8].

Deben utilizarse procesos y procedimientos de soldadura con metales de aporte de bajo hidrógeno. La composición del metal de aporte debe ser casi la misma que la del metal base, excepto por el contenido de carbono. El contenido de carbono del metal de aporte suele ser inferior al del metal base. Sin embargo, se requiere un contenido de carbono adecuado cuando la soldadura debe ser templada y revenida o normalizada y revenida. [8]

### **1.2.3. Diagramas de Transformación de Enfriamiento Continuo (CCT)**

Estos diagramas ilustran los patrones típicos de respuesta de transformación de los diversos aceros cuando se enfrían en aire, aceite o agua. Estos diagramas CCT pertenecen solo al centro de una barra, pero las estructuras en otras posiciones se pueden inferir. Por ejemplo, la estructura producida al enfriar en alguna posición media radial en una barra de gran diámetro corresponderá a la producida en el centro de una barra de menor diámetro,

denominado diámetro equivalente, produciéndose estructuras similares a velocidades de enfriamiento similares. [14]

La temperatura de austenización y el tiempo de permanencia afectan el tamaño de grano de la austenita, por lo tanto, modifican las características de transformación posteriores en el enfriamiento. La temperatura de austenización también afecta a la composición de la austenita si el acero contiene elementos fuertes formadores de carburo y, en consecuencia, pueden estar presentes carburos no disueltos. Por lo tanto, se debe tener cuidado al adaptar los diagramas para austenizar condiciones diferentes a las indicadas. [14]

Los diagramas no son adecuados para su uso en situaciones de soldadura en las que las zonas afectadas por el calor pueden alcanzar temperaturas del orden de 1300 a 1350 °C durante períodos muy cortos. Después de tal tratamiento, se esperaría que la forma del diagrama se modificara drásticamente a las velocidades de enfriamiento más rápidas que son relevantes para esta situación. Sin embargo, la modificación real de las transformaciones depende de la entrada de calor, precalentamiento/post-calentamiento, etc. Por lo tanto, el uso de los diagramas CCT en situaciones de soldadura se limita al posicionamiento aproximado de la temperatura  $M_s$  de la zona afectada por el calor para cálculos de precalentamiento [14].

En la figura 1.3, se muestra el diagrama CCT para el acero 5Cr – 0.5Mo (SAE 51501).

### **1.3. Especificación de las Tuberías de Acero Aleado Ferrítico ASTM A335 Gr. P5**

Las tuberías de acero ferrítico ASTM A335 (son parte de la familia de aceros Cr-Mo) son adecuados para curvado y operaciones de conformado, y para soldadura por fusión. La selección dependerá del diseño, las condiciones del servicio, las propiedades mecánicas y las características de alta temperatura. [15]

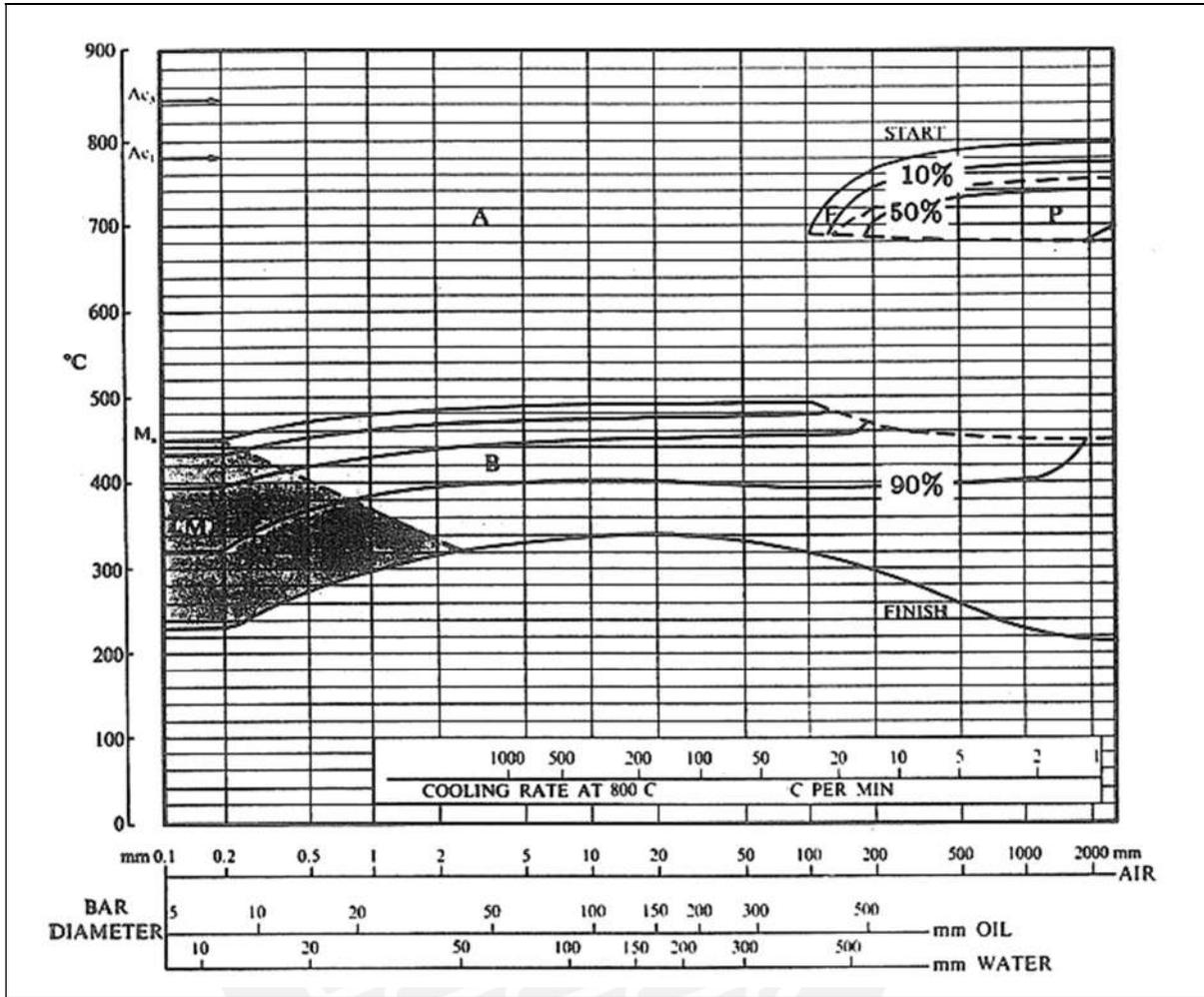


Figura 1.3: Diagrama CCT del acero 5Cr – 0.5Mo (SAE 51501) [14]: composición: 0-14% C – 0.45% Mn – 0.26% Si – 0.016% P – 0.025% S – 4.66% Cr – 0.56% Mo – 0.13% Ni; tamaño de grano: 8-9; austenizado a 920°C (1688°F); A = Austenita, B = Bainita, P = Perlita, M = Martensita

Los aceros ferríticos se definen como aceros de baja, intermedia y alta aleación que contienen hasta 10% de cromo inclusive. Las tuberías pueden ser de acabado en caliente o en frío con el tratamiento. Los requerimientos de composición química, tratamiento térmico de acabado y propiedades de tracción para el acero ferrítico Gr. P5, son mostrados en la Tabla 1.3.

Más requisitos de fabricación de las tuberías, como, alcance, información de despacho, análisis del producto, requisitos de elongación, variaciones permitidas en diámetro, etc., se encuentran detallados en la norma ASTM A335/A335M – 15a. [15].

Tabla 1.3. Requerimientos químicos, tratamiento térmico y resistencia a la tracción del acero ASTM A335 Gr.P5 [15]

<b>Requerimientos de composición química</b>								
Grado	Designación UNS	% Composición						
		Carbón	Manganeso	Fósforo máx.	Azufre máx.	Silicio	Cromo	Molibdeno
P5	K41545	0.15 máx.	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50 máx.	4.00-6.00	0.45-0.65
<b>Requerimientos de tratamiento térmico</b>								
Grado	Tipo de tratamiento térmico				Temperatura sub-crítica de recocido o revenido, mín. o rango °F [°C]			
P5	Recocido completo o isotérmico				....			
	Normalizado y revenido				1250 [675]			
<b>Requerimientos de tracción</b>								
Grado	Resistencia a la tracción mínima			Resistencia a la fluencia mínima				
	Ksi		MPa	Ksi		MPa		
P5	60		415	30		205		

## 1.4. Consideraciones y Requerimientos Generales de la Soldadura de los Aceros Cr-Mo

### 1.4.1. Procesos de Soldadura

En principio, varios procesos de soldadura por arco eléctrico pueden aplicarse. Los procesos de soldadura aceptables más usados son los siguientes [10]:

- a) Shielded Metal Arc Welding (SMAW)
- b) Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) y Pulsed GTAW (GTAW-P)
- c) Flux-Cored Arc Welding (FCAW)
- d) Submerged Arc Welding (SAW)
- e) Gas Metal Arc Welding (GMAW) para los siguientes modos de transferencia: 1) spray (GMAW-Sp); 2) short circuiting (GMAW-Sp); 3) pulsed (GMAW-P) y 4) globular (GMAW-G)
- f) Electro Gas Welding (EGW)
- g) Plasma Arc Welding (PAW)

El proceso GTAW es usado principalmente para la soldadura del pase de raíz y refuerzo de raíz en juntas a tope de tuberías, debido a que la velocidad de avance es menor que en el proceso FCAW y SMAW, este proceso permite soldar en todas las posiciones, inclusive cuando existan restricciones en la junta (ejemplo: juntas cercanas a columnas, equipos, a otras tuberías, cercanas al suelo, etc.).

El proceso SMAW y FCAW es muy usado para los pases de relleno y acabado en juntas de ranura en tuberías y planchas, debido a que la velocidad de avance y la tasa de deposición del metal de aporte son mayores comparadas con el proceso GTAW.

En los proyectos de fabricación e instalación de juntas soldadas a tope en tuberías, es usual que las empresas contratistas tengan procedimientos de soldadura utilizando procesos de soldadura combinados, con el objetivo de reducir los tiempos de soldadura (ejemplo: GTAW+SMAW, GTAW+FCAW, etc.).

#### **1.4.2. Metales de Aporte**

El metal de aporte debe tener la misma composición nominal que el metal base, excepto el contenido de carbono. Normalmente, el contenido de carbono del metal de aporte es menor que la del metal base. [10], [8] y [16]

Para reducir la probabilidad de agrietamiento deben utilizarse metales de aporte con bajo contenido de hidrógeno y deben seguirse las prácticas para reducir el contenido de hidrógeno. Las fuentes potenciales de hidrógeno deben minimizarse o eliminarse. Esto significa tanto eliminar la humedad como otros materiales que contienen hidrógeno (como el aceite, pinturas, etc.) de las superficies de los metales base y utilizando metales de aporte y gases de protección limpios y secos. Para mantener el contenido de humedad de los metales de aporte deben mantenerse procesos adecuados de fabricación, embalaje, almacenamiento y uso, se deben utilizar hornos de almacenamiento estáticos y/o portátiles. [17]

Los metales de aporte recomendados para soldar el acero %5Cr – ½%Mo (ASTM A335 Gr. P5) se muestran en la tabla 1.4.

Tabla 1.4: Metales de aporte recomendados para unir aceros %5Cr – ½%Mo

Composición nominal	SMAW <sup>1</sup> [17]	GTAW/GMAW [17]	FCAW <sup>4</sup> [17]	SAW [8]
5%Cr – ½%Mo	E8018-B6, E8018-B6L, E502-15 <sup>2</sup>	ER80S-B6, ER502 <sup>3</sup>	---	F9XX-EXXX-B6 o B6H
Notas: 1. Si bien el electrodo con el tipo 18 de revestimiento se muestra en esta tabla, los electrodos con el tipo de revestimiento 15 y 16 son igualmente aceptables. 2. Los metales de aporte más nuevos E8018-BX se clasifican en la especificación AWS A5.5; y los metales de aporte más antiguos E50X-XX y E7Cr se clasifican en la especificación AWS A5.4. 3. Los metales de aporte más nuevos ER80S-BX se clasifican en la Especificación AWS A5.28; y los metales de aporte más antiguos ER50X se clasifican en la Especificación AWS A5.9. 4. Los metales de aporte con composiciones químicas correspondientes a la composición nominal no han sido clasificados por la AWS.				

#### 1.4.3. Gas de Respaldo

Gas de respaldo es requerido para los procesos GTAW y GMAW para los materiales de aporte que tengan un contenido nominal de cromo superior al 2.5%, a menos que la unión se desbaste o se remueva el metal de aporte depositado [10].

#### 1.4.4. Pre calentamiento y Mantenimiento de Temperatura

La soldadura exitosa de los aceros aleados ferríticos utilizados para recipientes a presión y tuberías requiere la consideración de pre calentamiento y mantenimiento de la temperatura durante la soldadura para evitar el endurecimiento y el agrietamiento, debido a que el Cr y Mo aumentan la templeabilidad de estos aceros y, en esas condiciones, son susceptibles a la fragilización por hidrogeno. Además, el efecto del espesor del acero, tiende a aumentar la velocidad de enfriamiento cuando se incrementa el espesor de pared. [16] y [18]

En la Tabla 1.5 se presentan las temperaturas mínimas de precalentamiento e interpasas recomendadas por los códigos de construcción, estándares o especificaciones para el acero de composición nominal 5%Cr – ½%Mo que pertenece al P-Número 5B (identificación de acuerdo a ASME sección IX)

Tabla 1.5: Temperatura de precalentamiento y mantenimiento de la temperatura para el acero 5%Cr – ½%Mo

Código de construcción, estándar o especificación	Espesor, mm [in] / Límites adicionales	Temperatura mínima de precalentamiento, °C [°F]	Temperatura entre pasas, °C [°F]	Resistencia a la tracción máxima, MPa [ksi]
ASM HANDBOOK, Volume 6: Welding, Brazing and Soldering [19]	Todos los tamaños disponibles por las especificaciones ASTM	150 [300]	150 [300] mín.	415 [60]
	Todos los tamaños disponibles por las especificaciones ASTM	205 [400]	205 [400] mín.	> 415 [60]
Power Piping - ASME B31.1-2016 [5] and Process Piping – ASME B31.3-2014 [4]	Todos	150 [300]	150 [300] mín., nota 2	SMTS ≤ 414 [60]
	Todos	200 [400]	200 [400] mín., nota 2	SMTS > 414 [60]
	> 13 mm [1/2] / %Cr > 6.0, nota 1	200 [400]	200 [400] mín., nota 2	
Welding Procedure - GP 18-07-01 [6] and Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries - API RP 582 “2 <sup>nd</sup> edition [10]	Nota 3 y 4	Cualquier recomendación o requisito de precalentamiento indicado en el código correspondiente se considerará obligatorio.	315 [600] máx.	---
<ul style="list-style-type: none"> <li>- SMTS: Especificación Mínima de Resistencia a la Tracción</li> <li>- Nota 1: La composición puede basarse en el análisis de la colada o producto o según los límites de la especificación</li> <li>- Nota 2: Después de iniciar la soldadura, la temperatura mínima de precalentamiento se mantendrá hasta realizar PWHT requerido.</li> <li>- Nota 3: Es posible que se requieran temperaturas más altas para juntas altamente restringidas (como boquillas muy separadas).</li> <li>- Nota 4: Para recipientes a presión de pared gruesa, la retención de precalentamiento, desgasificación (deshidrogenación) y/o alivio de tensión intermedio, si es necesario, se debe especificar en el WPS o en una hoja de datos complementaria.</li> </ul>				

### **1.4.5. Tratamientos Térmicos**

Los tipos de tratamiento térmico normalmente aplicados a los aceros Cr-Mo son los mismos que los aplicados a otros aceros endurecibles, esto es: recocido, normalizado y revenido, templado y revenido, o solo revenido. Los tratamientos de recocido, normalizado + revenido, y templado + revenido son utilizados para obtener el tamaño de grano deseado o las propiedades mecánicas necesarias para la aplicación. [8]

Un acero Cr-Mo es recocido calentándolo a una temperatura en el rango de 1550 °F (843 °C) a 1675 °F (913 °C) y manteniendo la temperatura durante una hora por pulgada de espesor. Luego se enfría hasta 100 °F (37 °C) a una velocidad máxima de 50 °F (10 °C) por hora dentro de un horno o en aire. Este procedimiento produce una estructura ferrítica relativamente suave en todo el acero. [8]

Los tratamientos de normalización y templado requieren calentar el acero a una temperatura en el rango de 1550 °F (843 °C) a 1675 °F (913 °C), manteniendo la temperatura durante una hora por pulgada de espesor y después enfriar rápidamente a temperatura ambiente. La normalización requiere enfriamiento en aire quieto; en el templado se requiere inmersión o rociado en agua. Estos tratamientos endurecen el acero, donde generalmente se realiza un revenido después del endurecimiento. [8]

Un acero Cr-Mo es revenido a una temperatura seleccionada por debajo de su temperatura crítica inferior AC1 (AC1 aproximadamente 1400 °F (760°C)) durante un tiempo de 1h a 2h generalmente, dependiendo del acero y de los elementos de aleación. Luego se enfría en aire quieto o en el horno. [8]

#### **1.4.5.1. Deshidrogenado**

Los aceros Cr – Mo son susceptibles al ataque de hidrógeno a altas temperatura (HA) que puede resultar en la fractura del componente. Este es un problema costoso de ingeniería para la industria petroquímica. A temperaturas elevadas, el hidrógeno puede difundirse en los

aceros y reaccionar con carburos para formar gas metano que se acumula en las microcavidades y en los límites de grano. Debido a su gran tamaño, las moléculas de metano son incapaces de difundirse y esto genera alta presión interna. Dependiendo de la reactividad de los diferentes tipos de carburo, la presión del metano puede ser de una a dos órdenes de magnitud superior a la presión del hidrógeno. Impulsado por la presión gaseosa y la tensión aplicada, los vacíos se nuclean en los límites de grano y crecen por la fluencia de los granos adyacentes, así como por difusión del límite del grano. [20]

La selección de la temperatura de revenido y la dureza o plasticidad que se requiera de acuerdo al diseño, debe incluir la consideración del potencial problema de la fragilidad por hidrógeno, cuando el metal de aporte es depositado (hidrogeno proveniente de los metales de aporte, contaminación de la superficie a soldar, etc.), galvanizado, fosfatado, u otros medios, o si las condiciones ambientales causan la absorción catódica de hidrógeno durante el servicio. [21]

En general, los aceros con durezas superiores a 40 HRC presentan las condiciones ideales para el desarrollo de concentraciones de tensiones en partes que contienen muescas o defectos por soldadura, que, en presencia de niveles relativamente bajo de concentraciones de hidrógeno, conducen a la falla de las piezas a esfuerzos muy por debajo de la resistencia a la tracción nominal del material. Por lo tanto, el templado debe llevarse a cabo para lograr una dureza por debajo de 40 HRC si la pieza debe someterse a relativamente alta tensión y probable exposición al hidrogeno. [21]

Por lo tanto, los tratamientos térmicos son necesarios para reducir el contenido de hidrógeno en las zonas soldadas. Se utilizan el tratamiento térmico de deshidrogenación (DHT) (tratamiento de desgasificación), llevados a cabo a bajas temperaturas (típicamente alrededor de 400 ° C) lo que permite la difusión del hidrógeno lejos de las zonas susceptibles. [22]

#### **1.4.5.2. Tratamiento Térmico Después de la Soldadura (PWHT)**

Al soldar o deformar mecánicamente las tuberías de acero aleado, las tensiones internas residuales pueden reducir la confiabilidad de la estructura o pueden provocar la falla de la estructura. Para reducir la influencia de dichos esfuerzos internos, la tubería soldada o deformada se alivia mediante una operación de tratamiento térmico de revenido. El tratamiento térmico, una vez realizado después de la soldadura, proporciona uniones soldadas con numerosas propiedades positivas tales como el ablandado de áreas duras en el metal de aporte y en la zona afectada por el calor, incrementa la ductilidad, modifica positivamente las microestructuras de áreas de metal tratadas con calor, reduce las tensiones internas. El tratamiento térmico mejora la resistencia a la corrosión, así como la resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión debido a la influencia de tensiones internas. El tratamiento térmico de elementos soldados también puede tener algunos impactos negativos, como la reducción de la resistencia a la tracción y al impacto, los endurecimientos por precipitación de ciertos aceros pueden causar fracturas en las áreas de metal expuestas al calor. [7] y [22]

Las variables (parámetros) más relevantes del Tratamiento Térmico Después de la Soldadura (PWHT) son la temperatura y el tiempo de mantenimiento, también las velocidades de calentamiento y enfriamiento deben ser controladas. Las variables óptimas del PWHT son determinados en función de las propiedades físicas (resistencia mecánica, resistencia a la tenacidad, resistencia a la corrosión, etc.) que la junta soldada necesita obtener.

En la tabla 1.6, se muestra la temperatura y tiempo de mantenimiento recomendadas del PWHT para el acero de composición nominal 5%Cr – ½%Mo que pertenece al P-No 5B.

#### **1.4.6. Criterios de Aceptación de las Juntas Soldadas**

##### **1.4.6.1. Dureza máxima permitida**

La “dureza máxima permitida” es 248 HV, este valor es el promedio de los valores indicados en los sub-capítulos 1.4.6.1 (a) y 1.4.6.1 (b).

Tabla 1.6: Temperatura y tiempo de mantenimiento para el acero de composición nominal 5%Cr – ½%Mo (P-No 5B)

Código de construcción, estándar o especificación	Espesor, mm [in]	Ambiente de servicio	Temperatura de mantenimiento, C° [°F]	Tiempo a la temperatura de mantenimiento, h
Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries - API RP 582 “2 <sup>nd</sup> edition [10]	Todos	Todos	718 a 746 [1325 a 1375]	1 h/in (2h mínimo)
Power Piping - ASME B31.1-2016 [5] and Process Piping – ASME B31.3-2014 [4]	Todos	---	675 a 760 [1250 a 1400]	---

**a) De acuerdo a la Global Practice Welding Procedure (GP 18-07-01 versión 3.0.0)**

La dureza de las curvas de conformación en caliente, el metal de soldadura y la ZAC de todas las soldaduras no debe exceder los límites dados en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7: Límites de Dureza de Materiales [23]

Material P-Número <sup>(1)</sup>	Dureza Brinell <sup>(2)</sup>
P-1	200 <sup>(3)</sup>
CA6NM	255
Todos los demás P-número (P-5B y otros)	Ver NACE MR0103
Notas:	
(1)	Material P Números por ASME SEC. IX table QW/QB 422
(2)	Para metal base de tuberías, use el valor más bajo del valor mostrado o el valor dado en la especificación ASTM. Para el metal de soldadura y ZAC, use el valor más bajo del valor mostrado o el valor en ASME B31.3.
(3)	Para tuberías, una Dureza Brinell de 225 es aceptable en el área de curvatura de las curvas conformadas en caliente.

De acuerdo a la norma NACE MR0103 (Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments) [24], los aceros de aleación con números “P” (Sección IX de ASME BPVC [12]) no deben exceder los niveles máximos de dureza indicados en la tabla 1.8.

Tabla 1.8: Requisitos de dureza máxima para acero aleados con P-número [24]

Acero aleado	Dureza Máxima
P-No. 3	225 HBW
P-No. 4	225 HBW
P-No. 5A	235 HBW
P-No. 5B	235 HBW
P-No. 5C	235 HBW
P-No. 6	235 HBW
P-No. 7	235 HBW
P-No. 10A	225 HBW
P-No. 10B	225 HBW
P-No. 10C	225 HBW
P-No. 10F	225 HBW
P-No. 11	225 HBW
P-No. 15E	248 HBW

Realizando la interpolación de 235 HBW de acuerdo la norma ASTM E140 [25], se obtiene 246 HV.

**b) De acuerdo a la tabla 331.1.1 del ASME B31.3-2018**

El máximo valor de dureza para el acero con P-No. 5B es 241 HB. Realizando la interpolación de 241 HB de acuerdo la norma ASTM E140 [25], se obtiene 251 HV.

**1.4.6.2. Energía Absorbida en el Ensayo de Impacto Charpy V**

- (a) Requerimientos mínimos de energía.** Excepto para materiales de empernado, el requerimiento de energía mínimo aplicable para aceros al carbono y de baja aleación con resistencia a la tracción mínimo especificado menor a 656 MPa (95 ksi) serán los mostrados en la Tabla 1.9 [4].
- (b) Requerimientos de expansión lateral.** Otros aceros al carbono (diferente a los aceros al carbono con resistencia a la tracción mínimo especificado menores a 656 MPa (95 ksi)) y aceros de baja aleación con resistencia a la tracción mínimo especificado iguales o superiores a 656 MPa (95 ksi), todos los materiales de empernado y todos los aceros de alta aleación (P-Numeros 6, 7, y 8) deberán tener una expansión lateral opuesta a la muesca de no menos de 0.38 mm (0.015 in.) para todos los tamaños de muestra. La expansión lateral es el aumento del ancho del

espécimen de impacto quebrado sobre el espécimen medido no quebrado en el lado de compresión, paralelo a la línea que constituye la parte inferior de la muesca en V [4].

Tabla 1. 9 Valores mínimos requeridos de impacto Charpy V-Notch [4]

Resistencia a la tracción mínimo especificado	Número de especímenes <sup>1</sup>	Energía <sup>2</sup>			
		Aceros totalmente desoxidados		Otros diferentes a los aceros totalmente desoxidados	
		Joules	Ft-lbf	Joules	Ft-lbf
<b>(a) Aceros al carbono y baja aleación</b>					
448 MPa (65 ksi) y menos	Promedio para 3 especímenes	18	13	14	10
	Mínimo para 1 espécimen	14	10	10	7
Sobre 448 MPa (65 ksi) hasta 517 MPa (75 ksi)	Promedio para 3 especímenes	20	15	18	13
	Mínimo para 1 espécimen	16	12	14	10
Sobre 517 MPa (75 ksi) hasta 656 MPa (95 ksi)	Promedio para 3 especímenes	27	20	---	---
	Mínimo para 1 espécimen	20	15	---	---
		<b>Expansión Lateral</b>			
656 MPa (95 ksi) y mayor <sup>3</sup>	Mínimo para 3 especímenes	0.38 mm (0.015 in)			
<b>(b) Aceros con P-Nos. 6, 7 y 8</b>	Mínimo para 3 especímenes	0.38 mm (0.015 in)			
NOTAS: (1) Ver párr. 323.3.5 (d) ASME B31.3-2014 para reevaluaciones permisibles. (2) Los valores de energía en esta tabla son para muestras de tamaño estándar. Para especímenes de tamaño reducido, estos valores se multiplicarán por la relación de ancho real de la muestra con la de una muestra de tamaño completo, 10 mm (0.394 in). (3) Para los pernos de este nivel de resistencia en tamaños nominales M52 (2 in) y menores, se pueden aplicar los requisitos de impacto de la especificación ASTM A320. Para atornillando sobre M 52, se aplicarán los requisitos de esta tabla.					

### 1.5. Consideraciones y Requerimientos de las Reparaciones por Soldadura de los Aceros Aleados Ferríticos

Al reparar la tubería de Cr-Mo, el tiempo de exposición al tratamiento térmico se incrementa deliberadamente para garantizar el valor de dureza del metal requerido, ya que el valor de dureza del metal es el criterio principal de la evaluación del tratamiento térmico [9] y [26].

Cuando un defecto se encuentra en una soldadura mediante alguna prueba no destructiva, la soldadura debe repararse. En general, el metal de soldadura se elimina por amolado e inspeccionado para verificar la eliminación efectiva del defecto a fin de volver a soldar bajo un procedimiento de soldadura calificado [27].

Una referencia encontrada en la cual se indica el número de reparaciones de soldadura permitido, es un documento de propiedad de la empresa TRT (TECNICAS REUNIDAS TALARA), “Requisitos de Calidad para Subcontratistas PP-02070-I-203-Att01 Rev.1”, en la cual detalla que no son admisibles más de 2 reparaciones para cada soldadura, excepto para uniones soldadas de material P1 con P1 no sujeto a PWHT en las que si se admite. A partir de aquí será necesario cortar y volver a soldar. [11]

### 1.6. Parámetro “P”

Las variables más importantes en los tratamientos térmicos son la temperatura y el tiempo de mantenimiento a dicha temperatura, la comparación de estas dos variables con los resultados obtenidos en estudios anteriores, no resulta práctico; como una cuestión de conveniencia, y debido a que la temperatura y el tiempo de mantenimiento a dicha temperatura se correlacionan entre sí, documentos normativos de la Unión Europea provee el parámetro “P” que está en función de la temperatura y tiempo, calculado de acuerdo a la fórmula:

$$P = T(20 + \log t) \cdot 10^{-3} \quad [7], [9], [26] \text{ y } [29], \text{ donde } T \text{ es la temperatura de tratamiento térmico (Kelvin), } t \text{ es el tiempo (horas) de exposición a dicha temperatura .}$$

Los parámetros de tratamiento térmico de juntas soldadas especificados en los documentos normativos para las tuberías de proceso y potencia no definen expresamente el tiempo de exposición ( $t$ ) a la temperatura de revenido ( $T$ ). En las normas solamente se indican la temperatura de revenido mínima y máxima y el tiempo de exposición (mantenimiento) mínimo. En la tabla 1.10 se muestra a razón de ejemplo diferentes valores del parámetro “P” calculados a partir de la temperatura y el tiempo de mantenimiento a dicha temperatura.

Tabla 1.10: Ejemplo del cálculo del parámetro “P”

Temperatura, °C	Temperatura, °K	Tiempo de mantenimiento, h	Parámetro <i>P</i>
500	773	1	15.46
600	873	1	17.46
700	973	1	19.46
750	1023	1	20.46
500	773	8	16.16
600	873	8	18.25
700	973	8	20.34
800	1073	7	22.37

### 1.7. Microestructura de las Juntas Soldadas del Acero Aleado 5%Cr-0.5%Mo

La dependencia de las propiedades mecánicas de las juntas soldadas del acero en mención con el régimen del tratamiento térmico después de la soldadura, y las causas de los cambios de las propiedades mecánicas, son explicados mediante un análisis de su microestructura. La exposición a altas temperaturas y presiones a largo plazo también generan variaciones en la microestructura del acero y en las propiedades mecánicas. [26], [29] y [28]

Según el código de construcción ASME B31.3-2006, la dureza de las juntas soldadas del acero al 5% Cr-0,5% Mo no debe ser superior a 241 HB. La tarea principal para el tratamiento térmico de las juntas soldadas del acero en mención es la eliminación del componente de martensita y su reemplazo por una estructura más aceptable y más plástica. Esto también reduce las tensiones residuales [28].

#### 1.7.1. Microestructura del Acero ASTM A335 Gr. P5 de Suministro

La microestructura de la muestra del tubo de suministro consiste en ferrita y constituyentes similares a la perlita en forma de grano. Carburos de diferente dispersión pueden verse dentro y en los bordes de granos ferrita [26]. En la Figura 1.4 se muestra la microestructura del tubo de suministro que no se ha puesto en servicio.

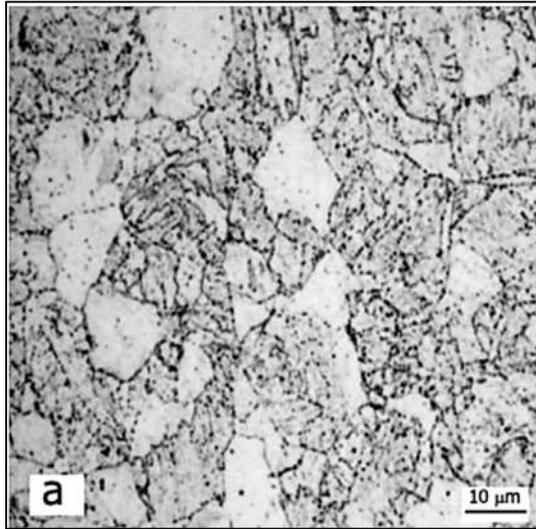


Figura 1.4: Microestructura del tubo de suministro [26]

#### 1.7.1.1. Microestructura del Acero Soldado 5%Cr-0.5Mo sin PWHT

La microestructura del acero soldado sin PWHT, consiste principalmente de martensita tipo listón y agujas. Ocasionalmente algo de ferrita irregular, bainita y austenita retenida. [26] y [30]. En la figura 1.5 se muestra la microestructura del acero soldado sin PWHT, los carburos finos aparecen en las agujas de martensita más grandes, probablemente sean placas de carburo.

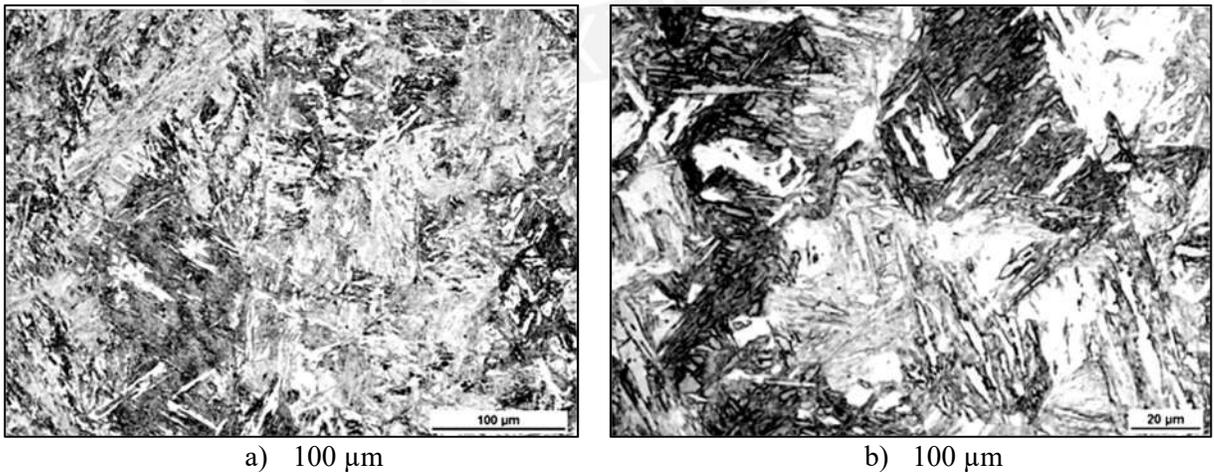


Figura 1.5: Microestructura del acero soldado 5%Cr-0.5%Mo sin PWHT; a) 100 μm y b) 20 μm [9]

### 1.7.1.2. Microestructura del Acero Soldado 5%Cr-0.5Mo con PWHT

#### a) Precipitación de Carburos

De acuerdo al estudio de Hans-Olof Andrén [30] para el acero en mención con un tiempo de mantenimiento de 1h se obtuvo lo siguiente:

El tratamiento térmico posterior a la soldadura a diferentes temperaturas entre 400 °C y 750 °C mostró que finos carburos  $M_7C_3$  y  $M_2C$  precipitaron a 500°C aproximadamente,  $M_7C_3$  principalmente en los bordes de los granos austeníticos previos y en los listones de la martensita,  $M_2C$  tanto en los bordes de grano como en las dislocaciones. A 600 °C,  $M_{23}C_6$  precipitó en los bordes de grano, y a 700 °C se encontraron partículas gruesas de  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  y  $M_2C$  en una matriz de ferrita poligonal. Se encontró que los precipitados de  $M_2C$  ricos en Cr eran de dos tipos, uno con bajo y otro con mayor contenido de Mo. La composición cambió algo con la temperatura del tratamiento térmico; a 600 °C, las fórmulas aproximadas fueron  $(Cr_{0.89}Mo_{0.06}Fe_{0.05})_2C$  y  $(Cr_{0.68}Mo_{0.26}Fe_{0.06})_2C$ .

#### b) Microestructura Obtenida a Diferentes Valores del Parámetro “P”

P = 15.46 (PWHT 500 °C – 1 h): Martensita revenida (ver figura 1.6)



Figura 1.6: Junta soldada después del PWHT 500 °C - 1 h [26]

P = 16.16 (PWHT 750 °C – 1 h): la Martensita ha sufrido una transformación completa: se observan carburos en forma de grano de diferente dispersión en la matriz de granos de ferrita de forma irregular, como se muestra en la figura 1.7. Dicha microestructura es aceptable porque las placas de martensita duras y quebradizas ya no están presentes y prevalece una amplia distribución de carburos de diferente dispersión.

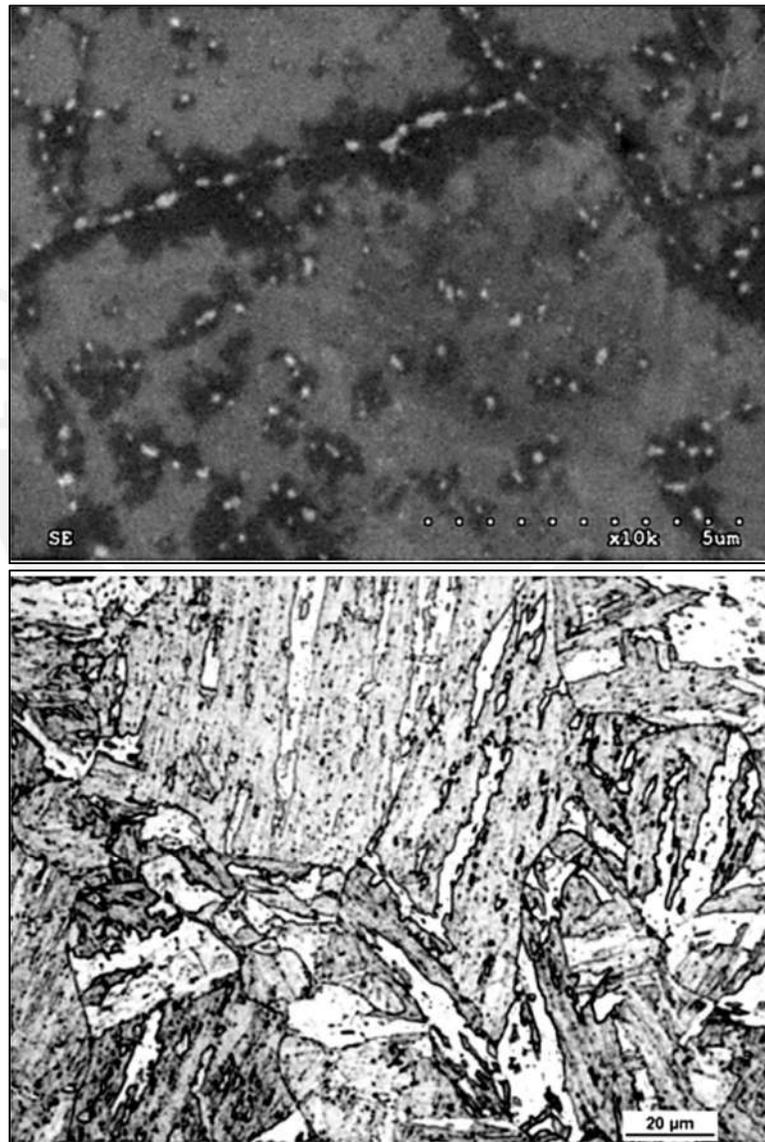


Figura 1.7: Microestructura de Junta soldada después de PWHT 750 ° C - 1 h [9]

P = 22.37 (PWHT 800 °C – 7h) [9] y [26]: los carburos se coagulan dentro de los bordes de granos de ferrita, formando colonias de carburo, se combinan en compuestos sólidos largos claramente visibles con los bordes de grano de grano. Prácticamente no se encuentran carburos finos dispersos, tal como se muestra en la figura 1.8.

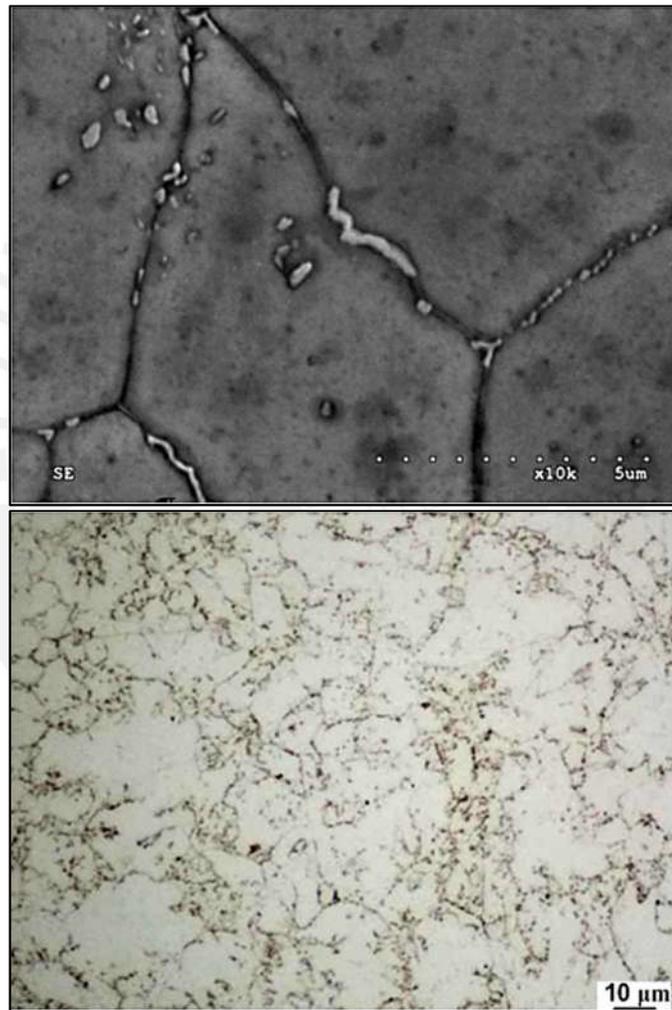


Figura 1.8: Microestructura de Junta soldada después de PWHT 800 °C – 7h [9] y [26]

**c) Análisis Químico de la Microestructura Obtenida de la Junta Soldada del Acero 5%Cr-0.5% con Parámetro “P = 22.37”**

El análisis químico de la microestructura reveló que las fases precipitadas dentro de los bordes de grano (como se aprecia en la figura 1.9) consiste principalmente en carburos complejos de cromo y molibdeno. Se observan cambios notables en la composición del carburo, tamaño y morfología. Estos carburos fueron principalmente del tipo  $M_2C$ ,  $M_3C$ ,  $M_7C_6$ , donde M significa Fe o Cr o Mo o una combinación de ellos. El contenido de cromo (análisis químico - tabla 1.11) en los bordes de grano excede el contenido medio de un grano de 3 a 4 veces. Significa que, al aplicar un tratamiento térmico con el parámetro de “P = 22.37”, la microestructura se ve obligada a degradarse sin siquiera poner el producto en servicio. [26]

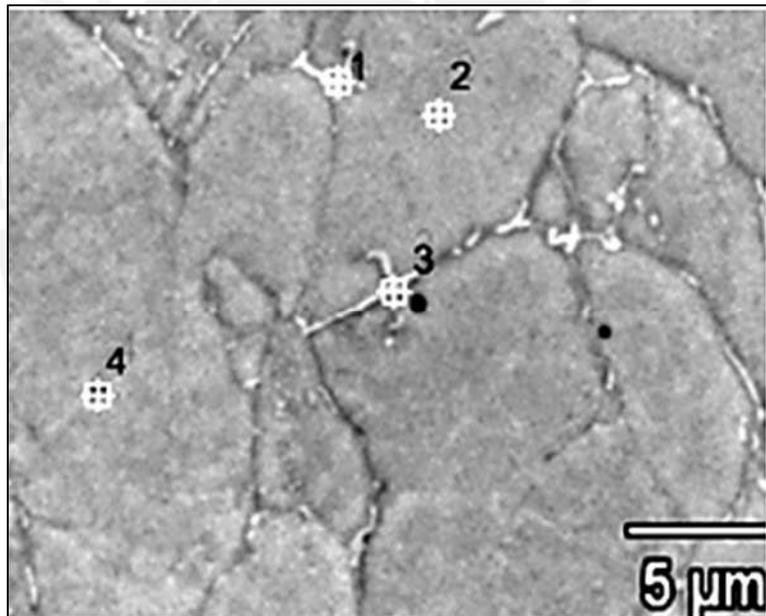


Figura 1.9: Microestructura de junta soldada de acero 5%Cr-0.5%Mo del espécimen con “P = 22.37” (caracteres - ubicación de las áreas de análisis de la composición química) [26]

Tabla 1.11: Composición química de las fases de la microestructura del espécimen con “P = 22.37” (en %) [26]

No. punto	Si-K	Cr-K	Fe-K	Mo-L
1	0.76	14.45	83.10	0.71
2	0.73	4.95	93.17	0.41

Nota: Los rayos X producidos por las transiciones desde los niveles  $n=2$  hasta  $n=1$  se llaman rayos X “K-alfa” y los correspondientes a la transición de  $n=3 \rightarrow 1$ , se denominan rayos X “K-beta”

## 1.8. Mecanismos de Endurecimiento de Aceros Aleados

### 1.8.1. Por Dispersión de Precipitados

Las Reacciones de Precipitación son de gran importancia en aleaciones de ingeniería. Este fenómeno ocurre en muchos sistemas de diferentes aleaciones, cuando una fase (por ejemplo,  $\gamma$  en acero) se transforma en un sistema de fase mixta (como  $\gamma + \alpha$  en acero) como resultado del enfriamiento a altas temperaturas. La reacción de estado sólido da como resultado una mezcla de fase, de la fase de la matriz y precipitados (nucleado y engrosado). La matriz puede compartir una estructura cristalina similar a la fase inicial, pero tiene diferente composición y a menudo un parámetro de red diferente, mientras que la fase precipitada puede diferir en la estructura cristalina, la composición, el parámetro reticular y el grado de largo alcance de orden. Las propiedades resultantes de la aleación después de la precipitación son un resultado directo del tipo, tamaño, forma, y distribución de la fase precipitada. [31]

Las configuraciones del diagrama de fases que dan lugar a las reacciones de precipitación se muestran en la Fig. 1.10. La reacción ocurre cuando la composición de la fase inicial (por ejemplo,  $\alpha_0$  o  $\beta_0$ ) se transforma en un producto de dos fases que incluye una nueva fase o precipitado. La fase precipitada puede diferir en la estructura cristalina, la composición y/o el grado de largo alcance de orden desde la fase inicial monofásica (principal) y la matriz resultante del producto. La matriz conserva la misma estructura cristalina que el elemento primario de una fase, pero con una composición de equilibrio diferente ( $\alpha$  o  $\beta$ ) y generalmente un parámetro de red diferente a la fase principal. Este tipo general de cambio de fase es diferente a las reacciones en los puntos invariantes de transformación de fase (por ejemplo, un eutéctico o peritético), donde cualquier cambio en la temperatura o la composición da como resultado una transformación completa de la matriz inicial en una matriz con una estructura cristalina diferente. [31]

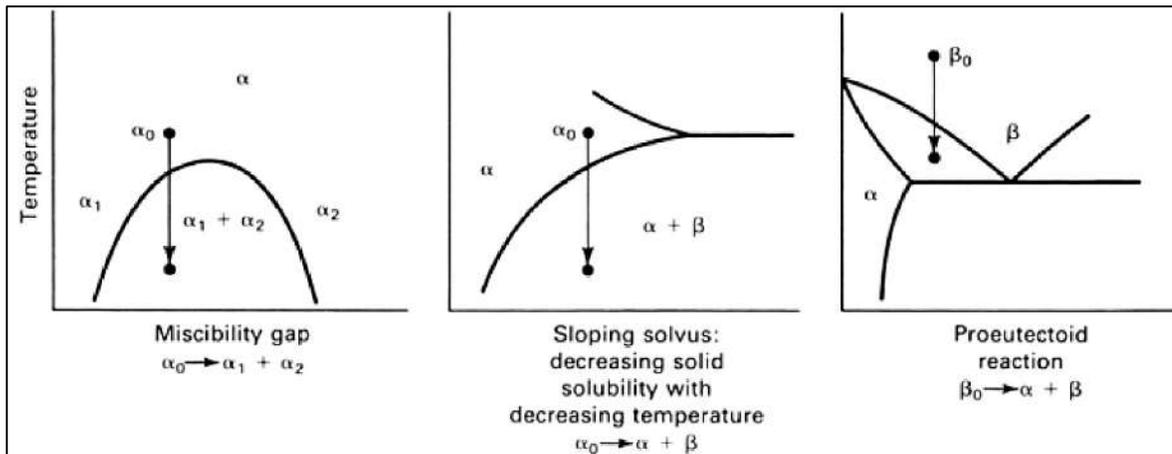


Figura 1.10. Diagramas de fase de equilibrio que ilustran varias condiciones para la precipitación de una segunda fase. En todos los casos, la matriz del producto de dos fases tiene la misma estructura cristalina que la monofase inicial, pero con una composición de equilibrio diferente ( $\alpha$  o  $\beta$ ) [31]

La precipitación también proporciona la base del mecanismo de fortalecimiento en el endurecimiento por envejecimiento de las aleaciones, donde los precipitados a pequeña escala (del orden de decenas de nanómetros) se logran mediante un control riguroso del tratamiento térmico o procesamiento termomecánico. El endurecimiento por envejecimiento, es una reacción de precipitación controlada, que proporciona propiedades mecánicas mejoradas a las aleaciones comerciales. Las reacciones de precipitación son cuidadosamente controladas a través de tratamientos termomecánicos a partir de soluciones sólidas sobresaturadas que dan como resultado un fortalecimiento mejorado. Las reacciones de precipitación no solo proporcionan resistencia mecánica, sino también resistencia al desgaste, a la fluencia y a la fatiga a las aleaciones. El tratamiento de una aleación endurecible por envejecimiento consiste en: 1. Tratamiento térmico de solución que da como resultado una solución sólida sobresaturada homogénea; 2. Temple hasta una temperatura en la región de dos fases (generalmente temperatura ambiente) para retener una solución sólida sobresaturada; 3. Envejecimiento a una temperatura elevada para controlar la precipitación de la segunda fase a partir de la solución sólida [31].

### **1.9. Influencia del Tamaño de Grano**

Para un tipo de acero y nivel de resistencia específicos, los aceros de grano fino tienen mayor tenacidad de muesca que los de grano grueso [13].

Una reducción en el tamaño del grano es el único método conocido para aumentar la resistencia mecánica y la resistencia a la tenacidad al mismo tiempo [19] y [31].





**CAPÍTULO II**

**METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

## **2.1. Descripción de los Equipos**

### **2.1.1. Máquina de Soldar**

La máquina de soldar suministra una alimentación constante de corriente continua, que permite mantener el arco estable. Permite la regulación del amperaje necesario para soldar; ese amperaje varía según el diámetro y espesor de la pieza, posición del trabajo, diámetro del electrodo, etc.

La máquina de soldar se usará para soldar puntos o tramos cortos en la preparación del cupón y para soldar los cupones de prueba (figura 2.1). A continuación, se describe algunas características importantes de dicha máquina:

- Marca y modelo: Miller Pipeworx 400 (N° serie MG490056G)
- Registrador de datos digital: puede registrar, la información de la junta, estampa del soldador, amperaje, voltaje, tiempos del arco en estado encendido y apagado, el calor de aporte y otros; utiliza el software “Insight Pipe and Vessel”.
- Entrada de poder: trifásico
- Salida nominal: 350A, 60% ciclo de trabajo
- Potencia: 14.2 KVA (13.6 KW)
- Multiprocesos de soldadura: SMAW, GTAW (arranque en modo Lift Arc y por raspado) y otros procesos.
- Antorcha para GTAW
- Control de arco (fuerza de arco)

### **2.1.2. Equipo de Calentamiento por Inducción**

El principio físico de calentamiento se basa en la Ley de Faraday y el efecto de calentamiento de Joule; la tubería de acero es colocada en un campo magnético cambiante (un campo generado por CA en la bobina), un voltaje se induce en la pieza de trabajo (Ley de Faraday). El voltaje inducido dará como resultado el flujo de electrones, a medida que la corriente fluya a través del acero, habrá algo de resistencia en el movimiento de los electrones. Esta resistencia se manifiesta en forma de calor (Efecto de calentamiento de Joule).



Figura 2.1. Equipo de soldadura PipeWorx 400 con registrador de datos conectado a la laptop

El equipo en mención se usará para realizar el precalentamiento, mantenimiento de temperatura, deshidrogenado y tratamiento térmico después de la soldadura (para la temperatura de mantenimiento de 725°C); ver figura 2.2. A continuación, se describe algunas características y equipamientos importantes del equipo:

- Marca y modelo: Miller Proheat 35, sistema de inducción refrigerado por líquido
- Entrada de poder: trifásico
- Potencia nominal: 35 kW al 100% del ciclo de trabajo
- Temperatura máxima de calentamiento: 788°C (1450°F)
- Tiene cuatro termocuplas de control y dos termocuplas de monitoreo
- Registrador de datos digital, utiliza el software “Review QuickChart (Eurotherm)”
- Manta para precalentamiento, deshidrogenado y tratamiento térmico después de la soldadura (la manta aísla y optimiza de manera eficiente la distancia de acoplamiento entre la bobina y la pieza de trabajo mientras protege el cable refrigerado por líquido).



Figura 2.2. Equipo de calentamiento por inducción: con su registrador de datos, usando dos termocuplas de control

### 2.1.3. Horno de Cámara

Ideal para tratamientos térmicos o calcinaciones de muestras como fibras naturales, harinas, semillas, etc. El equipo se usará para realizar tratamientos térmicos antes y después de la soldadura, a temperaturas de 800°C y 950°C; ver figura 2.3. A continuación, se describe algunas características de dicho equipo:

- Marca y serie CWF: Carbolite, CWF - 1300°C
- Resistencias laterales visibles
- Rápida velocidad de calentamiento, hasta 1000 °C en 30 minutos y 1200 °C en 40 minutos
- Puerta elevable con contrapeso, que asegura un perfecto acceso al interior del horno por parte del operador, con microrruptor de desconexión al proceder al abrir la puerta
- Aislamiento de doble cámara, de baja conductividad térmica, reduciendo al mínimo las pérdidas caloríficas y la temperatura externa del horno
- Controlador 3216P1, programador digital de 8 rampas (con resolución de 1°C): P8



Figura 2.3a



Figura 2.3b



Figura 2.3c



Figura 2.3d

Figura 2.3. Horno de cámara: figura 2.3a, manteniendo la temperatura de 800°C; figura 2.3b, manteniendo la temperatura de 950°C; figura 2.3c y 2.3d ingreso de cupones soldados al horno

#### 2.1.4. Horno Portátil

Se usará un horno portátil (ver figura 2.4) para mantener la temperatura de los electrodos revestidos a valores mayores al mínimo recomendado por el fabricante (SOLDEX SA), de acuerdo a la hoja técnica del electrodo E8018-B6 (anexo 1.1 de la presente tesis), la temperatura de mantenimiento debe estar entre 125°C - 150°C.



Figura 2.4. Horno portátil conservador y secador de electrodos revestidos

#### 2.1.5. Esmeriladoras Angulares

Durante las pruebas se emplearán las esmeriladoras (amoladoras) para cepillar, desbastar y cortar; en las operaciones de preparación de cupones, durante la soldadura (en la raíz, refuerzo de raíz, entre cordones y en la cobertura) y para remover el metal de aporte depositado para realizar las reparaciones.

Se usarán dos amoladoras, una de 4.5" y la otra de 7". A continuación, se indican sus características más importantes:

- ✓ Esmeril Angular 4.5"
  - Marca y modelo: BOSCH, GWS 7-115 Professional
  - Datos eléctricos: 220V, 50/60HZ, 3.3A

- Potencia: 720W
- Revoluciones por minuto: 11000/min
- ✓ Esmeril Angular 7"
  - Marca y modelo: DEWALT, DWE4557-B2 (tipo 1)
  - Datos eléctricos: 220V, 60HZ
  - Potencia: 2400W
  - Revoluciones por minuto: 8500/min

### **2.1.6. Equipos Utilizados para Control de Calidad**

#### **a) Pinza Amperimétrica**

Se utilizará la “Pinza Amperimétrica Fluke 376” para medir el amperaje y voltaje en los cables de la máquina de soldar, para verificar que no exista mucha diferencia con respecto a los valores mostrados en el monitor de la máquina de soldar, con la finalidad de que la máquina de soldar suministre amperajes correctos según los valores programados en esta.

#### **b) Termómetro Infrarrojo (Pirómetro Digital)**

Se utilizará un pirómetro digital con medición por láser para medir lo siguiente:

- ✓ La temperatura de mantenimiento de los electrodos revestidos.
- ✓ La temperatura para el precalentamiento, soldadura entre pases, deshidrogenado y para el tratamiento térmico después de la soldadura, con la finalidad de verificar que no exista mucha diferencia entre los valores mostrados en el monitor del equipo de calentamiento por inducción y lo mostrado en el pirómetro.

#### **c) Instrumentos de Medición de Soldadura**

Para realizar la inspección visual, antes, durante y después de la soldadura, se utilizarán los siguientes instrumentos:

- Un “bridge cam gauge”
- Un calibrador de des-alineamiento (HI-LO welding gauge)
- Un “V-WAC single weld gauge”

- Un flexómetro

## 2.2. Descripción de los Materiales

### 2.2.1. Metal Base (MB) en Estado Virgen y Metal de Aporte (MA)

El metal base (MB) en estado virgen o de suministro y el metal de aporte (MA) presentan la misma composición química nominal (5%Cr – 0.5%Mo), son aceros con bajo contenido de carbono. Las especificaciones de estos materiales, la forma del producto y sus dimensiones del MB y los MAs son mostrados en la tabla 2.1.

El MB en estado virgen fue suministrado por la empresa “SSK Ingeniería y Construcción SAC”, con una longitud de 560 mm (sobrante del Proyecto Modernización de la Refinería de Talara). Los MAs fueron suministrados por la empresa “SOLDEX SA”.

Tabla 2.1. Identificación del Metal Base y Metal de Aporte

Metal Base (MB)		Metal de Aporte (MA)	
Abreviatura	Descripción	Abreviatura	Descripción
MB	Tubería “ASTM A335 Gr. P5”, diámetro 16" [406.24 mm] y espesor 0.50" [12.7 mm]	MA1	Varilla sólida ER80S-B6 de diámetro 3/32". Especificación AWS A5.28
		MA2	Electrodo revestido E8018-B6 de diámetro 1/8". Especificación AWS A5.5

### 2.2.2. Gas de Protección y Respaldo

El gas de protección y respaldo a ser empleado, es el Argón (Ar), con una pureza del 99.9%. El gas de protección se usará en el proceso de soldadura GTAW, y el gas de respaldo se usará dentro de la tubería para evitar la oxidación y la contaminación de la raíz y refuerzo durante la soldadura.

### 2.2.3. Discos Abrasivos y Cepillo Circular

Los discos abrasivos y cepillos circulares se emplearán en las siguientes actividades: la realización del bisel, durante la soldadura, en la remoción del metal de aporte depositado.

Los consumibles (discos abrasivos y cepillos circulares) son del tipo para trabajos en materiales de acero inoxidable. A continuación, se describe las dimensiones y marcas:

- Corte 4.5"x3/32"x7/8" (Tyrolit A30R – BFXA)
- Corte 7"x1/8"x7/8" (Norton BNA 32)
- Desbaste 4.5"x1/4"x7/8" (Norton A24R BF271)
- Desbaste 7"x1/4"x7/8" (Norton A24R BF271)
- Cepillo circular 4.5"
- Polifan de 4.5" tamaño de grano 60

#### **2.2.4. Fibra Cerámica**

La manta de fibra cerámica, es usada como aislamientos para trabajar (soportan) a altas temperaturas en hornos, juntas de expansión, soldadura, paredes de calderos, precipitaderos, ductos calientes, torres, tanques cilíndricos, chimeneas y hornos industriales. No contribuye a la propagación del fuego y no produce ni acelera la corrosión en ningún tipo de metal. La manta de fibra cerámica para alta temperatura, está fabricado para aplicaciones en temperaturas máximas de operación de 1260 °C. La manta de fibra cerámica no estimula el desarrollo de hongos ni de bacterias.

La manta de fibra cerámica se empleará durante la soldadura para cerrar (tapas) los extremos de los cupones para evitar la fuga del gas de respaldo, y para no quemar la manguera de ingreso del gas de respaldo dentro del cupón; también se utilizará para el deshidrogenado y tratamiento térmico después de la soldadura para evitar cambios bruscos de temperatura con la atmosfera externa. La presentación a utilizar es de 1" x 0.61 m x 7.62 m, a partir de estar se cortará en tramos de acuerdo a lo requerido.

### **2.3. Identificación Positiva del Metal Base en Estado Virgen y del Metal de Aporte**

#### **2.3.1. Identificación Positiva del Metal Base (MB) en Estado Virgen**

El Metal Base (MB) en estado virgen o de suministro que se utilizará en la soldadura de los cupones, será caracterizado mediante ensayos de Identificación Positiva de Materiales (PMI),

para verificar su cumplimiento con algunos requerimientos de la especificación “ASTM A335/A335M -15a”. Los ensayos de PMI a emplear para el Metal Base son: Análisis Químico, Ensayo de Dureza HRB, Ensayo de Impacto Charpy V y Análisis Metalográfico. Los ensayos de PMI serán ejecutados de acuerdo a los requerimientos del capítulo 2.10 de la presente tesis.

La finalidad del PMI es asegurar de que las pruebas y los ensayos realizados en el “Capítulo 3 - Resultados y Análisis”, proporcionen datos coherentes y correctos.

### **2.3.2. Identificación Positiva del Metal de Aporte**

Los Metales de Aportes (MAs), ER80S-B6 y E8018-B6 para los procesos de soldadura GTAW y SMAW respectivamente; no serán identificados positivamente mediante ensayos, debido a que a los MAs poseen “Certificados de Calidad de Producto”, ver anexos 1.2 y 1.1 de la presente tesis. Los “Certificados de Calidad de Producto” garantizan su cumplimiento con los requerimientos de las especificaciones AWS A5.28 y AWS A5.5 para el ER80S-B6 y E8018-B6 respectivamente.

### **2.4. Determinación del Óptimo Valor del Parámetro “P”**

En base a la revisión del estado del arte correspondiente al Parámetro “P” para las juntas soldadas del acero ASTM A335 Gr. P5 (la cual relaciona en una sola variable la temperatura y el tiempo de mantenimiento a dicha temperatura del PWHT); se seleccionó el valor del parámetro “P” considerando los mayores valores de resistencia al impacto de los estudios previos indicados en el párrafo siguiente.

En la figura 2.5 [26]; se muestra los gráficos de los comportamientos de la resistencia al impacto y a la fluencia con el parámetro “P”; donde se aprecia que la resistencia al impacto se incrementa al aumentar el parámetro “P” hasta el valor de 20.23, y la resistencia a la fluencia empieza a disminuir considerablemente a valores mayores de “P” = 20.23. En la figura 2.6 [28]; se muestra los gráficos de los comportamientos de la resistencia a la fluencia,

tracción e impacto; donde se aprecia que la resistencia al impacto se incrementa al aumentar el parámetro “P” hasta el valor de 20.29, y la resistencia a la fluencia y tracción empiezan a disminuir considerablemente a valores mayores de “P” = 20.29.

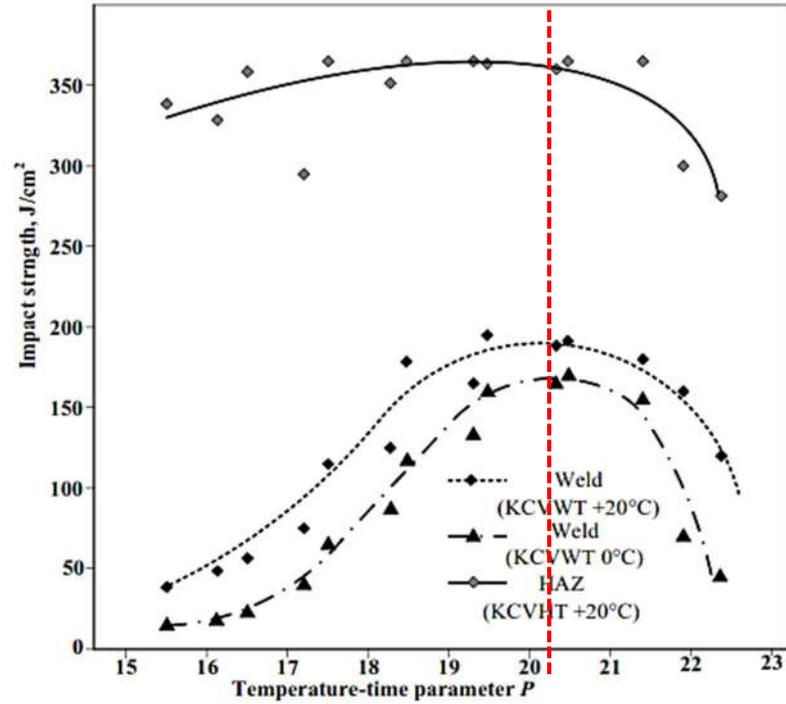


Figura 2.5a

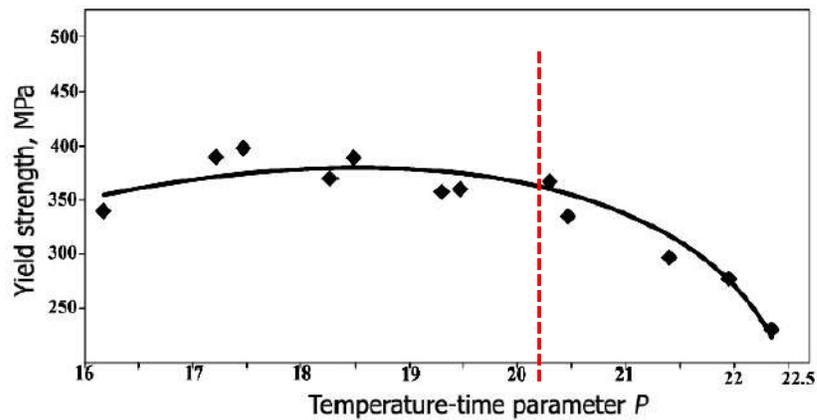


Figura 2.5b

Figura 2.5: Dependencia de propiedades de la unión soldada del acero 5%Cr-0.5%Mo con el parámetro “P” [26]: figura 2.5a, resistencia al impacto con el parámetro “P”; figura 2.5b, resistencia a la fluencia con el parámetro “P”

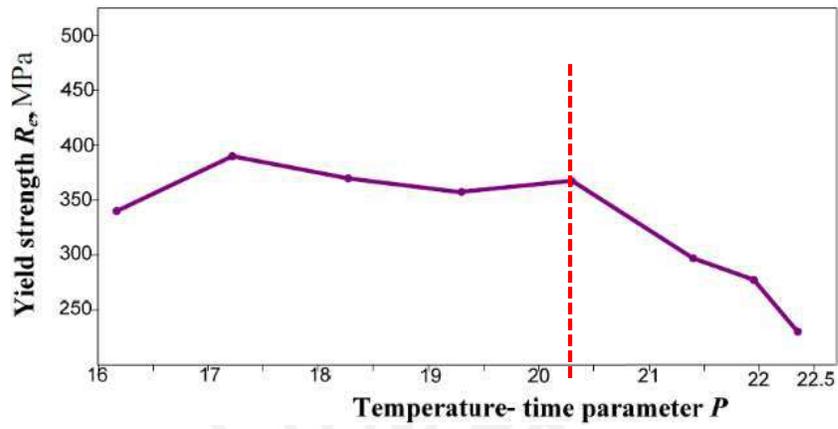


Figura 2.6a

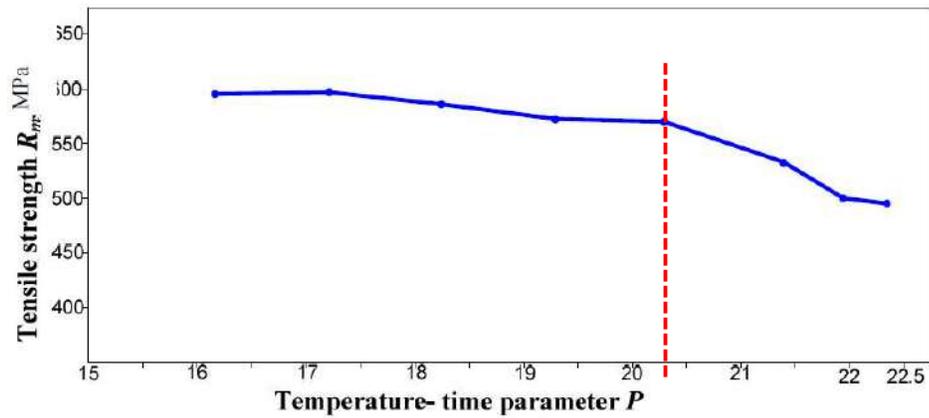


Figura 2.6b

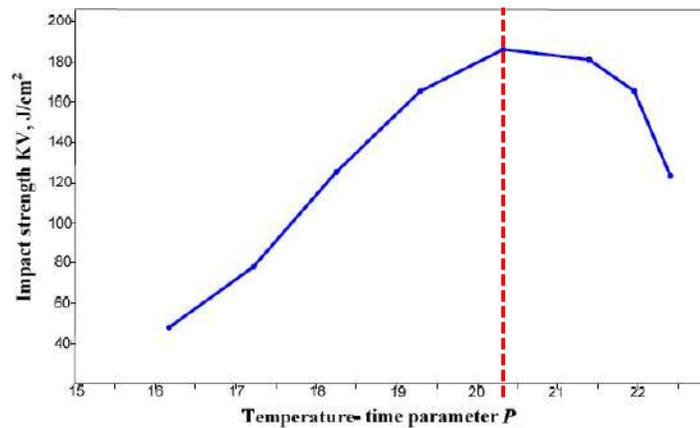


Figura 2.6c

Figura 2.6: Dependencia de propiedades de la unión soldada del acero 5%Cr-0.5%Mo con el parámetro “P” [28]: figura 2.6a, resistencia a la fluencia con el parámetro “P”; figura 2.6b, resistencia a la tracción con el parámetro “P”; figura 2.6c, resistencia al impacto con el parámetro “P”

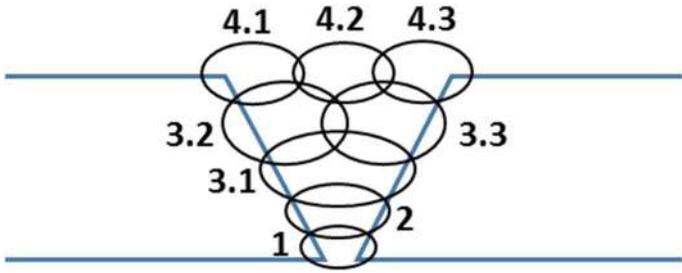
Realizando el promedio de los valores “P” obtenidos en el párrafo anterior (20.23 y 20.29), se determinó que el valor óptimo del parámetro es “P” = **20.26**. Este parámetro corresponde a las siguientes configuraciones de temperatura y tiempo de mantenimiento del PWHT: 725°C por 2h; 710°C por 4h; 696°C por 8h. Escogiendo el menor tiempo de mantenimiento de los valores indicados en el párrafo anterior, debido al elevado costo energético cuando el equipo de calentamiento por inducción está en operación, se ha seleccionado utilizar la configuración de 725°C por 2h de mantenimiento a dicha temperatura.

### **2.5. Generación de la “Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS<sub>tesis</sub>)”**

Las actividades de la calificación del procedimiento de soldadura, no están dentro del alcance del tema a investigar, además algunas empresas de fabricación y construcción dentro del país, han calificado Procedimientos de Soldadura (PQR – muestra resultados de ensayos, y sirve de soporte del WPS) para soldar el acero 5%Cr-0.5%Mo de bajo carbono. Razón por la cual el WPS<sub>tesis</sub> no fue calificado con pruebas y ensayos de acuerdo al código ASME Sección IX. El WPS<sub>tesis</sub> se generó a partir de: los valores de las variables de soldadura del WPS de la empresa “SSK Ingeniería y Construcción SAC” (ver anexo 1.3 de la presente tesis) y en concordancia con la especificación técnica “GP 18-07-01 (Welding Procedure, de la ExxonMobil) [6]”. En la tabla 2.2, se muestra las variables de soldadura del WPS<sub>tesis</sub>.

Cabe mencionar que en el WPS<sub>tesis</sub> no está considerando los valores de las variables del tratamiento térmico después de la soldadura (PWHT), ya que los valores de la temperatura del PWHT y el tiempo de mantenimiento a dicha temperatura son modificados en diferentes condiciones (configuraciones), tampoco se indica la velocidad de calentamiento e enfriamiento ni la temperatura libre de gradiente térmico. No obstante, en el WPS<sub>tesis</sub> se indica los valores de las variables del tratamiento térmico de deshidrogenado, el cual será aplicado para todas las soldaduras de los cupones, ya que es un tratamiento térmico a relativamente baja temperatura por un tiempo breve para eliminar la posible presencia de hidrogeno absorbido después de la soldadura.

Tabla 2.2. Variables de soldadura del WPS<sub>tesis</sub> para soldar aceros ASTM A335 Gr. P5

Variable	Valor
Diseño de junta	Junta a tope en V sin respaldo
Ángulo de la ranura ( $\beta$ ); abertura de raíz (r); talón (t)	$\beta = 60^\circ$ ; r = 4 mm; t = 0 mm
Material base	ASTM A335 Gr. P5 (P-número = 5B y G-número = 1); espesor 12.7 mm
Metal de aporte	ER80S-B6 (diám. 3/32") y E8018-B6 (diám. 1/8")
Proceso de soldadura	GTAW (raíz y refuerzo de raíz) + SMAW (relleno y acabado)
Posición de soldadura	Plana - Vertical
Gas de protección GTAW	Argón (Ar) 99.9%, flujo de gas = 30 CFH (cubic feed hour)
Gas de respaldo GTAW	Argón (Ar) 99.9%, flujo de gas = 35 CFH (raíz y refuerzo de raíz)
Temperatura de precalentamiento	200°C mín. - 300°C máx.
Temperatura entre pases	200°C mín. - 300°C máx.
Tratamiento térmico de deshidrogenado	Temperatura = 315°C, tiempo de mantenimiento = 15 minutos
Temperatura de tratamiento térmico después de la soldadura (PWHT)	---
Tiempo de mantenimiento	---
Velocidad de calentamiento/enfriamiento	---
Características eléctricas	Corriente y polaridad: DCEN (GTAW) y DCEP (SMAW); tipo y tamaño de electrodo de tungsteno: EWTh-2 1/8"; Amperaje, Voltaje y Calor de Aporte: ver anexo 1.3 de la presente tesis
Secuencia de soldeo (proceso de soldadura combinado)	 <p>Pase 1: raíz (GTAW); pase 2: refuerzo de raíz (GTAW); pase 3.1 al 3.3: relleno (SMAW); pase 4.1 al 4.3: acabado (SMAW)</p>

## **2.6. Soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 con PWHT**

Se realizará la soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 utilizando el WPS<sub>tesis</sub> (ver 2.5 de la presente tesis) y el óptimo valor del parámetro “P” obtenido en 2.4 de la presente tesis (“P” = 20.26, con la condición de 725° por 2h). Después de soldado el cupón; se realizarán los ensayos de Dureza, Impacto Charpy V y Análisis de la Microestructura con la finalidad de que los valores obtenidos de estos ensayos, sean usados de comparación para determinar la variación de la Dureza, Impacto Charpy V y Análisis de la Microestructura correspondiente a la soldadura de los cupones con repetidas reparaciones. Además, los valores obtenidos de los ensayos de Dureza, Impacto Charpy V y Análisis de la Microestructura serán comparados con los valores obtenidos en estudios anteriores.

La soldadura del cupón del acero ASTM A335 Gr. P5 con PWHT será designado como “J1 con PWHT” o solamente “J1”. Cabe resaltar que la junta “J1 con PWHT” no presentan ninguna reparación previa, es decir es una soldadura nueva.

### **2.6.1. Actividades Antes y Durante la Soldadura**

- a) Los chaflanes de los nipples (dos nipples forman un cupón) se realizarán mediante la operación de mecanizado (fresado).
- b) Para la preparación de los cupones y sus componentes, se realizarán los siguientes puntos de soldadura indicados a continuación, los cuales serán removidos durante y después de la soldadura:

Los nipples se unirán mediante puntos de soldadura (en forma de puentes) cada 22.5° aproximadamente, y se unirán a una plancha de 1/8" (espesor) para cerrar la base del semi-cupón formado (semi-tubería), ver figura 2.7a.

Se soldarán las termocuplas (sensores de temperatura del equipo de calentamiento por inducción) mediante resistencia eléctrica, en la superficie externa de la tubería cerca al extremo del bisel, tal como se muestra en las figuras 2.7b, 2.7c y 2.7d.

- c) Después de la preparación de los cupones, se ensambla la fibra cerámica en trozos en los extremos (tapas) del semi-cupón formado; seguidamente se introducirá la manguera del gas de respaldo. Ver figura 2.8.
- d) Seguidamente se instalará el equipo de calentamiento por inducción en el cupón para realizar el precalentamiento y mantener la temperatura de entre pases durante la soldadura, ver figura 2.9.



Figura 2.7a



Figura 2.7b



Figura 2.7c



Figura 2.7d

Figura 2.7. Preparación de cupón: a) soldadura en los biselados de los semi-niples y en la plancha que forma el semi-cupón; b); c); y d) soldadura de una termocupla por resistencia eléctrica



Figura 2.8. Introducción de la manguera del gas de respaldo dentro de la fibra cerámica



Figura 2.9a



Figura 2.9b



Figura 2.9c



Figura 2.9d



Figura 2.9e

Figura 2.9. Instalación del equipo de calentamiento por inducción, figuras 2.9a y 2.9b; soldadura del cupón, figura 2.9c y 2.9d; medición de la temperatura entre pasas, figura 2.9e

### 2.6.2. Actividades Después de la Soldadura

Después de la soldadura se realizarán las actividades descritas líneas abajo en orden secuencial.

- a) Tratamiento termico de deshidrogenado.
- b) Tratamiento termico despues de la soldadura (PWHT, a  $T = 725^{\circ}\text{C}$  por 2h).
- c) Despues de que los cupones soldados esten a la temperatura ambiente; se extraerá muestras para realizar los ensayos de dureza Vickers, impacto Charpy V y análisis metalográfico. Los ensayos se ejecutarán de acuerdo al capítulo 2.10 de la presente tesis, para los ensayos en mención.

### 2.7. Soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 sin PWHT

Se realizará la soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 utilizando el WPS<sub>tesis</sub> (ver 2.5 de la presente tesis), sin efectuar el tratamiento térmico después de la soldadura (PWHT). Después de soldado el cupón; se realizará los ensayos de Dureza y Análisis Metalográfico, con la finalidad de conseguir lo siguiente:

- ✓ Confirmar que la microestructura de la soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 antes del PWHT, está conformado principalmente de martensita de bajo de carbono.
- ✓ Cuantificar indirectamente el efecto de alivio de tensiones del PWHT, mediante la medición de la dureza de la soldadura del acero ASTM A335 Gr. P5 con PWHT y sin PWHT.

La soldadura del cupón del acero ASTM A335 Gr. P5 sin PWHT será designado como “J1 sin PWHT”. Cabe resaltar que la junta “J1 sin PWHT” no presentan ninguna reparación previa, es decir es una soldadura nueva.

Las actividades antes y durante la soldadura de la junta “J1 sin PWHT” se ejecutarán de acuerdo al capítulo 2.6.1 de la presente tesis.

Después de la soldadura se realizarán las actividades descritas líneas abajo en orden secuencial.

- a) Tratamiento termico de deshidrogenado.
- b) Después de que el cupón soldado este a la temperatura de ambiente; se extraerá muestras para realizar los ensayos de dureza Vickers y análisis metalográfico. Los ensayos se ejecutarán de acuerdo al capítulo 2.10 de la presente tesis, para los ensayos en mención.

### **2.8. Soldadura de Cupones Simulando Tres y Cuatro Reparaciones Variando las Variables del “Tratamiento Térmico”**

En este sub-capítulo (2.8) de la presente tesis no está incluida el análisis de la soldura de los cupones con una y dos reparaciones, sin embargo, para poder ejecutar la tercera y cuarta reparación se necesita la segunda y tercera reparación respectivamente. Estas reparaciones previas se ejecutaran desde la primera soldadura, pasando por la primera, segunda y tercera reparación según requiera, utilizando en todos los casos el WPS<sub>tesis</sub> con PWHT con parámetro “P” = 20.26 (correspondiente a 725° por 2h). El flujograma de la soldadura de cupones simulando tres y cuatro reparaciones variando las variables del tratamiento termico es mostrado en la figura 2.10.

La soldadura de los cupones serán designadas de la siguiente manera: cupón soldado con una reparación (reparación de la junta “J1”) = identificado como “J1R”; cupón soldado con dos reparaciones repetidas (reparación de la junta “J1R”) = identificado como “J2R”; cupón soldado con tres reparaciones repetidas (reparación de la junta “J2R”) = identificado como “J3R”; y cupón soldado con cuatro reparaciones repetidas (reparación de la junta “J3R”) = identificado como “J4R”.

El tipo de reparación típico realizado consiste en la remoción total del espesor del metal de aporte depositado mediante la operación de amolado (corte, desbaste, cepillado y pulido), removiendo todo el volumen aproximado del metal de aporte depositado. En ningún

condición de reparación de las juntas J3R-x y J4R-x, se removerá el volumen de la zona afectada por el calor (ZAC).

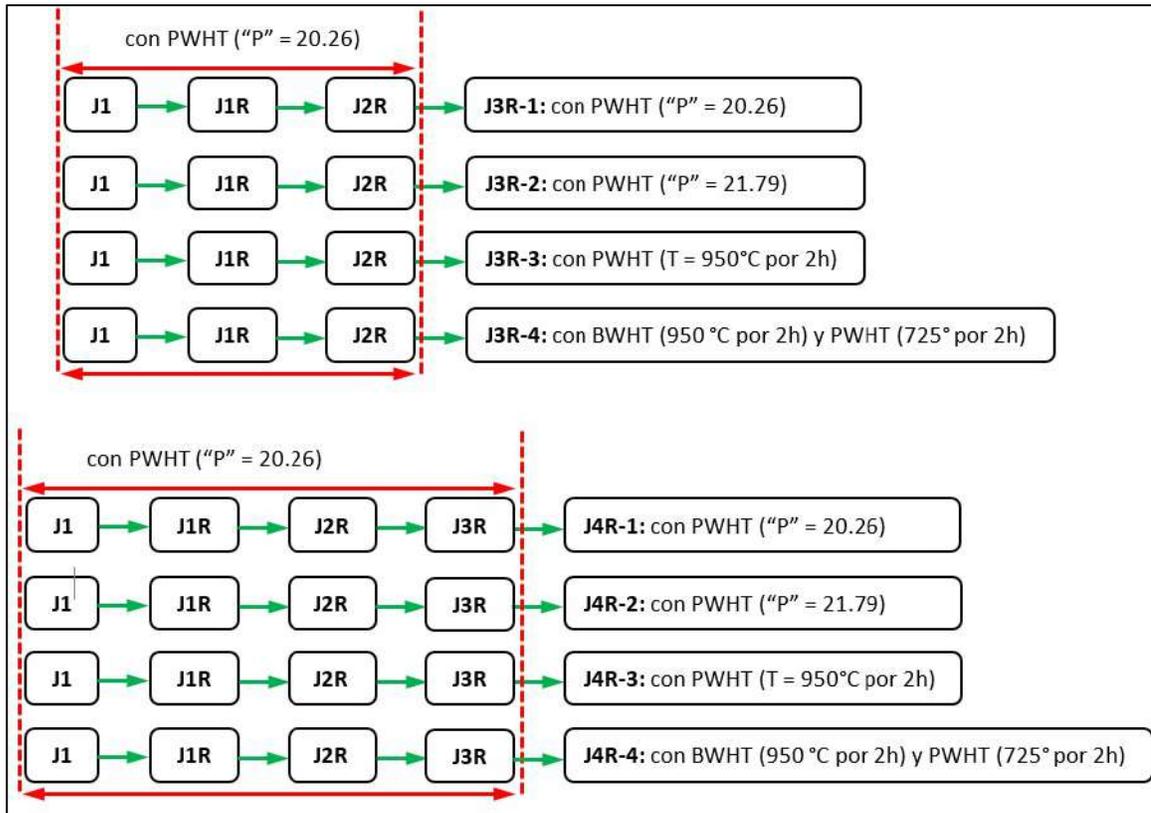


Figura 2.10: flujograma de la soldadura de cupones simulando tres y cuatro reparaciones variando las variables del tratamiento termico

Durante la soldadura las configuraciones (condiciones) del tratamiento termico de las juntas J3R-x y J4R-x; se emplearán las variables de soldadura de la Especificación de Procedimiento de Soldadura ( $WPS_{\text{tesis}}$ , ver 2.5 de la presente tesis) y para el Tratamiento Termico se utilizaran las configuraciones (condiciones) del tratamiento termico detallados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Configuraciones de tratamiento térmico realizado antes y después de la soldadura de las juntas J3R-x y J4R-x

Código de prueba	Junta - N° configuración	Antes de la soldadura (BWHT)			Después de la soldadura (PWHT)		
		Temperatura	Tiempo permanencia	Velocidad calentamiento/enfriamiento	Temperatura	Tiempo permanencia	Velocidad calentamiento/enfriamiento
4	J3R-1	No aplica	No aplica	No aplica	725°C	2h	150°C/h
6	J3R-2	No aplica	No aplica	No aplica	800°C	2h	150°C/h
7	J3R-3	No aplica	No aplica	No aplica	950°C	2h	150°C/h
10	J3R-4	950°C (realizado a la junta J2R finalizada)	2h	150°C/h	725°C	2h	150°C/h
5	J4R-1	No aplica	No aplica	No aplica	725°C	2h	150°C/h
8	J4R-2	No aplica	No aplica	No aplica	800°C	2h	calentamiento: 150°C/h; enfriamiento: dentro del horno
9	J4R-3	No aplica	No aplica	No aplica	950°C	2h	
11	J4R-4	950°C (realizado a la junta J3R finalizada)	2h	150°C/h	725°C	2h	

Las actividades antes y durante la soldadura de las juntas J3R-x y J4R-x se ejecutarán de acuerdo al sub-capítulo 2.6.1 de la presente tesis, a excepción de que los chaflanes de los cupones se realizarán mediante la operación de amolado manual.

Después de la soldadura se realizarán las actividades descritas líneas abajo en orden secuencial.

- a) Tratamiento térmico antes de la soldadura (BWHT), solamente se realizará para una configuración (condición) de tratamiento térmico, solo corresponde a las juntas con código de prueba 10 y 11 (ver tabla 2.3).
- b) Tratamiento térmico de deshidrogenado de acuerdo al WPS<sub>tesis</sub>
- c) Tratamiento térmico después de la soldadura (PWHT).
- d) Después de que los cupones soldados estén a la temperatura de ambiente; se extraerán muestras para realizar los ensayos de dureza Vickers, impacto Charpy V, análisis

metalográfico y análisis micrografico. Los ensayos se ejecutaran de acuerdo al capítulo 2.10 de la presente tesis, para los ensayos en mención.

### **2.9. Soldadura de Cupones Simulando Repetidas Reparaciones con la Mejor Configuración de Tratamiento Térmico (Obtenido en el Capítulo 2.8)**

En este capítulo se realizara la soldadura de cupones con una, dos, tres y cuatro reparaciones repetidas utilizando las variables del WPStesis y la mejor configuración (condición) del tratamiento termico obtenido en el capítulo 2.8 de la presente tesis. La finalidad de este capítulo (2.9) es para analizar la variación de los valores de la dureza, resistencia al impacto y microestructura, conforme se incrementa el número de reparaciones repetidas.

La soldadura de los cupones serán designadas de la siguiente manera: cupón soldado con una reparación (reparación de la junta “J1”) = identificado como “J1R”; cupón soldado con dos reparaciones repetidas (reparación de la junta “J1R”) = identificado como “J2R”; cupón soldado con tres reparaciones repetidas (reparación de la junta “J2R”) = identificado como “J3R”; y cupón soldado con cuatro reparaciones repetidas (reparación de la junta “J3R”) = identificado como “J4R”.

El tipo de reparación típico realizado consiste en la remoción total del espesor del metal de aporte depositado mediante la operación de amolado (corte, desbaste, cepillado y pulido), removiendo todo el volumen aproximado del metal de aporte depositado. En ningún condición de reparación de las juntas J1R, J2R, J3R y J4R, se removerá el volumen de la zona afectada por el calor (ZAC).

Las actividades antes y durante la soldadura de los cupones correspondientes a las juntas J1R, J2R, J3R y J4R, se ejecutaran de acuerdo al subcapítulo 2.6.1 de la presente tesis, a excepción de que los chaflanes de los nipples se realizarán mediante la operación de amolado manual.

Después de la soldadura se realizarán las actividades descritas líneas abajo en orden secuencial.

- a) Tratamiento térmico de deshidrogenado de acuerdo al WPS<sub>tesis</sub>
- b) Después se realizará el tratamiento termico despues de la soldadura (PWHT).
- c) Después de que los cupones soldados esten a la temperatura ambiente; se extraerá muestras para realizar los ensayos de dureza Vickers, impacto Charpy V y análisis metalográfico. Los ensayos se ejecutarán de acuerdo al capítulo 2.10 de la presente tesis, para los ensayos en mención.

## **2.10. Ensayos de Caracterización**

### **2.10.1. Dureza Vickers HV10**

Se seleccionó la escala de dureza Vickers con una carga de 10 kg, debido a que las dimensiones de la huella son menores en comparación con los ensayos Brinell y Rockwell, la cual permite realizar indentaciones en la Línea de Fusión (LF), Zona Afectada por el Calor (ZAC) y el Metal de Aporte (MA).

Se ejecutarán las indentaciones en dos secciones transversales (por duplicado) de la soldadura en todas las probetas de las juntas soldadas; los puntos de dureza están ubicados en el MB, ZAC, LF y MA. La localización de los barridos de dureza son realizados a 1.5 mm de la superficie interna y externa de la tubería como es mostrado en la figura 2.11. Las indentaciones en la ZAC deberán incluir ubicaciones lo más cerca posible (aproximadamente 0.2 mm) a la línea de fusión de la soldadura [10].

El equipo a utilizar es un durometro Zwick/Roell ZHV, ver figura 2.12. El ensayo se realizará en el “Laboratorio de Materiales, de la Sección Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú”.

Todas las indentaciones serán ejecutadas de acuerdo a la norma ASTM E92-17 [25].

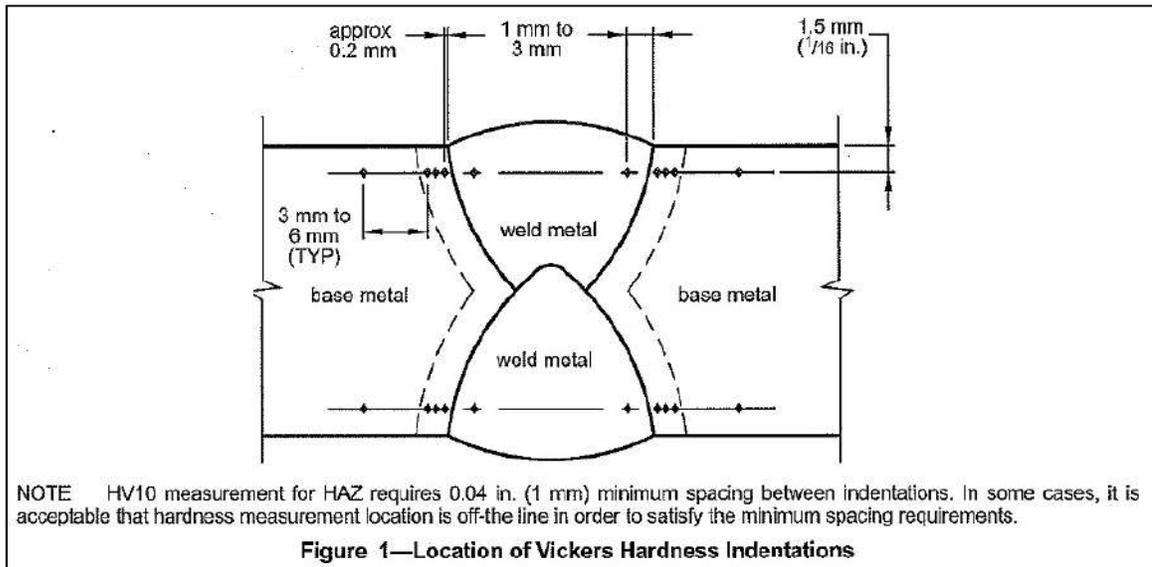


Figura 2.11: Localización de las Indentaciones de Dureza Vickers [10]



Figura 2.12a



Figura 2.12b



Figura 2.12c

Figura 2.12: Equipo de Dureza Zwick/Roell ZHV; a) Indentando la probeta con código de prueba 7, b) Después de la indentación (finalizado el tiempo de aplicación de la carga, c) Valor de dureza HV10 obtenido

### 2.10.2. Ensayo Charpy V-muesca (Ensayo de Impacto)

Se realizarán ensayos de impacto por triplicado (tres probetas) a la temperatura de  $-29^{\circ}\text{C}$ , en sub-probetas de 7.5 mm (espesor) x 10 mm (ancho) x 55 mm (largo) con la muesca en V.

Los ejes de las muescas fueron localizados según lo descrito a continuación:

- Eje de la muesca ubicada en la ZAC (en todas las juntas soldadas).
- Eje de las muesca ubicada en el MA (en todas las juntas soldadas).

El equipo a utilizar es una máquina de impacto marca Frank, ver figura 2.14. El ensayo se ejecutará en el “Laboratorio de Materiales, de la Sección Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú”.

Las pruebas de impacto Charpy se realizan según normas internacionales en las cuales se detallan las dimensiones de las probetas empleadas en este tipo de ensayo, así como la forma de reportar los resultados de los mismos. Todos los ensayos de impacto se ejecutarán de acuerdo a la norma ASTM E23-16b [32]

De acuerdo con las normas ISO, los resultados de los ensayos de impacto, en probetas entalladas, se suelen expresar en ( $\text{kJ}/\text{m}^2$  o  $\text{J}/\text{cm}^2$ ), para lo cual se divide la energía absorbida para provocar la fractura de la probeta entre la sección transversal de la misma en la zona de la entalla ( $h \times b_N$ ) (ver figura 2.13) [33].

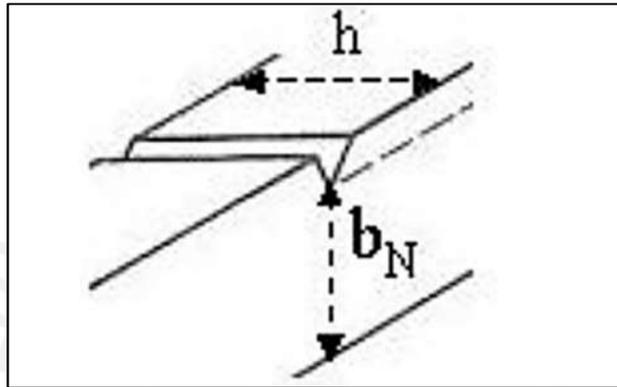


Figura 2.13: Dimensiones de la sección transversal para calcular el área transversal en la zona de la entalla, para el cálculo de la resistencia al impacto

### 2.10.3. Análisis Metalográfico

Se realizará el análisis metalográfico en las zonas ZAC, MA y MB (en el MB, si el área a analizar lo permite) en todas las juntas soldadas, incluido el metal base de suministro. Los aumentos utilizados son de 100X, 200X y 500X. Se empleará el “microscopio tipo invertido de investigación para ensayos de materiales” LEICA DMI5000 M y la cámara es LEICA DFC450 C, ver figura 2.15.

#### 2.10.3.1. Preparación Superficial de las Probetas

Se ejecutará las actividades de desbaste y pulido, con la finalidad de que las probetas estén aptas para el análisis metalográfico. La preparación de las probetas se realizará de acuerdo a la norma ASTM E3-11 [34]. Las probetas serán embriquetadas antes de realizar la preparación mecánica.



Figura 2.14a



Figura 2.14b



Figura 2.14c



Figura 2.14d

Figura 2.14. Equipo de Impacto; a) Equipo ajustado en la marca "0", b) Datos del equipo, c) sub-probetas enfriadas a  $-29^{\circ}\text{C}$ , listas a ser ensayadas, d) sub-probeta colocada en los apoyos del equipo



Figura 2.15: Microscopio óptico de luz reflejada para análisis metalográfico

Desbaste: se realizará de manera automática (con discos abrasivos con fijación magnética en los discos base) y manual (con lijas al agua)

Paso 1: MD-Forte 120 (tamaño de grano promedio  $102\ \mu\text{m}$ ), 300 rpm por 2 min, medio abrasivo embebido en el disco abrasivo (trabaja con agua)

Paso 2: MD Piano 220 (tamaño de grano promedio  $63\ \mu\text{m}$ ), 300 rpm por 4 min, medio abrasivo embebido en el disco abrasivo (trabaja con agua)

Paso 3: MD Allegro, 150 rpm por 4 min, medio abrasivo inyectado desde un frasco (tamaño abrasivo  $9\ \mu\text{m}$ ).

Pulido: se realizará de manera manual y semiautomática

Paso 1: se lijo manualmente con lijas al agua # 180, 320, 400 y 600; Paso 2: se utilizó el plato pulidor con abrasivo de  $6\ \mu\text{m}$ ; Paso 3: se utilizó el plato pulidor con abrasivo de  $1\ \mu\text{m}$

### 2.10.3.2. Ataque Superficial de las Probetas

Para el ataque (grabado) superficial de las probetas, se utilizará el reactivo “Vital – Vilella's”, cuya composición es: 5ml  $\text{HNO}_3$ , 5ml de  $\text{HCL}$ , 1g de ácido pírrico  $\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$  y 200ml de Etanol (95%)  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ .

La selección del reactivo se realizó de acuerdo a la tabla 2 y 1 de la norma ASTM E407-07 (2015)<sup>e1</sup> [35]. El número de lista del reactivo de ataque es 91 (Este reactivo de ataque es equivalente a una mezcla 1 + 1 de No. 80 y No. 74 (5% HNO<sub>3</sub>)).

#### 2.10.4. Análisis Micrográfico

Se empleará el SEM en los modos emisivo (muestra la topografía de la superficie) y EDS (proporciona la composición química a partir de los rayos X característicos emitidos por la muestra). No se podrá observar las diferencias en composición química mediante variación de colores en las fases presentes, debido a que el modo de electrones retrodispersados se encuentra inoperativo.

Se utilizará el microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650 (figura 2.16), el cual cuenta con una capacidad de hasta 300000 aumentos, la cual permite realizar un microanálisis químico mediante la técnica de EDS.



Figura 2.16: Microscopio electrónico de barrido (SEM)



**CAPÍTULO III**

**RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### 3.1 Caracterización del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro

#### 3.1.1 Análisis Químico del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro

El resultado del análisis químico realizado a una muestra del metal base de suministro (sin soldar), es mostrado en la tabla 3.1. Los valores obtenidos en porcentaje en peso de los elementos químicos indicados en la tabla 3.1, cumplen con los requerimientos de composición química de la especificación ASTM A335.

Tabla 3.1. Análisis Químico del Metal Base

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Fe
0.11	0.426	0.421	0.0081	0.00095	4.579	0.534	93.70
0.114	0.423	0.418	0.0081	0.00085	4.539	0.528	93.76
<b>0.112</b>	<b>0.4245</b>	<b>0.4195</b>	<b>0.0081</b>	<b>0.0009</b>	<b>4.559</b>	<b>0.531</b>	<b>93.73</b>
Composición Química Requerida: Table 1 Chemical Requirements ASTM A335 [15]							
0.15 máx.	0.50 máx.	0.30-0.60	0.025 máx.	0.025 máx.	4.00-6.00	0.45-0.65	---

#### 3.1.2 Valores de Dureza del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro

Los valores de dureza obtenidos en la sección transversal de las muestras del MB, son mostrados en la tabla 3.2. El valor promedio es 93.4 HRB (203 HV).

Tabla 3.2. Valores de Dureza en el Metal Base

Puntos de dureza	Dureza HRB, con precarga 10kg y carga de 100 kg			Promedio (HRB)	Conversión a Dureza Vickers (HV) [25]
	1	2	3		
Metal Base	93.4	93.2	93.7	93.4	203

#### 3.1.3 Energía Absorbida del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro

Los valores de energía absorbida en la sección transversal de las probetas (especímenes) del MB, son mostrados en la tabla 3.3. El valor promedio es 215J y el valor de resistencia al impacto promedio calculado es 359 J/cm<sup>2</sup>.

Tabla 3.3. Valores de Energía Absorbida en el Ensayo de Impacto Charpy V en el Metal Base

Muestra (Especímen)	valor 1 (J)	valor 2 (J)	valor 3 (J)	valor promedio (J)	Resistencia al Impacto Calculado (J/cm <sup>2</sup> )
Metal Base	210	216	220	215	358

### 3.1.4 Microestructura del Metal Base (MB) en Estado Virgen o de Suministro

La microestructura obtenida de la muestra (sección transversal de la tubería) es mostrado en la figura 3.1, la cual consiste principalmente en: granos de ferrita irregulares y productos de transformación diferentes a la martensita (de acuerdo a la figura 1.3, es probable la presencia de Bainita). Cabe mencionar que al aumento utilizado de 500X [20  $\mu\text{m}$ ] no se aprecia la presencia de carburos dispersos, sin embargo no se descarta su presencia debido a lo revisado en la literatura (capítulo 1.7.1 de la presente tesis).

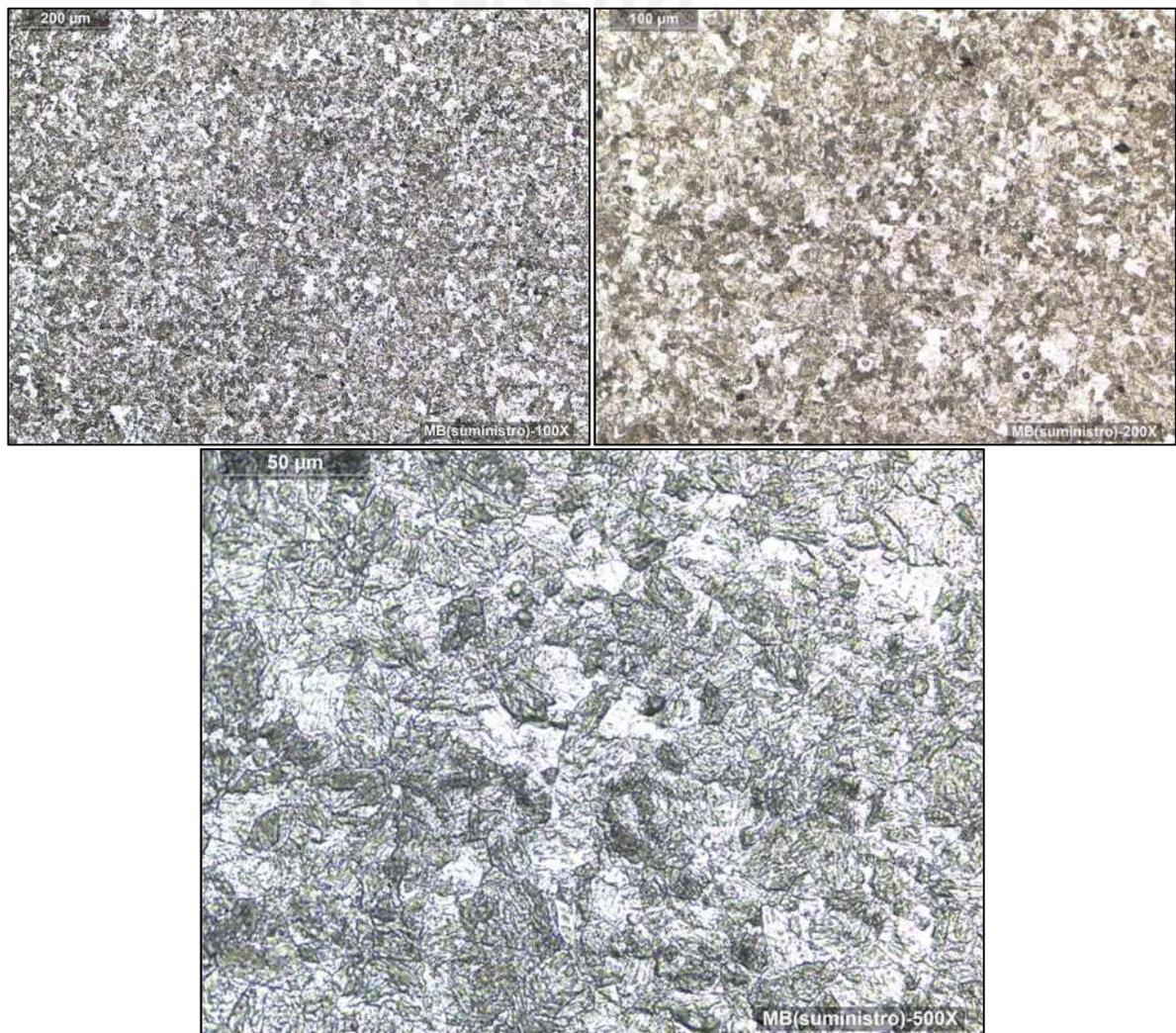


Figura 3.1. Microestructura del metal base (suministro) a 100X, 200X y 500X

De acuerdo a los valores de dureza (tabla 3.2), valores de la energía absorbida (tabla 3.3), la microestructura obtenida (figura 3.1) y considerando lo indicado en la especificación ASTM A335 referente al tratamiento térmico final (el acero Gr. P5 puede recibir un tratamiento térmico final, de “recocido total” o “normalizado+revenido”); se deduce que el MB ha recibido un tratamiento térmico final (después de su fabricación) de “normalizado+revenido”.

### **3.2 Caracterización de las Juntas “J1 sin PWHT” y “J1 con PWHT”**

Se realizó la caracterización de las muestras de la junta “J1 sin PWHT”, y la otra junta “J1 con PWHT”.

#### **3.2.1 Caracterización de la Junta “J1 sin PWHT”**

##### **3.2.1.1 Análisis Metalográfico**

La microestructura de la junta “J1 sin PWHT” en el MA, consiste principalmente en martensita tipo listón con presencia de carburos diseminados aleatoriamente, tal como se muestra en la figura 3.2. La microestructura de la junta “J1 sin PWHT” en la ZAC (figura 3.3), está conformada principalmente por una matriz de granos de ferrita, con productos de transformación diferentes a la martensita (debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos diseminados aleatoriamente; además el tamaño de grano es menor que en el MA.

Para verificar la presencia de martensita se realizaron indentaciones de dureza en las muestras de la junta soldada “J1 sin PWHT”, cerca de la superficie externa en la sección transversal y en la superficie externa.

En base al análisis metalográfico y a los valores de dureza (tablas 3.5 y 3.6), se confirma que la microestructura principal de la junta “J1 sin PWHT” en el MA es martensita.



Figura 3.2a

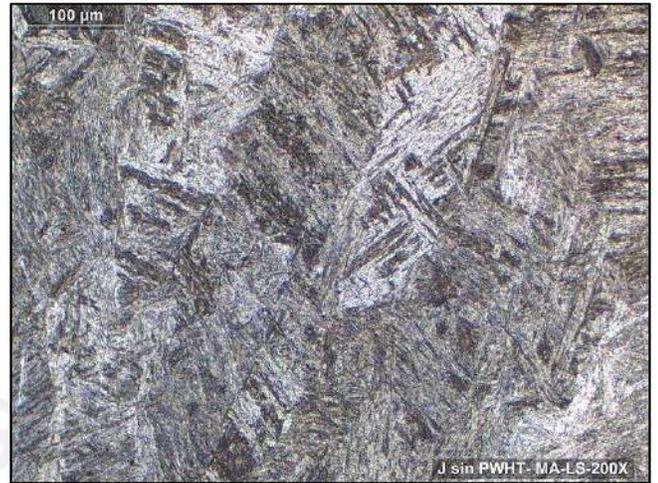


Figura 3.2b

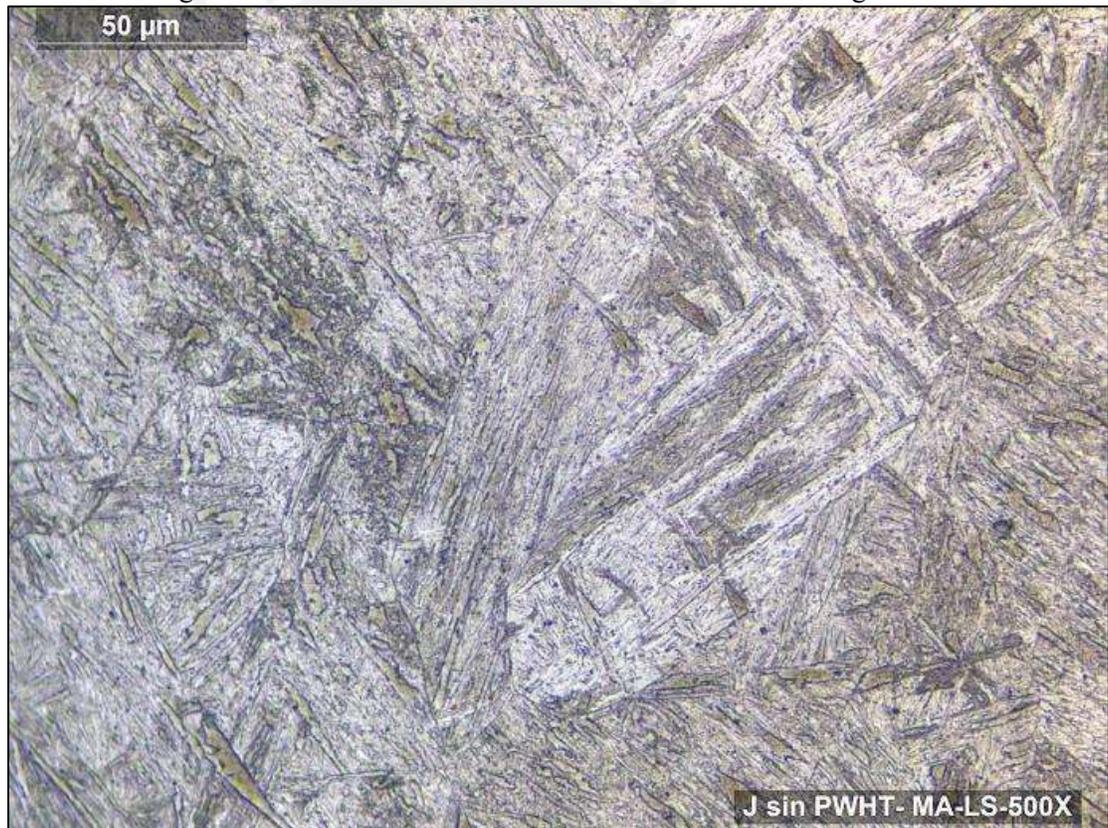


Figura 3.2c

Figura 3.2. Microestructura capturada del microscopio óptico a diferentes aumentos en la línea superior del metal de aporte: 100X, figura 3.2a; 200X, figura 3.2b y 500X, figura 3.2c

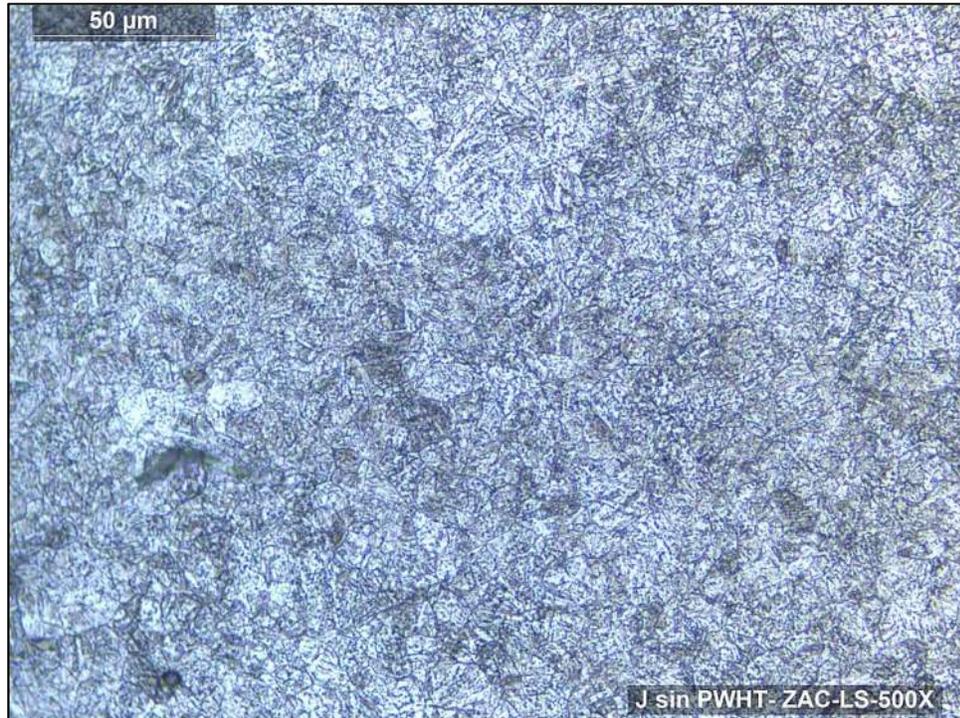


Figura 3.3. Microestructura capturada del microscopio óptico a 500X en la línea superior de la zona afectada por el calor

### 3.2.1.2 Ensayo de Dureza Vickers a Temperatura Ambiente

Los valores máximos de dureza obtenidos en la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal de aporte (MA), alcanzan valores de 388 HV10 (en la ZAC) y 372 HV10 (en el MA) en la línea superior (ver tabla 3.4); y valores de 384 HV10 (en la ZAC) y 399 HV10 (en el MA) en la superficie externa (ver tabla 3.5).

En un estudio anterior de “Understanding the factors controlling the hardness in martensitic steels” [36], se obtuvo el rango de valores de 320 HV - 375 HV para los aceros de bajo carbono entre 0.10%C a 0.15%C en la condición de templados. De acuerdo al análisis químico realizado al metal base, se obtuvo 0.11%C (tabla 3.1), sin embargo, algunos valores obtenidos en las tablas 3.5 y 3.6 superan el valor de 375 HV (valor de dureza para un acero al carbono de 0.15%C en la condición de templado), esto puede explicarse debido al endurecimiento adicional por dispersión de los carburos típicos presentes (ver figuras 3.2 y 3.3) en el acero aleado ASTM A335 Gr. P5.

Tabla 3.4. Valores de dureza en la línea superior a temperatura ambiente correspondiente a la junta “J1 sin PWHT”

	<b>Zona</b>	<b>Dureza HV10</b>	<b>Localización</b>
<b>LÍNEA SUPERIOR (valores promedio de las dos secciones transversales ensayadas)</b>	1	201	MB
	2	203	MB
	3	342	ZACI1
	4	388	ZACI2
	5	387	ZACI3
	6	386	LFI
	7	372	MA
	8	353	MA
	9	359	LFD
	10	381	ZACD1
	11	376	ZACD2
	12	327	ZACD3
	13	207	MB
	14	205	MB

Tabla 3.5. Valores de dureza en la superficie externa a temperatura ambiente correspondiente a la junta “J1 sin PWHT”

<b>Zona (Superficie Externa)</b>	<b>d1 (μm)</b>	<b>d2 (μm)</b>	<b>d prom. (μm)</b>	<b>Dureza HV10</b>	<b>Localización</b>
1	214.3	224.5	219.4	385	MA
2	209.7	221.7	215.7	399	MA
3	212.5	221.7	217.1	393	MA
4	216.2	223.6	219.9	384	ZAC
5	218.0	216.3	217.2	339	ZAC
6	230.9	236.5	233.7	320	ZAC

### 3.2.2 Caracterización de la Junta “J1 con PWHT” o “J1”

#### 3.2.2.1 Ensayo de Dureza Vickers a Temperatura de Ambiente

Se realizaron indentaciones localizadas en la línea cercana a la superficie externa (LS) e interna (LI) de las muestras correspondiente a la junta “J1” (“J1” = “J1 con PWHT”); atravesando las zonas del metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC), línea de fusión (LF) y metal de aporte (MA). En la figura 3.4 se muestra el perfil de dureza de la junta “J1”, la cual es comparada con el valor de dureza promedio del MB de suministro (tabla 3.2) y con el valor de dureza máximo permitido (248 HV, ver subcapítulo 1.4.6.1).

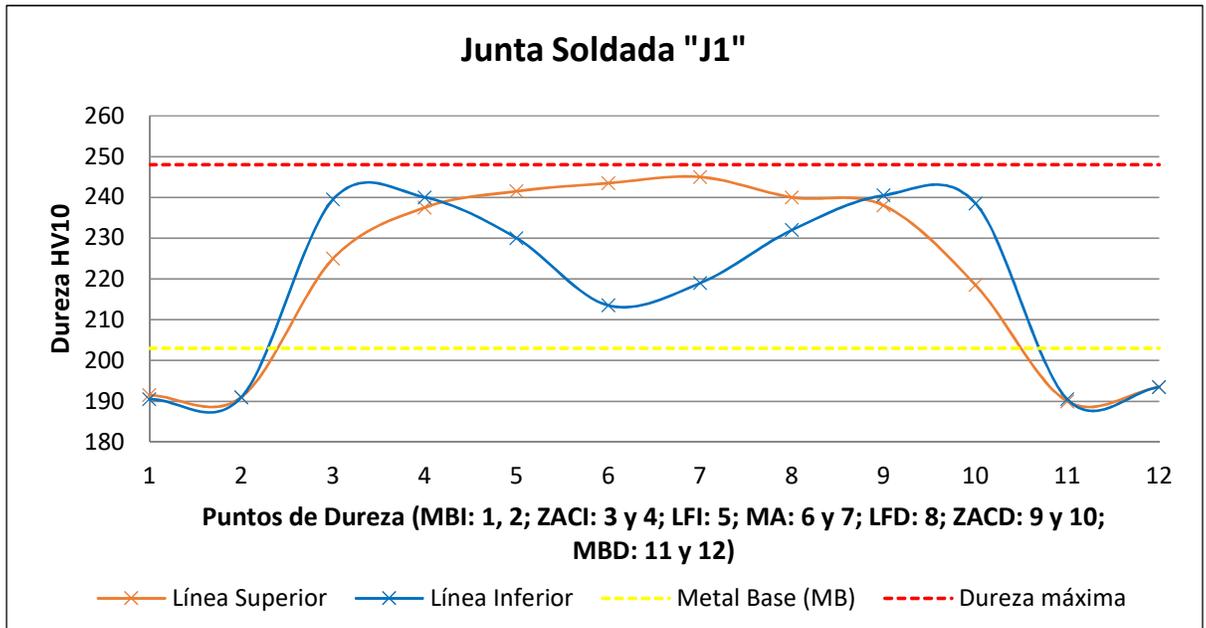


Figura 3.4: Perfil de dureza de la junta "J1" a través de las zonas de interés de la sección transversal de la soldadura

En base a los resultados mostrados de la figura 3.4; se observa que los valores de dureza de la junta "J1" son menores que la dureza máxima. Además, se aprecia que los valores de dureza en el MA y en la LF, son mayores en la línea superior con respecto a la línea inferior.

### 3.2.2.2 Ensayo de Impacto Charpy V a $-29^{\circ}\text{C}$

Los valores obtenidos de la energía absorbida, a la temperatura de  $-29^{\circ}\text{C}$ , correspondiente a las tres probetas (especímenes) de la junta "J1", son mostrados en la tabla 3.6. El cálculo de la resistencia al impacto de la junta "J1", también es mostrado en la tabla 3.6.

En base a los resultados de la tabla 3.6, se observa que la junta "J1" cumple satisfactoriamente con los requerimientos de energía absorbida mínima para un espécimen (14J, tabla 1.9 de la presente tesis) y con el promedio de tres especímenes (18J, tabla 1.9 de la presente tesis).

Tabla 3.6: Valores de energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy V a  $-29^{\circ}\text{C}$  de la junta J1

Muestra	Eje de la muesca	valor 1 (J)	valor 2 (J)	valor 3 (J)	Valor Promedio (J)	Resistencia al Impacto Calculado ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )
“J1”	ZAC	188	178	185	184	307
“J1”	MA	64	66	68	66	110

La resistencia al impacto con la muesca en la ZAC correspondiente a la junta “J1”, es  $307 \text{ J}/\text{cm}^2$  (a  $-29^{\circ}\text{C}$ ) para un valor del parámetro “P” = 20.26; en un estudio anterior [9] para el mismo acero soldado con el mismo valor del parámetro “P”, se obtuvo un valor de resistencia al impacto  $\sim 350 \text{ J}/\text{cm}^2$  (a  $+20^{\circ}\text{C}$ ). La diferencia de los valores obtenidos, puede explicarse principalmente por la diferencia de temperaturas en la realización del ensayo de impacto Charpy V (a bajas temperaturas el acero disminuye su resistencia al impacto).

La resistencia al impacto con la muesca en el MA correspondiente a la junta “J1”, es  $110 \text{ J}/\text{cm}^2$  (a  $-29^{\circ}\text{C}$ ) para un valor del parámetro “P” = 20.26; en un estudio anterior [9], para el mismo acero soldado con el mismo valor del parámetro “P”, se obtuvo valores de resistencia al impacto en el MA, de  $170 \text{ J}/\text{cm}^2$  (a  $0^{\circ}\text{C}$ ) y  $188 \text{ J}/\text{cm}^2$  (a  $+20^{\circ}\text{C}$ ); en otro estudio anterior [28], para el mismo acero soldado con el mismo valor del parámetro “P”, se obtuvo un valor de resistencia al impacto en el MA de  $\sim 190 \text{ J}/\text{cm}^2$ . La diferencia de los valores obtenidos, puede explicarse principalmente por la diferencia de temperaturas en la realización del ensayo de impacto Charpy V (a bajas temperaturas el acero disminuye su resistencia al impacto).

### 3.2.2.3 Análisis Metalográfico

La microestructura de la junta “J1” consiste principalmente de (ver figura 3.5): en el MA se observa una matriz de granos de ferrita de forma irregular, martensita revenida (la martensita tipo listón observada en la figura 3.2 ya no está presente) y con presencia de carburos de diferente dispersión; en la ZAC (ver figura 3.6) está conformada principalmente por una matriz de granos de ferrita, con productos de transformación diferentes a la martensita

(debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos de diferente dispersión.

En un estudio anterior de Vigantas Kumšlytis [9], se aprecia la presencia de carburos dispersos a una escala de  $20\ \mu\text{m}$  para el mismo acero soldado para un valor del parámetro de 20.46 (cercano al parámetro de 20.26 utilizado). En otro estudio anterior de Hans-Olof Andrén [30], las microestructuras principales reportadas coinciden con lo obtenido. En los estudios anteriores se observa mayor densidad de carburos que en el reportado en el párrafo anterior, esto se puede explicar debido las microestructuras capturadas en el MA y ZAC se realizaron a una escala de  $50\ \mu\text{m}$  (a 500X de aumento).



Figura 3.5. Microestructura de la junta J1 a 500X en la línea superior del metal de aporte (MA)

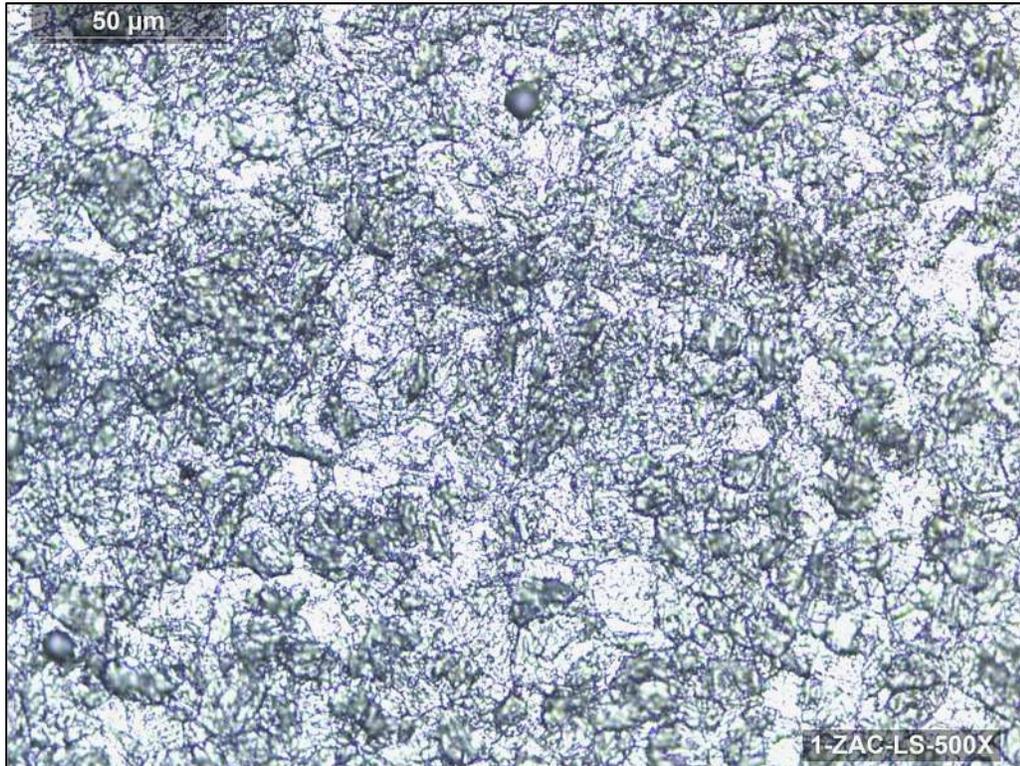


Figura 3.6. Microestructura de la junta J1 a 500X en la línea superior de la ZAC

### 3.3 Caracterización de las Juntas con Tres (J3R) y Cuatro (J4R) Reparaciones Variando las Variables del “Tratamiento Térmico”

La caracterización de las juntas con una (J1R) y con dos (J2R) reparaciones no se muestran en este capítulo, debido a lo explicado en el capítulo 2.8 de la presente tesis.

Se realizó la caracterización de las cuatro configuraciones (condiciones) del tratamiento térmico para las juntas J3R-x y J4R-x, obtenidas variando las variables del tratamiento térmico, tres configuraciones con incrementos en la temperatura del PWHT y una configuración con un tratamiento térmico antes y después de la soldadura, tal como es detallado en la tabla 3.7. En la tabla 3.7 también se muestra el valor del parámetro “P” calculado para temperaturas de mantenimiento menores a la crítica superior (AC3).

Tabla 3.7. Configuraciones de tratamiento térmico para las juntas J3R y J4R

Junta – N° configuración	Código de prueba	Juntas – tratamiento térmico	Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Parámetro “p”
J3R-1	4	J3R con PWHT	725°C (PWHT)	2	20.26
J3R-2	6	J3R con PWHT	800°C (PWHT)	2	21.79
J3R-3	7	J3R con PWHT	950°C (PWHT)	2	No aplica
J3R-4	10	J3R con BWHT (realizado a la junta J2R después del PWHT) y PWHT	950°C (BWHT) y 725°C (PWHT)	2 y 2	No aplica
J4R-1	5	J4R con PWHT	725°C (PWHT)	2	20.26
J4R-2	8	J4R con PWHT	800°C (PWHT)	2	21.79
J4R-3	9	J4R con PWHT	950°C (PWHT)	2	No aplica
J4R-4	11	J4R con BWHT (realizado a la junta J3R después del PWHT) y PWHT	950°C (BWHT) y 725°C (PWHT)	2 y 2	No aplica
PWHT = tratamiento térmico después de la soldadura; BWHT = tratamiento térmico antes de la soldadura					

### 3.3.1 Dureza Vickers a Temperatura de Ambiente

Se realizaron indentaciones localizadas en la línea cercana a la superficie externa (LS) e interna (LI) de las muestras correspondientes a las cuatro configuraciones de tratamiento térmico de las juntas J3R-x y J4R-x (tabla 3.7); atravesando las zonas de interés del metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC), línea de fusión (LF) y metal de aporte (MA). En la tabla 3.8 se muestra los valores de dureza promedio de las juntas J3R-x y J4R-x con respecto a la junta “J1”.

Tabla 3.8. Valor de dureza promedio de las juntas J3R y J4R de las cuatro configuraciones de tratamiento térmico

<b>J3R y J4R - Línea Superior (LS)</b>							
Junta – N° configuración	Código de prueba (tabla 3.7)	Dureza promedio (HV10)			Variación de dureza con respecto a J1 (%)		
		MB	ZAC	MA	MB	ZAC	MA
J3R-1	4	187	220	243	-2%	-4%	-0.4%
J3R-2	6	150	152	204	-22%	-33%	-16%
J3R-3	7	145	163	236	-24%	-29%	-4%
J3R-4	10	145	217	239	-24%	-5%	-2%
J4R-1	5	179	204	245	-6%	-10%	0.4%
J4R-2	8	149	151	216	-22%	-34%	-12%
J4R-3	9	140	160	335	-27%	-30%	37%
J4R-4	11	141	203	237	-27%	-11%	-3%
J1 (sin reparación)	1	192	228	244	0%	0%	0%
<b>J3R y J4R - Línea Inferior (LI)</b>							
Junta – N° configuración	Código de prueba (tabla 3.7)	Dureza promedio (HV10)			Variación de dureza con respecto a J1 (%)		
		MB	ZAC	MA	MB	ZAC	MA
J3R-1	4	185	229	203	-4%	-4%	-6%
J3R-2	6	157	158	189	-18%	-34%	-12%
J3R-3	7	141	174	194	-26%	-27%	-10%
J3R-4	10	146	219	212	-24%	-8%	-2%
J4R-1	5	175	197	196	-9%	-18%	-10%
J4R-2	8	152	155	152	-21%	-35%	-30%
J4R-3	9	143	183	207	-25%	-23%	-4%
J4R-4	11	147	213	195	-23%	-11%	-10%
J1 (sin reparación)	1	191	238	216	0%	0%	0%

Los perfiles de dureza en la LS e LI de todas las configuraciones de tratamiento térmico correspondiente a las juntas J3R-x y J4R-x, son mostrados en las figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10; a razón de comparación se muestra el perfil de dureza de la junta “J1”, el valor de dureza promedio del MB de suministro (203 HV, tabla 3.2) y el valor de dureza máximo (248 HV, subcapítulo 1.4.6.1).

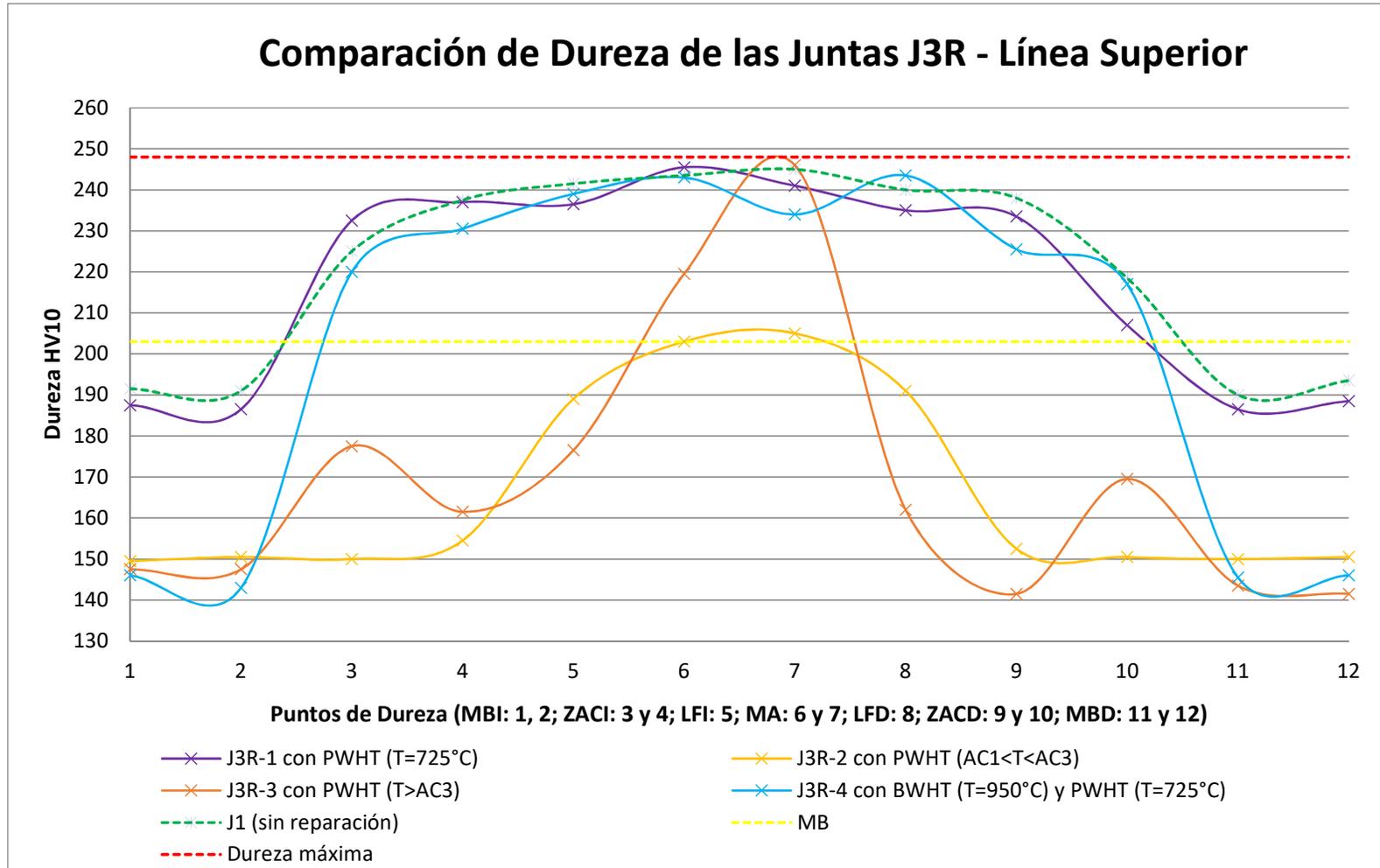


Figura 3.7. Comparación de los perfiles de dureza en la línea superior (línea paralela a la superficie externa de la tubería, a 1.5 mm) de las juntas reparadas J3R con cuatro configuraciones de tratamiento térmico (tabla 3.7)

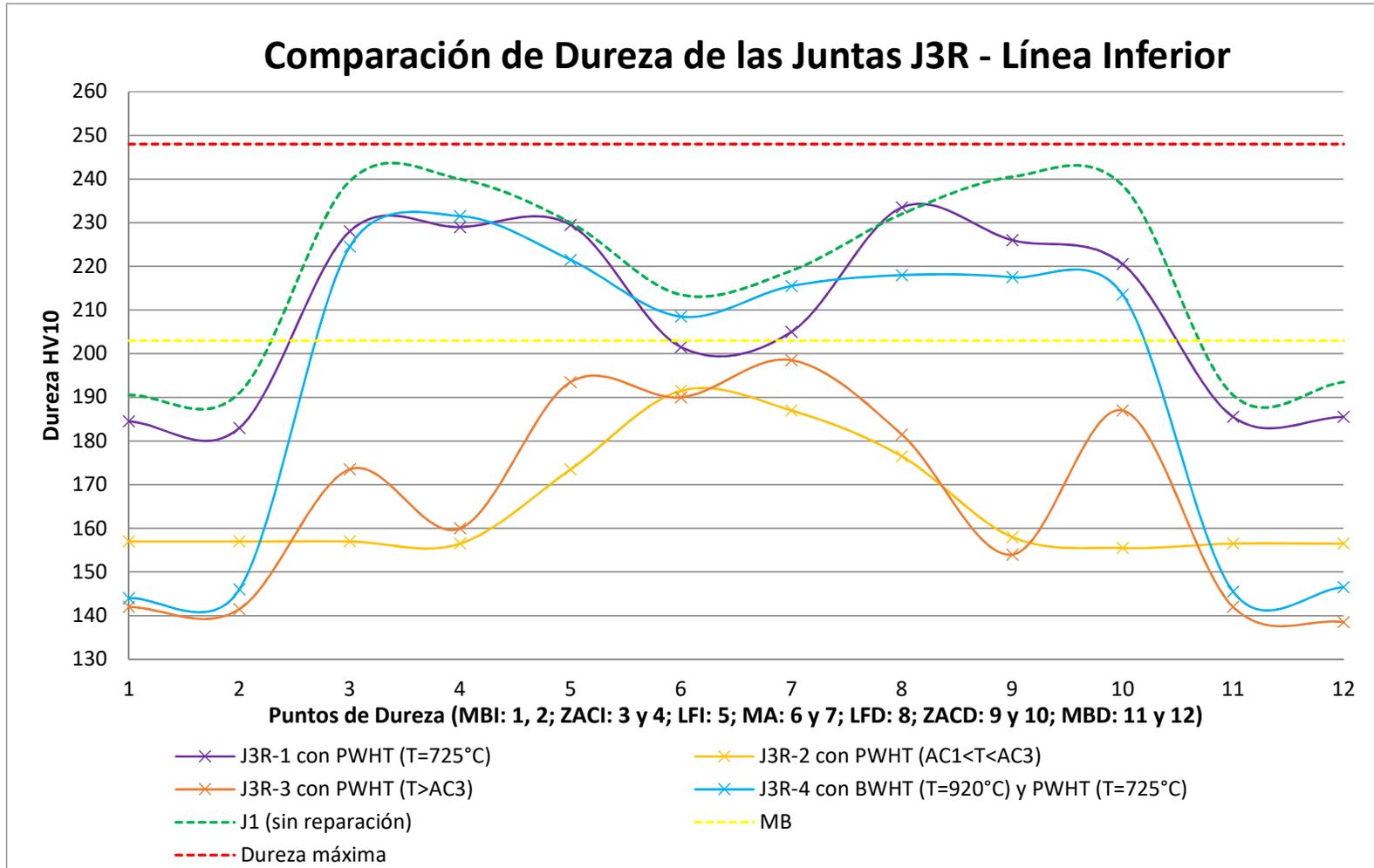


Figura 3.8. Comparación de los perfiles de dureza en la línea inferior (línea paralela a la superficie interna de la tubería, a 1.5 mm) de las juntas reparadas J3R con cuatro configuraciones de tratamiento térmico (tabla 3.7)

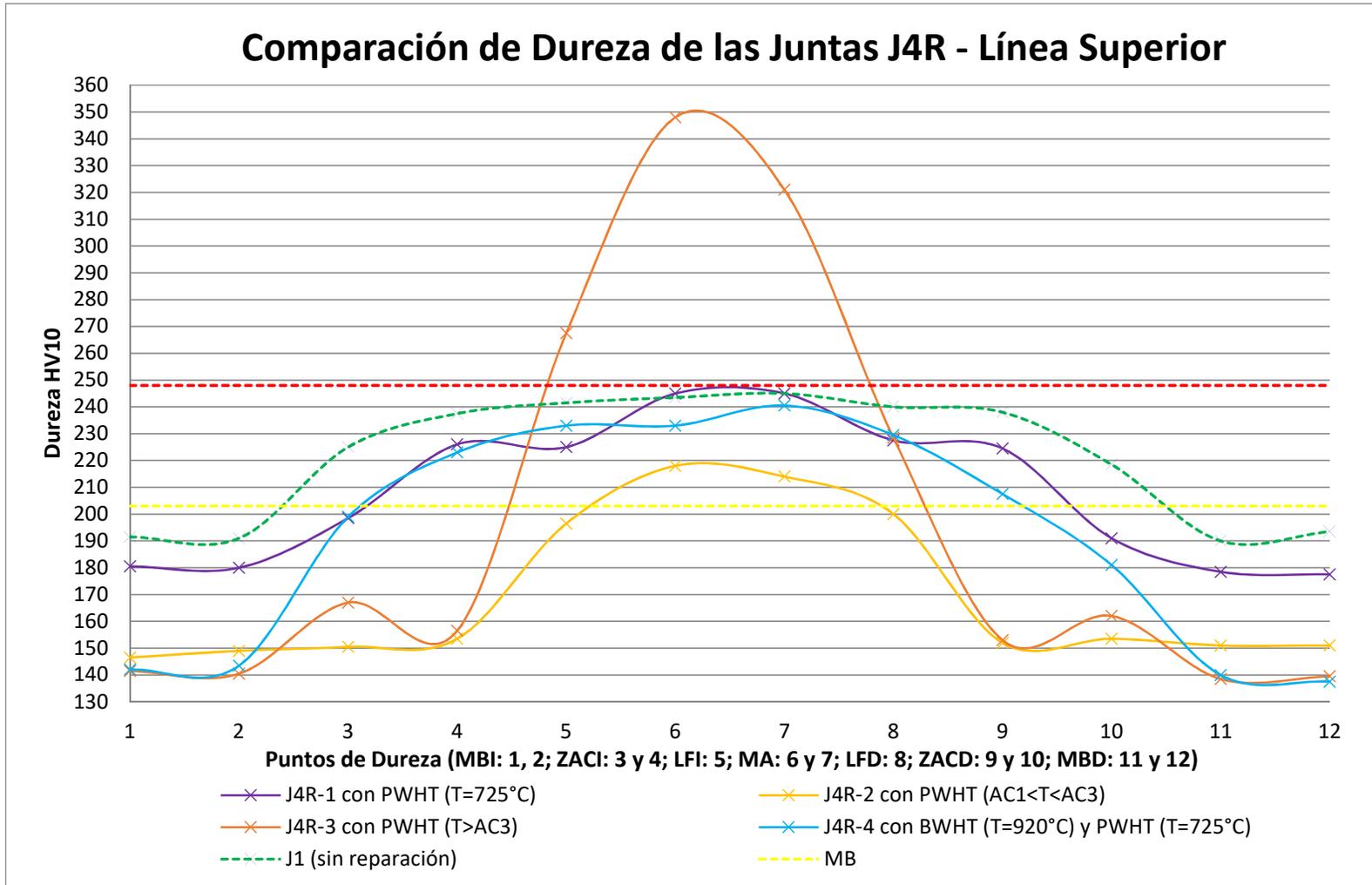


Figura 3.9. Comparación de los perfiles de dureza en la línea superior (línea paralela a la superficie externa de la tubería, a 1.5 mm) de las juntas reparadas J4R con cuatro configuraciones de tratamiento térmico (tabla 3.7)

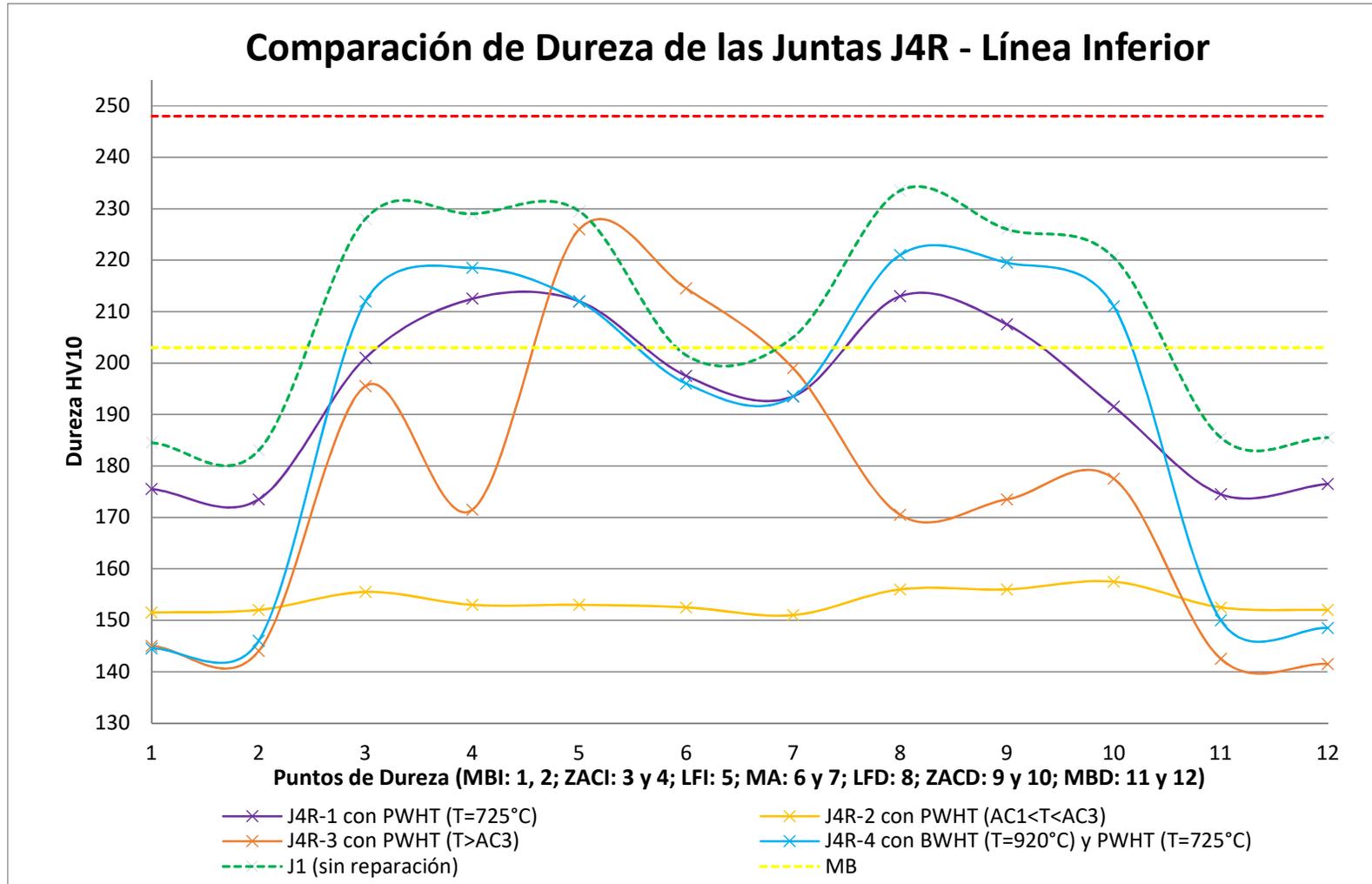


Figura 3.10. Comparación de los perfiles de dureza en la línea superior (línea paralela a la superficie interna de la tubería, a 1.5 mm) de las juntas reparadas J4R con cuatro configuraciones de tratamiento térmico (tabla 3.7)

Los perfiles de dureza en la LS para las configuraciones J3R-1, J3R-2, J3R-4, J4R-1, J4R-2 y J4R-4 (figuras 3.7 y 3.9), presentan un comportamiento típico; los valores de dureza se incrementan desde el MB, pasando por la ZAC, hasta alcanzar sus máximos valores en el MA. Los perfiles de dureza en la LI para las configuraciones J3R-1, J3R-4, J4R-1 y J4R-4 (figuras 3.8 y 3.10), presentan un comportamiento típico diferente; los valores se van incrementando desde el MB, hasta alcanzar sus máximos valores en la ZAC y/o LF, después disminuyen en el camino de LF hacia el MA.

### **3.3.1.1 Comparación de Valores de Dureza de las Juntas J3R-1 y J3R-4 con Respecto a la Junta J1**

Las juntas con configuración J3R-1 y J3R-4 presentan valores de dureza promedio en la LS cercanos entre sí y cercanos a la junta J1 (junta sin reparar), la cercanía se da en las áreas de la ZAC (-4% y -5% respectivamente) y MA (-0.4% y -0.2% respectivamente), tal como se muestra en la figura 3.7 y tabla 3.8. Además, los valores de dureza en el MB de la junta J3R-1 comparado con la junta J1, son cercanos entre sí (-2%), y estos valores son levemente menores que en el MB de suministro (sin soldar); los valores de dureza en el MB para la junta J3R-4 comparado con la junta J1, son distantes entre sí (-24%), y estos valores son considerablemente menores que la dureza en el MB de suministro (-28%).

Las juntas con configuración J3R-1 y J3R-4 presentan valores de dureza promedio en la LI cercanos entre sí y cercanos a la junta J1 (junta sin reparar), la cercanía se da en las áreas de la ZAC (-4% y -8% respectivamente) y MA (-6% y -2% respectivamente), tal como se muestra en la figura 3.8 y tabla 3.8. Además, los valores de dureza en el MB de la junta J3R-1 comparado con la junta J1, son cercanos entre sí (-4%), y estos valores son levemente menores que en el MB de suministro; y los valores de dureza en el MB para la junta J3R-4 comparado con la junta J1, son distantes entre sí (-24%), y estos valores son considerablemente menores que la dureza en el MB (-29%).

Se aprecia que las dos configuraciones de tratamiento térmico, J3R-1 y J3R-4, aplicado a las juntas con tres reparaciones, se obtienen valores de dureza menores al valor máximo permitido de dureza (248 HV, subcapítulo 1.4.6.1); sin embargo, en la configuración J3R-4 se requiere mayores recursos y tiempo para el tratamiento térmico, ya que requiere un tratamiento térmico antes y después de la soldadura a comparación de la configuración J3R-1 que solo lleva un tratamiento térmico después de la soldadura.

### **3.3.1.2 Comparación de Valores de Dureza de las Juntas J3R-2 y J3R-3 con Respecto a la Junta J1**

Las juntas con configuración J3R-2 y J3R-3 presentan valores de dureza promedio en la LS considerablemente menores a la junta J1, en las áreas del MB (-22% y -24% respectivamente) y ZAC (-33% y -29% respectivamente), tal como se muestra en la figura 3.7 y tabla 3.8. Además, los valores de dureza en el MA de la junta J3R-2 comparado con la junta J1, son medianamente menores (-16%); y los valores de dureza en el MA de la junta J3R-3 comparado con la junta J1 presentan valores distorsionados (valores menores y mayores a la curva de dureza en la zona del MA de la junta J1).

Las juntas con configuración J3R-2 y J3R-3 presentan valores de dureza promedio en la LI menores a la junta J1; considerablemente menores en las áreas del MB (-18% y -26% respectivamente) y ZAC (-34% y -37% respectivamente); y levemente menores en el área del MA (-12% y -10%), tal como se muestra en la figura 3.8 y tabla 3.8.

Se aprecia que el tratamiento térmico con configuración J3R-2, ha ablandado y reducido las tensiones internas de la junta en mención, ya que los valores de dureza están por debajo en todas las áreas indentadas (MB, ZAC y MA) con respecto a la junta J1; cabe mencionar que la configuración J3R-2 se realizó con un parámetro “P” mayor que la junta J1, 21.79 y 20.26 respectivamente.

Se aprecia que el tratamiento térmico con configuración J3R-3, ha generado valores de dureza mayores en la zona del MA en comparación con las demás áreas barridas (MB y ZAC), cabe mencionar que este tratamiento térmico se realizó a una temperatura de mantenimiento mayor a la crítica superior (AC3).

### **3.3.1.3 Comparación de Valores de Dureza de las Juntas J4R-1 y J4R-4 con Respecto a la Junta J1**

Las juntas con configuración J4R-1 y J4R-4 presentan valores de dureza promedio en la LS cercanos entre sí y cercanos a la junta J1 (junta sin reparar), la cercanía se da en las áreas de la ZAC (-10% y -11% respectivamente) y MA (0.4% y -3% respectivamente), tal como se muestra en la figura 3.9 y tabla 3.8. Además, los valores de dureza en el MB de la junta J4R-1 comparado con la junta J1, son cercanos entre sí (-6%), y estos valores son levemente menores que en el MB de suministro; y los valores de dureza en el MB para la junta J4R-4 comparado con la junta J1, son distantes entre sí (-27%), y estos valores son considerablemente menores que la dureza en el MB de suministro (-30%).

Las juntas con configuración J4R-1 y J4R-4 presentan valores de dureza promedio en la LI medianamente cercanos entre sí y cercanos a la junta J1 (junta sin reparar), la cercanía se da en las áreas de la ZAC (-18% y -11% respectivamente) y MA (-10% y -10% respectivamente), tal como se muestra en la figura 3.10 y tabla 3.8. Además, los valores de dureza en el MB de la junta J4R-1 comparado con la junta J1, son cercanos entre sí (-9%), y estos valores son levemente menores que en el MB de suministro (sin soldar); y los valores de dureza en el MB para la junta J4R-4 comparado con la junta J1, son distantes entre sí (-23%), y estos valores son considerablemente menores que la dureza en el MB (-28%).

Se aprecia que las dos configuraciones de tratamiento térmico, J4R-1 y J4R-4, aplicado a las juntas con cuatro reparaciones, se obtienen valores de dureza menores al valor máximo permitido de dureza (248 HV, subcapítulo 1.4.6.1); sin embargo, en la configuración J4R-4 se requiere mayores recursos y tiempo para el tratamiento térmico, ya que requiere un

tratamiento térmico antes y después de la soldadura a comparación de la configuración J4R-1 que solo lleva un tratamiento térmico después de la soldadura.

#### **3.3.1.4 Comparación de Valores de Dureza de las Juntas J4R-2 y J4R-3 con Respecto a la Junta J1**

Las juntas con configuración J4R-2 y J4R-3 presentan valores de dureza promedio en la LS considerablemente menores a la junta J1, en las áreas del MB (-22% y -27% respectivamente) y ZAC (-34% y -30% respectivamente), tal como se muestra en la figura 3.9 y tabla 3.8. Además, los valores de dureza en el MA de la junta J4R-2 comparado con la junta J1, son medianamente menores (-12%); sin embargo, los valores de dureza en el MA y la LF de la junta J4R-3 comparado con la junta J1 presentan valores considerablemente mayores (+37% en el MA).

Las juntas con configuración J4R-2 y J4R-3 presentan valores de dureza promedio en la LI menores a la junta J1; considerablemente menores en las áreas del MB (-21% y -25% respectivamente) y ZAC (-35% y -23% respectivamente), tal como se muestra en la figura 3.10 y tabla 3.8. Además, los valores de dureza en el MA de la junta J4R-2 son considerablemente menores que en la junta J1 (-30%); y los valores de dureza en el MA de la junta J4R-3 son levemente menores que en la junta J1 (-4%).

Se aprecia que el tratamiento térmico con configuración J4R-2, ha ablandado y reducido las tensiones internas de la junta en mención, ya que los valores de dureza están por debajo en todas las áreas indentadas (MB, ZAC y MA) con respecto a la junta J1; cabe mencionar que la configuración J4R-2 se realizó con un parámetro “P” mayor que la junta J1, 21.79 y 20.26 respectivamente.

Se aprecia que el tratamiento térmico con configuración J4R-3, ha generado valores de dureza excesivamente mayores al valor máximo permitido de dureza (248 HV, subcapítulo

1.4.6.1) en la zona del MA; cabe mencionar que este tratamiento térmico se realizó a una temperatura de mantenimiento mayor a la crítica superior (AC3).

### 3.3.2 Ensayo de Impacto Charpy V a -29°C

Los valores obtenidos de la energía absorbida a la temperatura de -29°C con los ejes de la muesca localizados en la ZAC y MA, correspondiente a las probetas de las cuatro configuraciones (condiciones) de tratamiento térmico de las juntas J3R-x y J4R-x (juntas identificadas en la tabla 3.7), son mostrados en la tabla 3.9, en esta tabla también se incluye los valores de resistencia al impacto de las probetas de la junta “J1”. La energía absorbida mínima requerida para un espécimen y el promedio de tres especímenes son 14J y 18J respectivamente (tabla 1.9 de la presente tesis).

Tabla 3.9. Energía Absorbida de Impacto (a -29°C) de las Probetas de las Juntas J3R-x y J4R-x

Configuración - Eje de la Muesca	Código – Espécimen (muestra)	Valor 1 (J)	Valor 2 (J)	Valor 3 (J)	Valor promedio (J)
J1 - ZAC	1 - J1 con PWHT (725°C)	188	178	185	184
J1 - MA	1 - J1 con PWHT (725°C)	64	66	68	66
J3R-1 - ZAC	4 - J3R con PWHT (725°C)	144	182	169	165
J3R-1 - MA	4 - J3R con PWHT (725°C)	60	70	55	62
J3R-2 - ZAC	6 - J3R con PWHT (800°C)	142	156	150	149
J3R-2 - MA	6 - J3R con PWHT (800°C)	42	48	45	45
J3R-3 - ZAC	7 - J3R con PWHT (950°C)	4	9	7	7
J3R-3 - MA	7 - J3R con PWHT (950°C)	25	32	20	26
J3R-4 - ZAC	10 - J3R con BWHT (950°C) y PWHT (725°C)	248	238	240	242
J3R-4 - MA	10 - J3R con BWHT (950°C) y PWHT (725°C)	95	80	100	92
J4R-1 - ZAC	5 - J4R con PWHT (725°C)	178	158	180	172
J4R-1 - MA	5 - J4R con PWHT (725°C)	64	48	70	61
J4R-2 - ZAC	8 - J4R con PWHT (800°C)	187	170	160	172
J4R-2 - MA	8 - J4R con PWHT (800°C)	48	40	38	42
J4R-3 - ZAC	9 - J4R con PWHT (950°C)	6	10	8	8
J4R-3 - MA	9 - J4R con PWHT (950°C)	28	20	22	23
J4R-4 - ZAC	11 - J4R con BWHT (950°C) y PWHT (725°C)	168	238	194	200
J4R-4 - MA	11 - J4R con BWHT (950°C) y PWHT (725°C)	72	70	88	77

El cálculo de la resistencia al impacto de las cuatro configuraciones de tratamiento térmico de las juntas J3R-x y J4R-x, incluyendo el porcentaje de variación con respecto a la junta “J1”, son mostrados en la tabla 3.10. Las figuras 3.11 (juntas J3R-x) y 3.12 (juntas J4R-x) muestran el comparativo de los valores de resistencia al impacto calculado promedio con respecto de la junta “J1”.

Tabla 3.10. Variación de la Resistencia al Impacto Promedio (a -29°C) de las Juntas J3R y J4R

<b>Configuración - Eje de la Muesca</b>	<b>Código de Prueba – Junta con Tratamiento Térmico</b>	<b>Resistencia al Impacto (J/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>% Variación respecto a la Junta J1 (ZAC/MA)</b>	<b>Parámetro “P”</b>
<b>J1 - ZAC</b>	1 - J1 con PWHT (725°C)	307	0%	20.26
<b>J1 - MA</b>	1 - J1 con PWHT (725°C)	110	0%	20.26
<b>J3R-1 - ZAC</b>	4 - J3R con PWHT (725°C)	275	-10%	20.26
<b>J3R-1 - MA</b>	4 - J3R con PWHT (725°C)	103	-6%	20.26
<b>J3R-2 - ZAC</b>	6 - J3R con PWHT (800°C)	248	-19%	21.79
<b>J3R-2 - MA</b>	6 - J3R con PWHT (800°C)	75	-32%	21.79
<b>J3R-3 - ZAC</b>	7 - J3R con PWHT (950°C)	12	-96%	No aplica
<b>J3R-3 - MA</b>	7 - J3R con PWHT (950°C)	43	-61%	No aplica
<b>J3R-4 - ZAC</b>	10 - J3R con BWHT (950°C) y PWHT (725°C)	403	32%	No aplica
<b>J3R-4 - MA</b>	10 - J3R con BWHT (950°C) y PWHT (725°C)	153	39%	No aplica
<b>J4R-1 - ZAC</b>	5 - J4R con PWHT (725°C)	287	-7%	20.26
<b>J4R-1 - MA</b>	5 - J4R con PWHT (725°C)	102	-8%	20.26
<b>J4R-2 - ZAC</b>	8 - J4R con PWHT (800°C)	287	-7%	21.79
<b>J4R-2 - MA</b>	8 - J4R con PWHT (800°C)	70	-36%	21.79
<b>J4R-3 - ZAC</b>	9 - J4R con BWHT (950°C)	13	-96%	No aplica
<b>J4R-3 - MA</b>	9 - J4R con BWHT (950°C)	38	-65%	No aplica
<b>J4R-4 - ZAC</b>	11 - J4R con BWHT (950°C) y PWHT (725°C)	333	9%	No aplica
<b>J4R-4 - MA</b>	11 - J4R con BWHT (950°C) y PWHT (725°C)	128	17%	No aplica

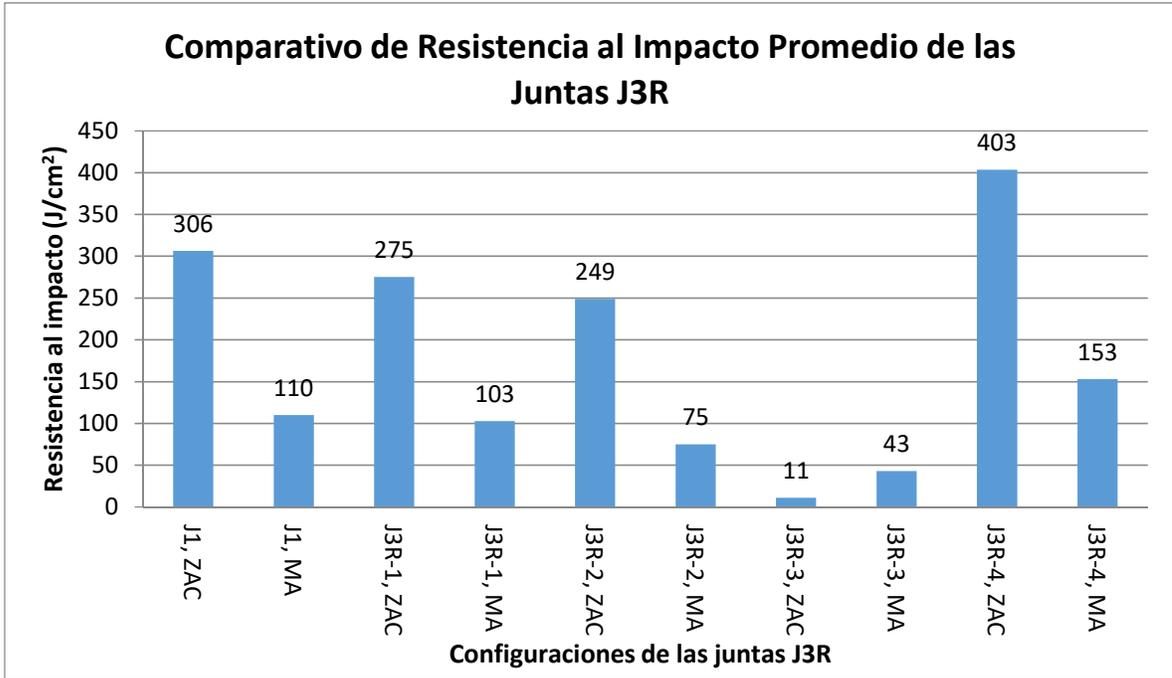


Figura 3.11. Comparativo de la Resistencia al Impacto (a  $-29^{\circ}\text{C}$ ) en la ZAC de las juntas J3R

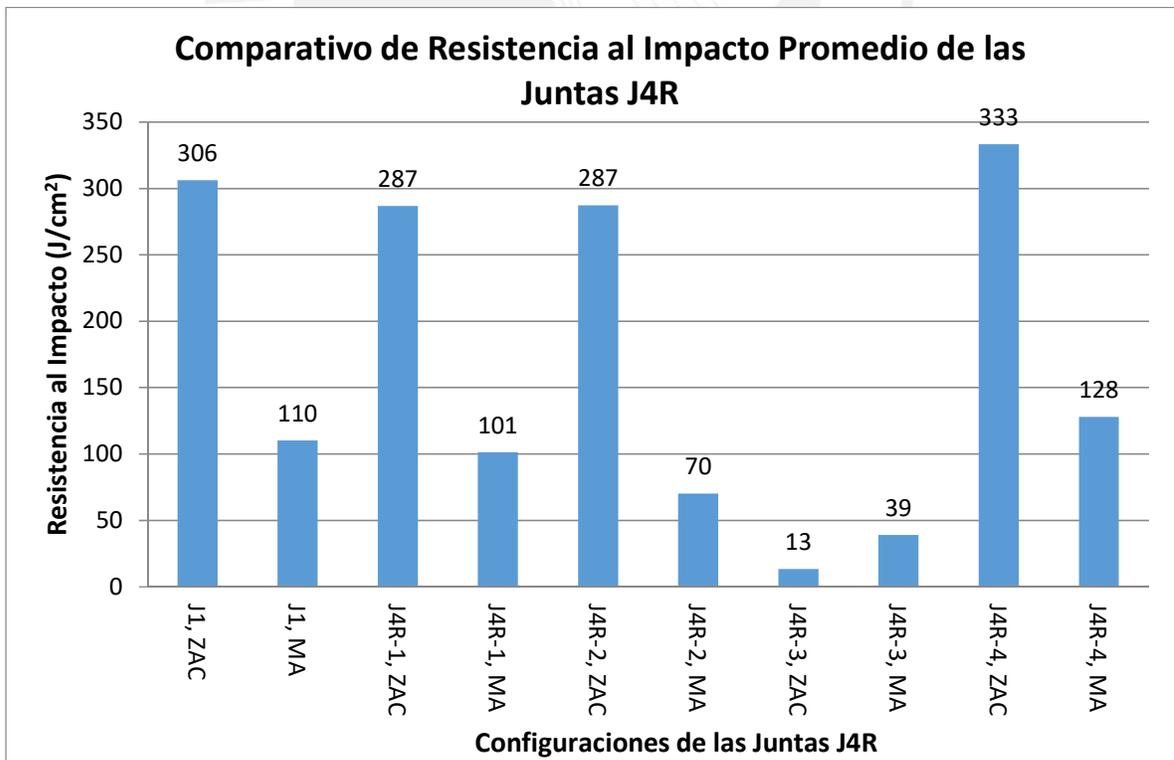


Figura 3.12. Comparativo de la Resistencia al Impacto (a  $-29^{\circ}\text{C}$ ) en la ZAC de las juntas J4R

### **3.3.2.1 Comparación de la Energía Absorbida de las Juntas J3R-1 y J3R-4 con Respecto a la Junta J1**

Los valores de resistencia al impacto de la junta J3R-1 con los ejes de la muesca en la ZAC y MA, son ligeramente menores que la junta J1, ver figura 3.11 y tabla 3.10.

Los valores de resistencia al impacto de la junta J3R-4 con el eje de la muesca en la ZAC y MA, son considerablemente mayores que la junta J1, ver figura 3.11 y tabla 3.10.

Se aprecia que las dos configuraciones de tratamiento térmico, J3R-1 y J3R-4, aplicado a las juntas con tres reparaciones, se obtienen valores de energía absorbida mayores a la mínima energía absorbida (14J – para un espécimen y 18J – para el promedio, tabla 1.9); sin embargo, en la configuración J3R-4 se requiere mayores recursos y tiempo para el tratamiento térmico, ya que requiere un tratamiento térmico antes y después de la soldadura en comparación con la configuración J3R-1 que solo lleva un tratamiento térmico después de la soldadura.

### **3.3.2.2 Comparación de la Energía Absorbida de las Juntas J3R-2 y J3R-3 con Respecto a la Junta J1**

Los valores de resistencia al impacto de la junta J3R-2 con los ejes de la muesca en la ZAC y MA, son medianamente menores que la junta J1, ver figura 3.11 y tabla 3.10. No obstante, los valores de energía absorbida de la junta J3R-2 (tabla 3.9), cumplen con los requerimientos de la mínima energía absorbida (14J – para un espécimen y 18J – para el promedio, tabla 1.9).

Los valores de la resistencia al impacto de la junta J3R-3 con los ejes de la muesca en la ZAC y MA, son bastante menores que la junta J1, ver figura 3.11 y tabla 3.10. Además, los valores de energía absorbida de la junta J3R-3 (tabla 3.9), no cumplen con los requerimientos de la mínima energía absorbida (14J – para un espécimen y 18J – para el promedio, tabla 1.9) en la ZAC.

Se aprecia que el tratamiento térmico de la configuración J3R-2, se obtienen valores de energía absorbida mayores a la mínima energía absorbida (14J – para un espécimen y 18J – para el promedio, tabla 1.9); cabe mencionar que la configuración J3R-2 se realizó con un parámetro “P” mayor que la junta J1, 21.79 y 20.26 respectivamente.

Se aprecia que el tratamiento térmico de la configuración J3R-3, se obtienen valores de energía absorbida en la ZAC, que no cumplen con los requerimientos de la mínima energía absorbida; cabe mencionar que este tratamiento térmico se realizó a una temperatura de mantenimiento mayor a la crítica superior (AC3).

### **3.3.2.3 Comparación de la Energía Absorbida de las Juntas J4R-1 y J4R-4 con Respecto a la Junta J1**

Los valores de resistencia al impacto de la junta J4R-1 con los ejes de la muesca en la ZAC y MA, son ligeramente menores que la junta J1, ver figura 3.12 y tabla 3.10.

Los valores de resistencia al impacto de la junta J4R-4 con los ejes de la muesca en la ZAC y MA, son considerablemente mayores que la junta J1, ver figura 3.12 y tabla 3.10.

Se aprecia que las dos configuraciones de tratamiento térmico, J4R-1 y J4R-4, aplicado a las juntas con cuatro reparaciones, se obtienen valores de energía absorbida mayores a la mínima energía absorbida (14J – para un espécimen y 18J – para el promedio, tabla 1.9); sin embargo, en la configuración J4R-4 se requiere mayores recursos y tiempo para el tratamiento térmico, ya que requiere un tratamiento térmico antes y después de la soldadura en comparación con la configuración J4R-1 que solo lleva un tratamiento térmico después de la soldadura.

### **3.3.2.4 Comparación de la Energía Absorbida de las Juntas J4R-2 y J4R-3 con Respecto a la Junta J1**

Los valores de resistencia al impacto de la junta J4R-2 con los ejes de la muesca en la ZAC y MA, son medianamente menores que la junta J1, ver figura 3.12 y tabla 3.10. No obstante, los valores de energía absorbida de la junta J4R-2 (tabla 3.9), cumplen con los requerimientos de la mínima energía absorbida (14J – para un espécimen y 18J – para el promedio, tabla 1.9).

Los valores de la resistencia al impacto de la junta J4R-3 con los ejes de la muesca en la ZAC y MA, son bastante menores que la junta J1, ver figura 3.12 y tabla 3.10. Además, los valores de energía absorbida de la junta J4R-3 (tabla 3.9), no cumplen con los requerimientos de la mínima energía absorbida (14J – para un espécimen y 18J – para el promedio, tabla 1.9) en la ZAC.

Se aprecia que el tratamiento térmico de la configuración J4R-2, se obtienen valores de energía absorbida mayores a la mínima energía absorbida (14J – para un espécimen y 18J – para el promedio, tabla 1.9); cabe mencionar que la configuración J4R-2 se realizó con un parámetro “P” mayor que la junta J1, 21.79 y 20.26 respectivamente.

Se aprecia que el tratamiento térmico de la configuración J4R-3, se obtienen valores de energía absorbida en la ZAC, que no cumplen con los requerimientos de la mínima energía absorbida.

### **3.3.3 Análisis Metalográfico**

Las microestructuras obtenidas de las cuatro configuraciones (condiciones) del tratamiento térmico de las juntas J3R-x y J4R-x (juntas identificadas en la tabla 3.7) son mostrados en las figuras 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 para las juntas J3R-1, J3R-2, J3R-3 y J3R-4 respectivamente, y en las figuras 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20 para las juntas J4R-1, J4R-2, J4R-3 y J4R-4 respectivamente.

### 3.3.3.1 Análisis Metalográfico de las cuatro configuraciones de las juntas J3R

Las microestructuras obtenidas para las cuatro configuraciones de las juntas J3R-x, consiste principalmente en:

- Para la junta J3R-1 en el MA (figura 3.13a); se observa una matriz de granos de ferrita de forma irregular, martensita revenida (la martensita tipo listón observada en la figura 3.2 ya no está presente) y con presencia de carburos de diferente dispersión. La microestructura en la ZAC (figura 3.13b); se observa una matriz de granos de ferrita de forma irregular, con productos de transformación diferentes a la martensita (debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos de diferente dispersión. El tamaño de grano en la ZAC es menor que en el MA.
- Para la junta J3R-2 en el MA (figura 3.14a); se observa una matriz de granos de ferrita delimitados de forma alargada y con presencia de carburos de diferente dispersión. La microestructura en la ZAC (figura 3.14b); se observa una matriz de granos de ferrita, con productos de transformación diferentes a la martensita (debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos de diferente dispersión. El tamaño de grano en la ZAC es menor que en el MA.
- Para la junta J3R-3 en el MA (figuras 3.15c y 3.15d); se observan los constituyentes de ferrita equiaxial y perlita gruesa con presencia de carburos dentro y en los bordes de grano, donde la mayor densidad de carburos está localizada en los bordes de grano. La microestructura en la ZAC (figuras 3.15e y 3.15f), se observa una matriz de granos de ferrita equiaxial y perlita con abundantes carburos coagulados en los bordes de grano, donde se aprecia que hay mayor cantidad de carburos en los bordes de grano comparado con la cantidad presente en los bordes de grano en el MA. El tamaño de grano en la ZAC es mayor que en el MA. La microestructura en el MB (figuras 3.15a y 3.15b); se observa ferrita equiaxial con perlita gruesa.
- Para la junta J3R-4 en el MA (figuras 3.16c y 3.16d); se observa una matriz de granos de ferrita de forma irregular con presencia de carburos de diferente dispersión. La microestructura en la ZAC (figuras 3.16e y 3.16f) se observa una matriz de granos de ferrita con límites de grano no bien definidos, con productos de transformación diferentes a la

martensita (debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos de diferente dispersión. El tamaño de grano en la ZAC es menor que en el MA. La microestructura en el MB (figura 3.16a y 3.16b); se observa ferrita equiaxial con perlita gruesa.

Se aprecia que el tratamiento térmico de la configuración J3R-3 en la ZAC, ha generado el mayor tamaño de grano en comparación con las demás configuraciones (J3R-1, J3R-2 y J3R-4), además hay presencia de abundantes carburos coagulados en los bordes de grano. También esta configuración de tratamiento térmico presenta el menor valor de energía absorbido (tabla 3.9) en la ZAC. Además, esta configuración presenta valores de dureza muy cercanos al valor de dureza máximo permitido.

Se aprecia que el tratamiento térmico de las configuraciones J3R-1, J3R-2 y J3R-4, presentan carburos dispersos aleatoriamente tanto dentro y en los bordes de grano, y no están coagulados en los bordes de grano como lo presenta la configuración J3R-3. Además, el tamaño de grano en la ZAC de las configuraciones J3R-1, J3R-2 y J3R-4 son menores en comparación con el tamaño de grano en el MA para cada configuración.

### **3.3.3.2 Análisis Metalográfico de las Cuatro Configuraciones de las Juntas J4R**

Las microestructuras obtenidas para las cuatro configuraciones de las juntas J4R-x, consiste principalmente en:

- Para la junta J4R-1 en el MA (figura 3.17a); se observa una matriz de granos de ferrita de forma irregular, martensita revenida (la martensita tipo listón observada en la figura 3.2 ya no está presente) y con presencia de carburos de diferente dispersión. La microestructura en la ZAC (figura 3.17b); se observa una matriz de granos de ferrita de forma irregular con límites de grano no bien definidos, con productos de transformación diferentes a la martensita (debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos de diferente dispersión. El tamaño de grano en la ZAC es menor que en el MA.

- Para la junta J4R-2 en el MA (figura 3.18a); se observa una matriz de granos de ferrita delimitados de forma alargada y con presencia de carburos de diferente dispersión. La microestructura en la ZAC (figura 3.18b); se observa una matriz de granos de ferrita, con productos de transformación diferentes a la martensita (debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos de diferente dispersión. El tamaño de grano en la ZAC es menor que en el MA.
- Para la junta J4R-3 en el MA (figuras 3.19a y 3.19b); se observan los constituyentes de ferrita equiaxial agrupados irregularmente y perlita gruesa con presencia de carburos dentro y en los bordes de grano, donde la mayor densidad de carburos está localizada en los bordes de grano. La microestructura en la ZAC (figuras 3.19c y 3.19d), se observa una matriz de granos de ferrita equiaxial y perlita con abundantes carburos coagulados en los bordes de grano, donde se aprecia que hay mayor cantidad de carburos en los bordes de grano comparado con la cantidad presente en los bordes de grano en el MA. El tamaño de grano en la ZAC es mayor que en el MA.
- Para la junta J4R-4 en el MA (figura 3.20c); se observa una matriz de granos de ferrita de forma irregular con presencia de carburos de diferente dispersión. La microestructura en la ZAC (figuras 3.20d) se observa una matriz de granos de ferrita con límites de grano no bien definidos, con productos de transformación diferentes a la martensita (debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos de diferente dispersión. El tamaño de grano en la ZAC es menor que en el MA. La microestructura en el MB (figura 3.20a y 3.20b); se observa ferrita equiaxial con perlita gruesa.

Se aprecia que el tratamiento térmico de la configuración J4R-3 en la ZAC, ha generado el mayor tamaño de grano en comparación con las demás configuraciones (J4R-1, J4R-2 y J4R-4), además hay presencia de abundantes carburos coagulados en los bordes de grano. También esta configuración de tratamiento térmico presenta el menor valor de energía absorbido (tabla 3.9) en la ZAC. Además, esta configuración presenta valores de dureza muy elevados (figura 3.9 y tabla 3.8), mayores al valor de dureza máximo permitido.

Se aprecia que el tratamiento térmico de las configuraciones J4R-1, J4R-2 y J4R-4, presentan carburos dispersos aleatoriamente tanto dentro y en los bordes de grano, y no están coagulados en los bordes de grano como lo presenta la configuración J4R-3. Además, el tamaño de grano en la ZAC de las configuraciones J4R-1, J4R-2 y J4R-4 son menores en comparación con el tamaño de grano en el MA para cada configuración.

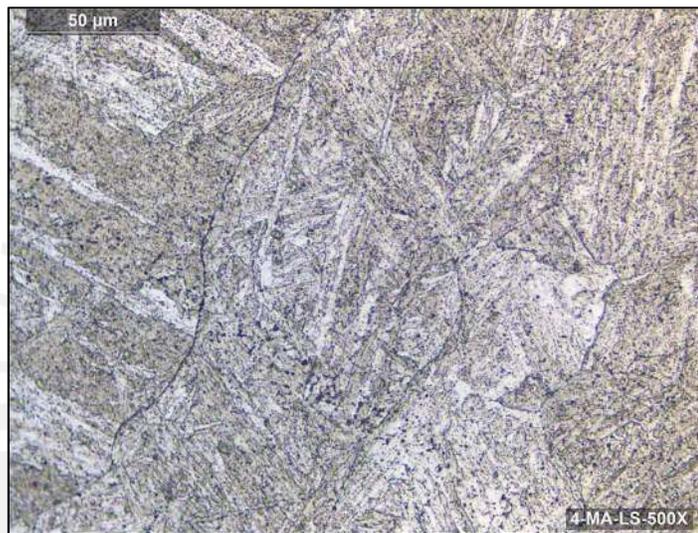


Figura 3.13a

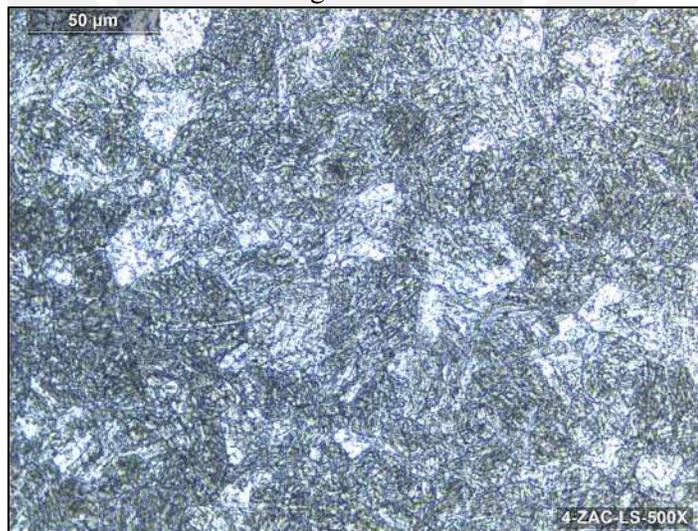


Figura 3.13b

Figura 3.13. Microestructuras de la junta J3R-1 a 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.13a; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.13b

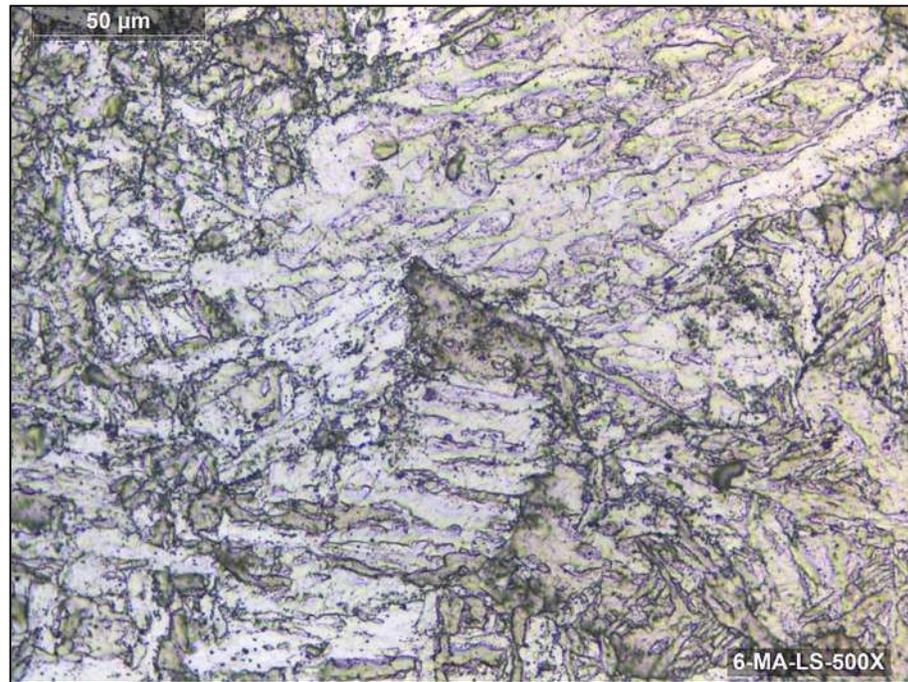


Figura 3.14a

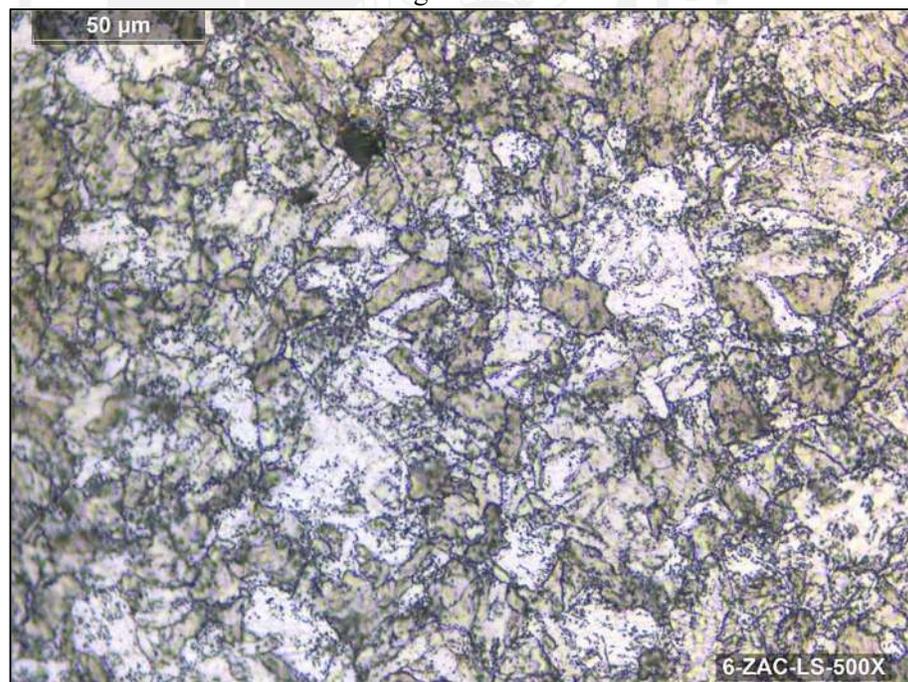


Figura 3.14b

Figura 3.14. Microestructura de la Junta J3R-2 con PWHT (800°C, 2h) a 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.14a; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.14b

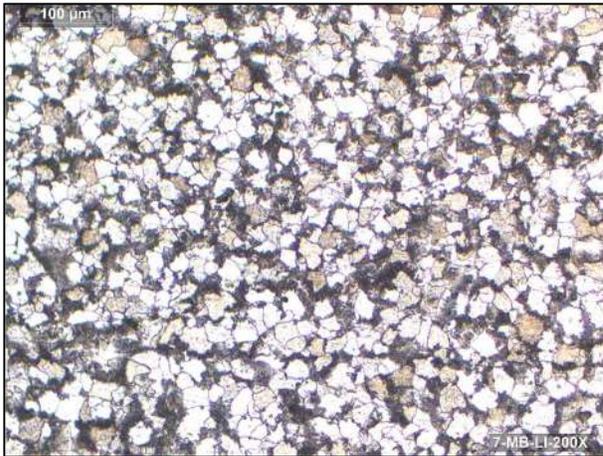


Figura 3.15a

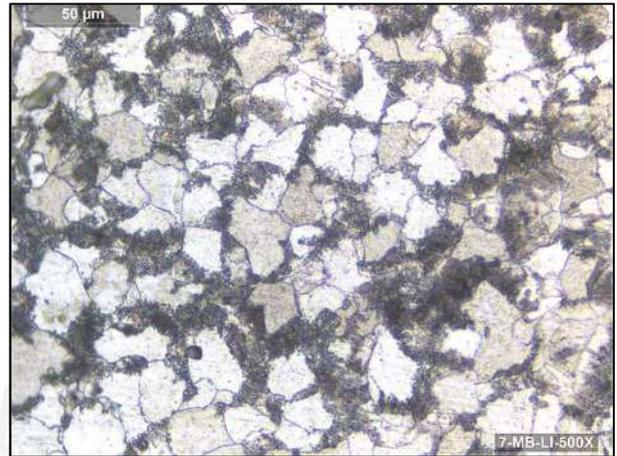


Figura 3.15b

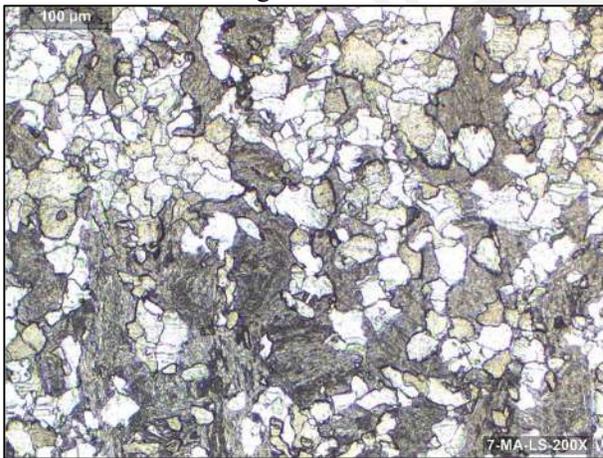


Figura 3.15c

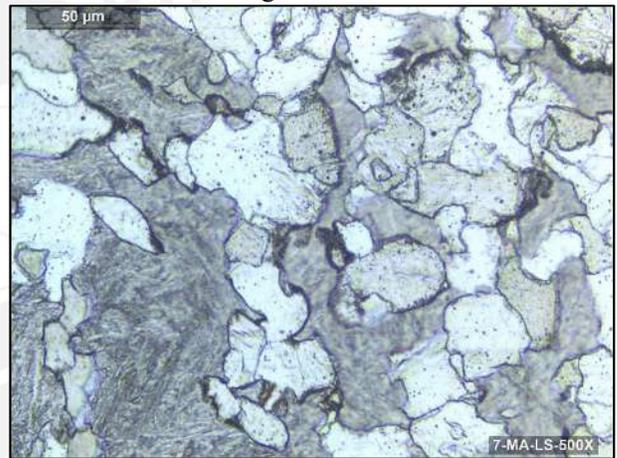


Figura 3.15d

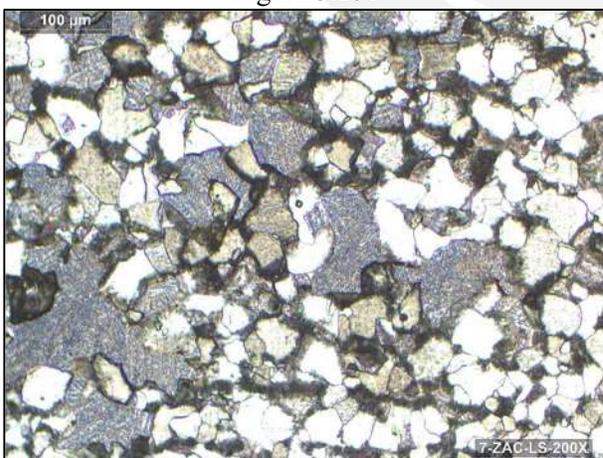


Figura 3.15e

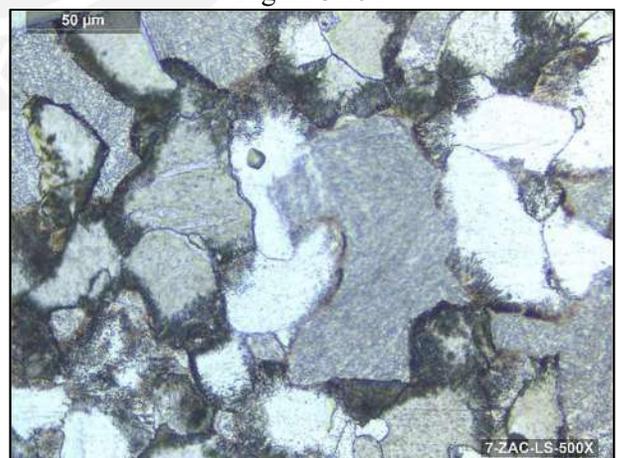


Figura 3.15f

Figura 3.15. Microestructura de la Junta J3R-3 con PWHT (950°C, 2h) a 200X y 500X: Metal Base (MB), figuras 3.15a y 3.15b; Metal de Aporte (MA), figuras 3.15c y 3.15d; y Zona Afectada por el Calor (ZAC), figuras 3.15e y 3.15f

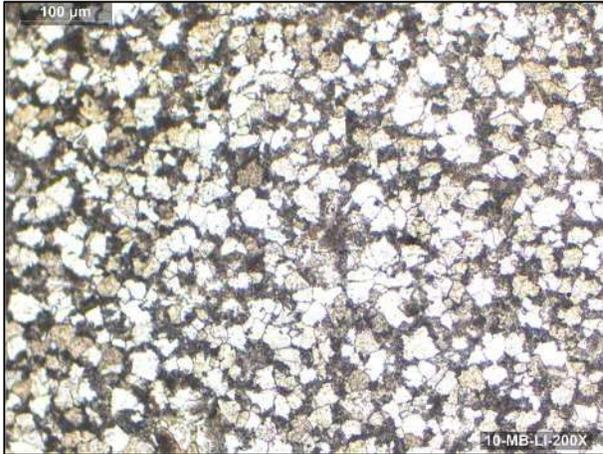


Figura 3.16a

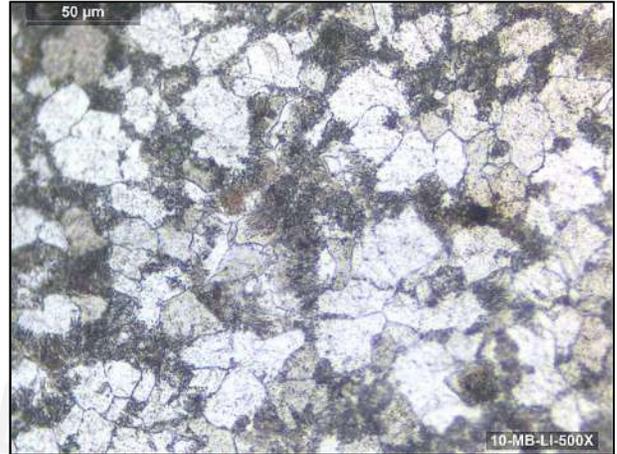


Figura 3.16b



Figura 3.16c

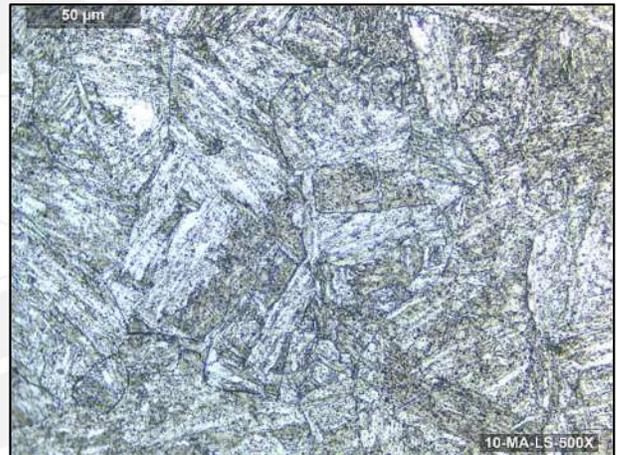


Figura 3.16d

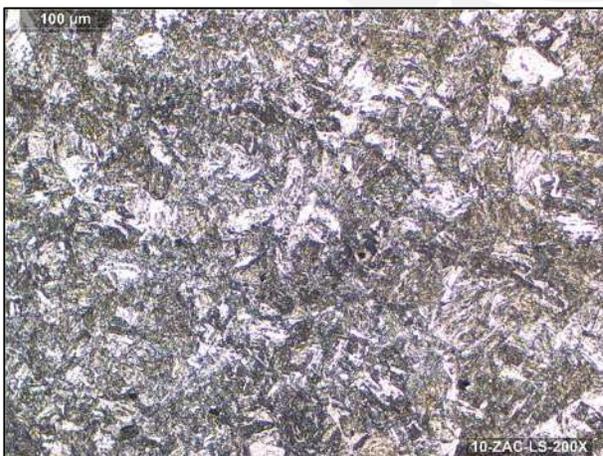


Figura 3.16e

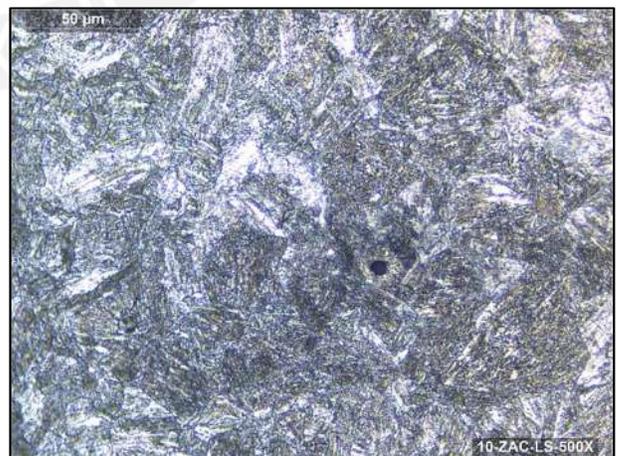


Figura 3.16f

Figura 3.16. Microestructura de la Junta J3R-4 con BWHT (950°C, 2h) y PWHT (725°C, 2h) a 200X y 500X: Metal Base (MB), figuras 3.16a y 3.16b, Metal de Aporte (MA), figura 3.16c y 3.16d; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figuras 3.16e y 3.16f

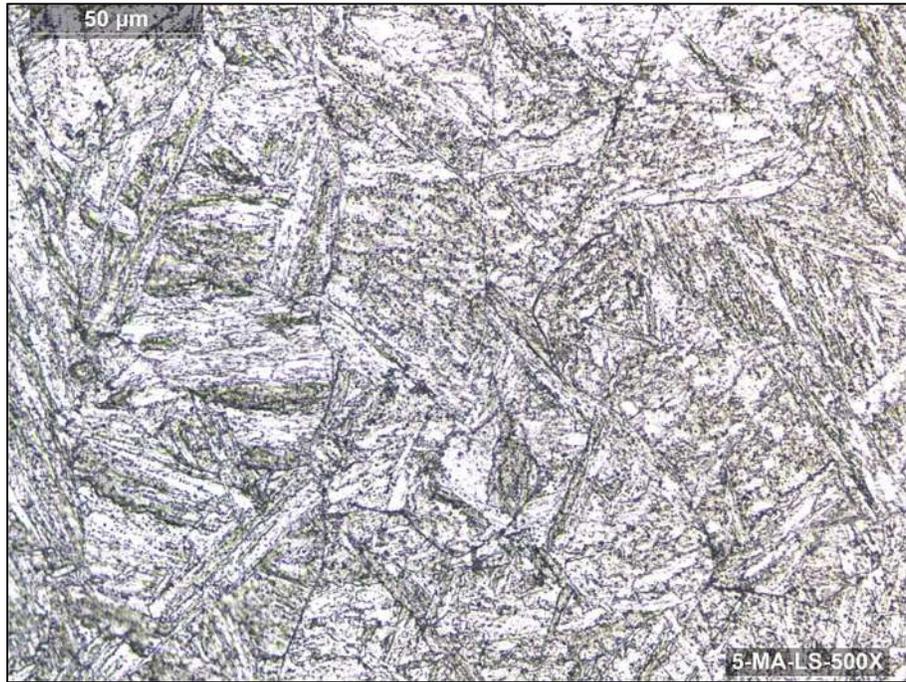


Figura 3.17a

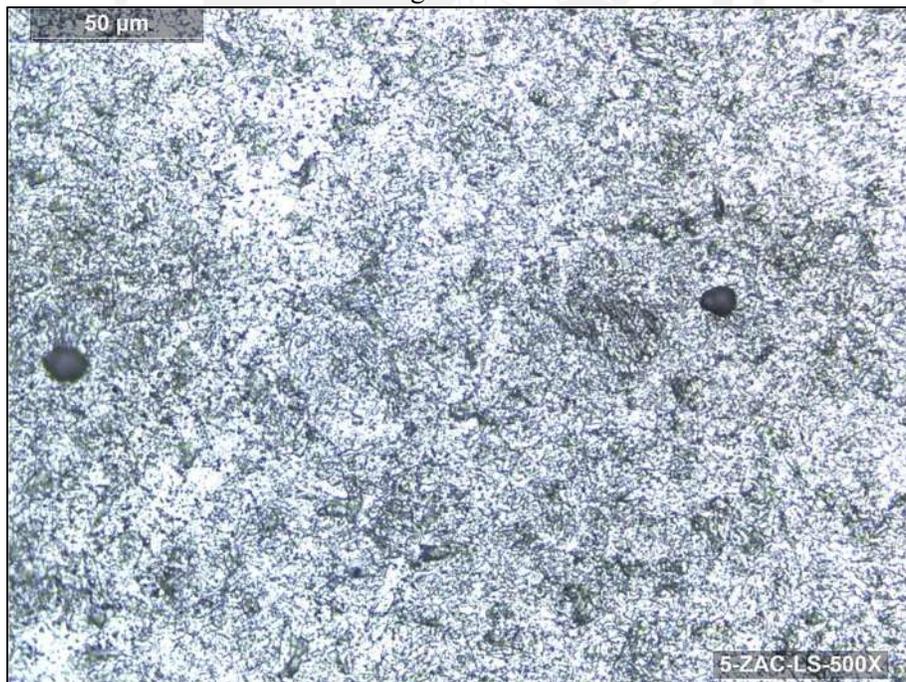


Figura 3.17b

Figura 3.17. Microestructuras de la junta J4R-1 a 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.17a;  
Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.17b

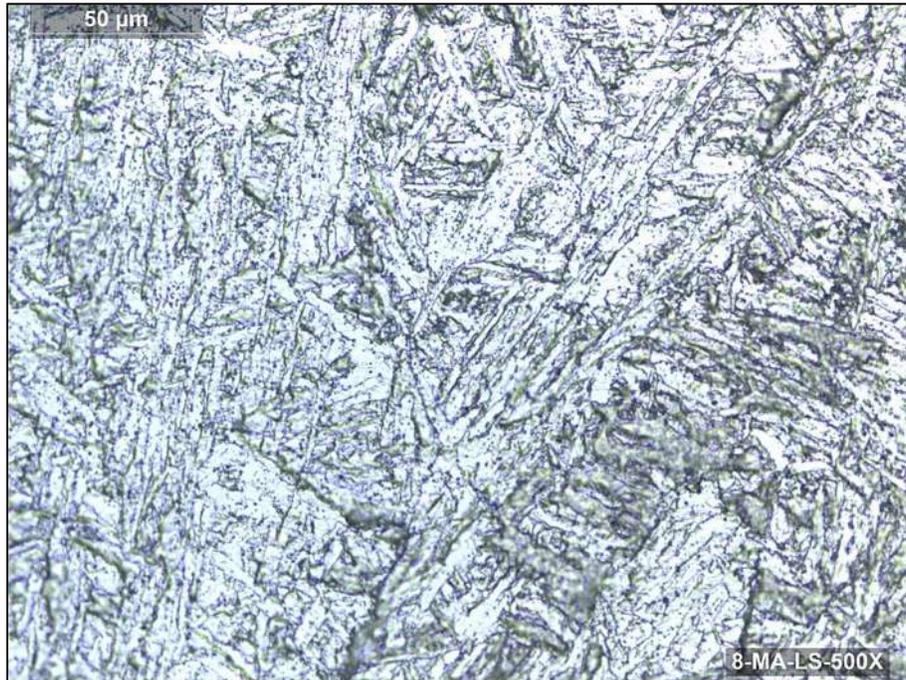


Figura 3.18a

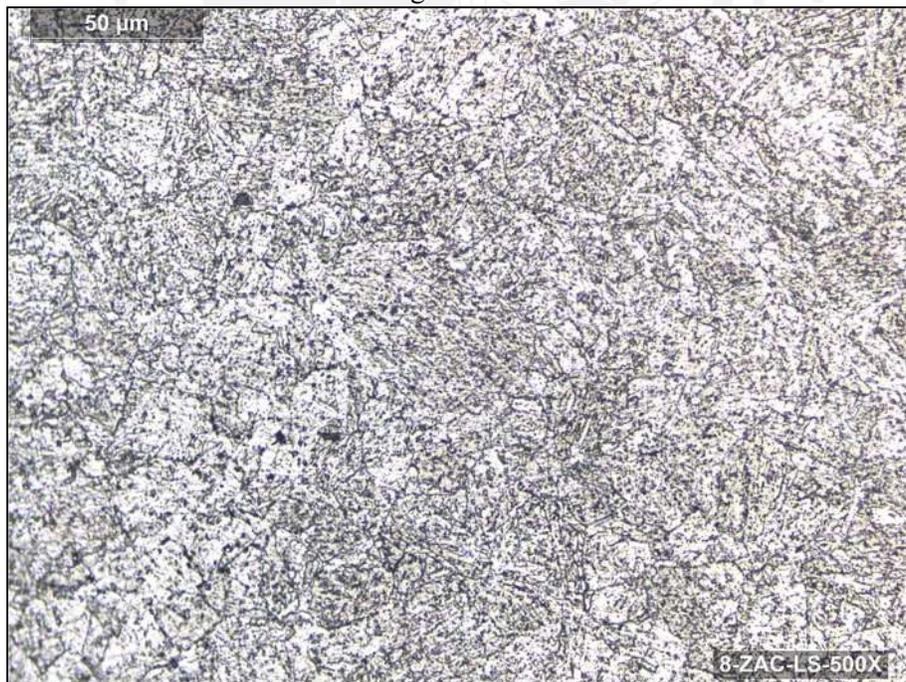


Figura 3.18b

Figura 3.18. Microestructura de la Junta J4R-2 con PWHT (800°C, 2h) a 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.18a; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.18b



Figura 3.19a



Figura 3.19b

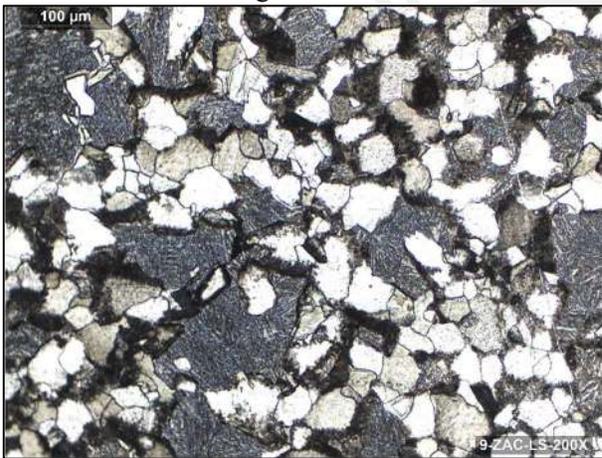


Figura 3.19c

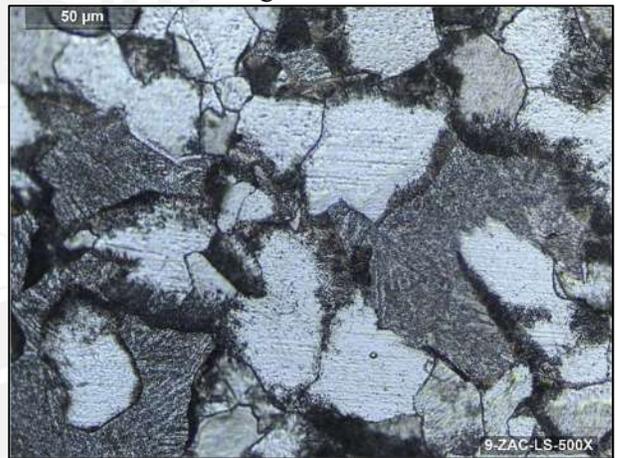


Figura 3.19d

Figura 3.19. Microestructura de la Junta J4R-3 con PWHT (950°C, 2h) a 200X y 500X: Metal de Aporte (MA), figura 3.19a y 3.19b; y Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.19c y 3.19d

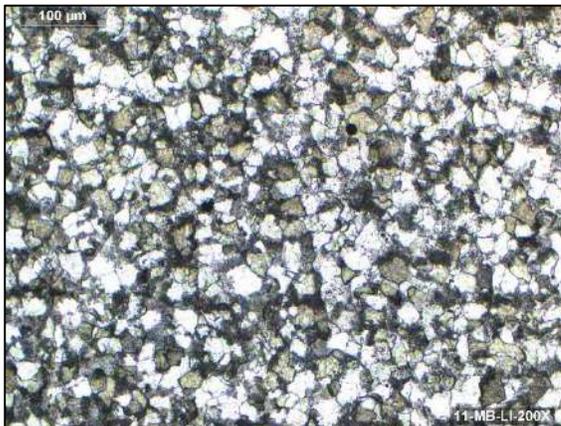


Figura 3.20a

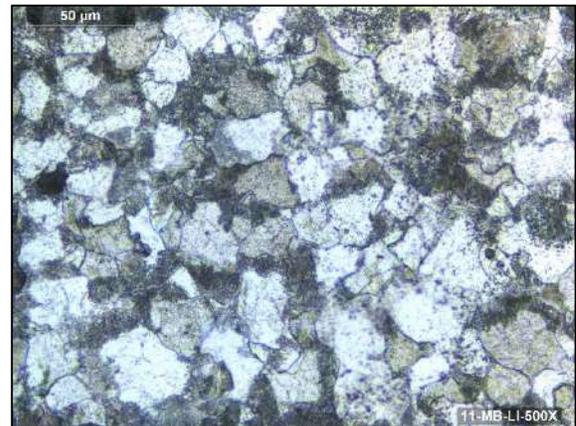


Figura 3.20b

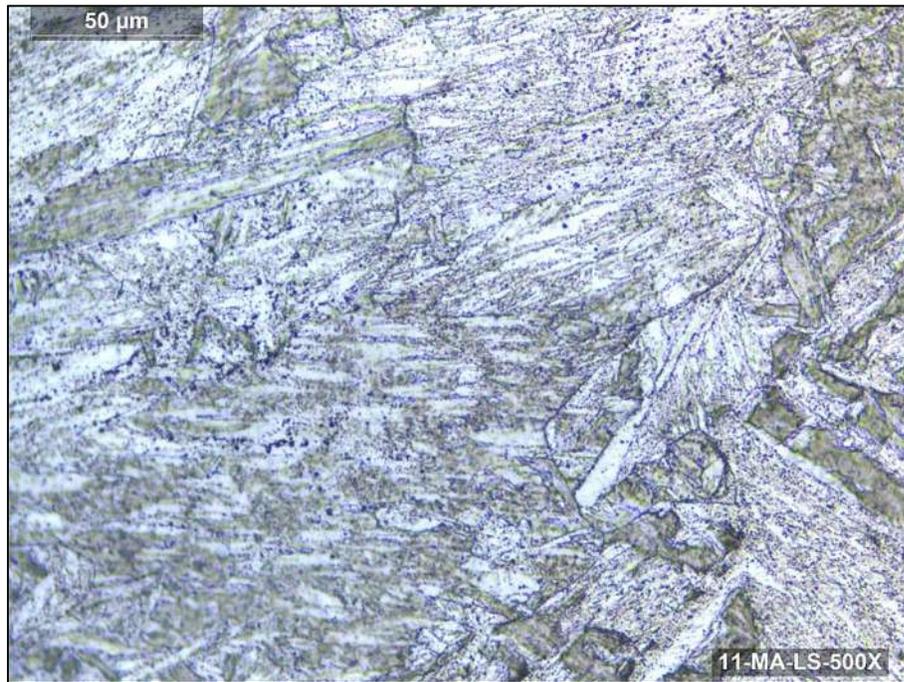


Figura 3.20c

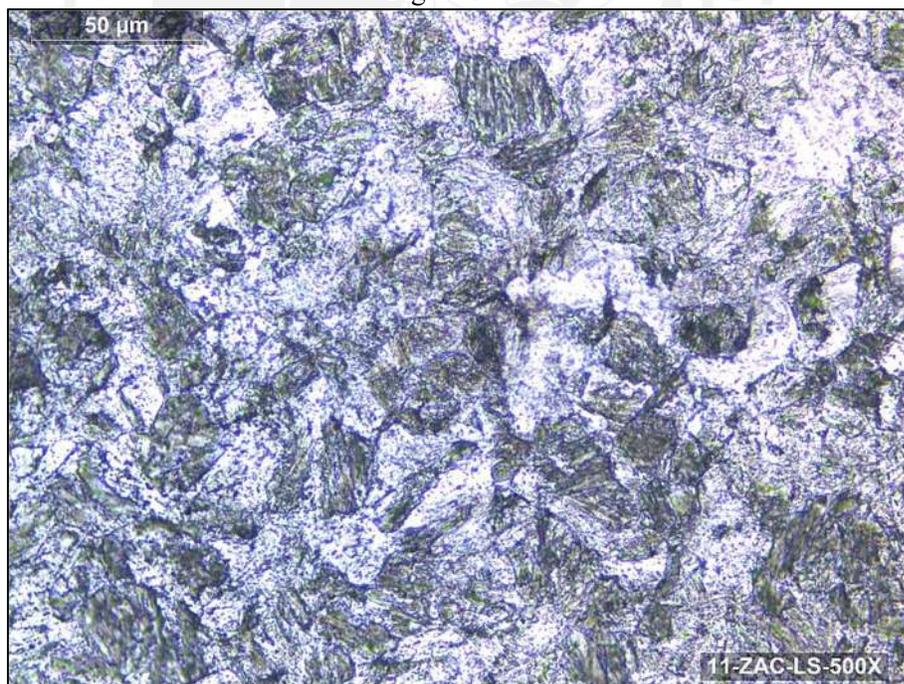


Figura 3.20d

Figura 3.20. Microestructura de la Junta J4R-4 con BWHT (950°C, 2h) y PWHT (725°C) a 500X: Metal Base (MB), figuras 3.20a y 3.20b; Metal de Aporte (MA), figura 3.20c; Zona Afectada por el Calor (ZAC), figura 3.20d

### **3.3.4 Análisis Micrográfico mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)**

#### **3.3.4.1 Determinación de los Kilo-Voltios Óptimo para la Realización de los Análisis de Micrografía Mediante el SEM**

Las dimensiones del volumen de interacción de los electrones (alta energía) con la muestra, depende de la energía del haz incidente y del material de la muestra (a mayor kilo-voltios, mayor volumen de interacción); razón por la cual se realizó el barrido en las muestras a 30 KV y 10 KV dentro y en los bordes de grano en un espécimen (muestra) correspondiente a la junta J4R-4 (código 11 de la tabla 3.7). La localización de los sitios de barrido con sus respectivas graficas de identificación y contabilización de rayos X característicos, son mostrados en las figuras 3.21 (borde de grano en el MA a 30 KV), 3.22 (dentro del grano en el MA a 30 KV) y 3.23 (dentro del grano en el MA a 10 KV).

Los valores obtenidos de composición química mediante EDS a 30 KV en el MA de la junta J4R-4 son presentados en las tablas 3.11 (bordes de grano) y 3.12 (dentro de los granos); de acuerdo a la información de estas tablas, los porcentajes en peso para el Fe y Cr en todos los sitios analizados, presentan valores dentro del rango de 90.19% mín. - 95.47% máx. para el Fe, y 5.66% mín. - 6.17% máx. para el Cr; realizando la comparación de estos valores, con los valores obtenidos del análisis químico del metal base de suministro (93.73% - Fe y 4.56% - Cr y, tabla 3.1), se observa que los valores obtenidos mediante EDS se aproximan a los valores obtenidos en el análisis químico del metal base de suministro.

Los valores obtenidos de composición química mediante EDS a 10 KV para la junta J4R-4 en el MA, son presentados en la tabla 3.13 (dentro de los granos, en los mismos sitios del EDS a 30 KV); de acuerdo a la información de esta tabla, los porcentajes en peso para el Fe (82.29% mín. y 91.52% máx.) y Cr (10.30% mín. y 15.86% máx.), distan de los valores obtenidos en el análisis químico del metal base de suministro (4.56% - Cr y 93.73% - Fe, tabla 3.1).

En base a los resultados obtenidos, al utilizar una aceleración de electrones de 30 KV se obtiene un volumen de interacción mayor que al utilizar una aceleración de electrones de 10 KV, razón por la cual se concluye que a 30 KV el resultado de la composición química obtenido mediante SEM se aproxima al resultado del análisis químico del metal base de suministro, y que a 10 KV el resultado de la composición química mediante SEM proporciona con mayor exactitud el valor de la composición química en el sitio (punto) de análisis. Razón por la cual, todos los barridos de EDS se realizarán a 10KV, con la finalidad de obtener la composición química aproximada de los sitios puntuales, y para determinar de manera cualitativa la cantidad de carburos presentes.

Tabla 3.11. Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS en los bordes de grano (sitios 1 y 2) del MA correspondiente a la junta J4R-4 a 30KV

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SITIO 1</b>	CrK	6.06	6.48	1.84	6.36	6.60	5.95	6.17
	MnL	1.55	1.57	6.54	1.47	1.67	1.45	1.65
	FeK	92.39	91.95	1.20	90.85	93.05	91.28	93.50
<b>SITIO 2</b>	CrK	5.88	6.29	1.84	6.17	6.41	5.77	5.99
	MnL	1.57	1.59	6.51	1.49	1.69	1.47	1.67
	FeK	92.55	92.12	1.18	91.03	93.21	91.46	93.64

Tabla 3.12. Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS dentro de los granos (sitios 1, 2 y 3) del MA correspondiente a la junta J4R-4 a 30KV

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SITIO 1</b>	CrK	5.82	6.22	2.29	6.1	6.36	5.69	5.95
	FeK	94.18	93.78	1.25	92.6	94.95	93.00	95.36
<b>SITIO 2</b>	CrK	5.72	6.12	2.42	6.0	6.27	5.58	5.86
	FeK	94.28	93.88	1.26	92.7	95.06	93.09	95.47
<b>SITIO 3</b>	CrK	5.79	6.2	2.29	6.1	6.34	5.66	5.92
	FeK	91.34	91.08	1.26	89.9	92.23	90.19	92.49
	CoK	2.87	2.71	9.16	2.5	2.96	2.61	3.13

Tabla 3.13. Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS dentro de los granos (sitios 1, 2 y 3) del MA correspondiente a la junta J4R-4 a 10KV

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SITIO 1</b>	FeL	87.17	86.35	4.82	82.19	90.51	82.97	91.37
	CrK	12.83	13.65	17.74	11.23	16.07	10.55	15.11
<b>SITIO 2</b>	FeL	87.31	86.65	4.82	82.47	90.83	83.10	91.52
	CrK	12.69	13.50	18.80	10.96	16.04	10.30	15.08
<b>SITIO 3</b>	FeL	86.58	85.72	4.96	81.47	89.97	82.29	90.87
	CrK	13.42	14.28	18.19	11.68	16.88	10.98	15.86

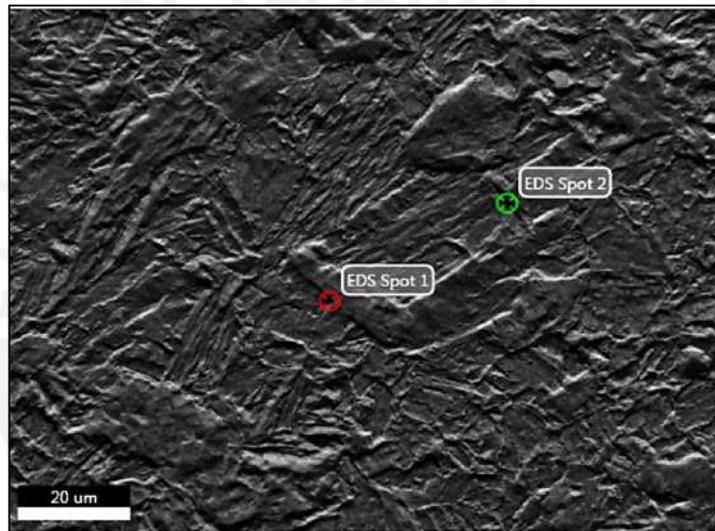


Figura 3.21a

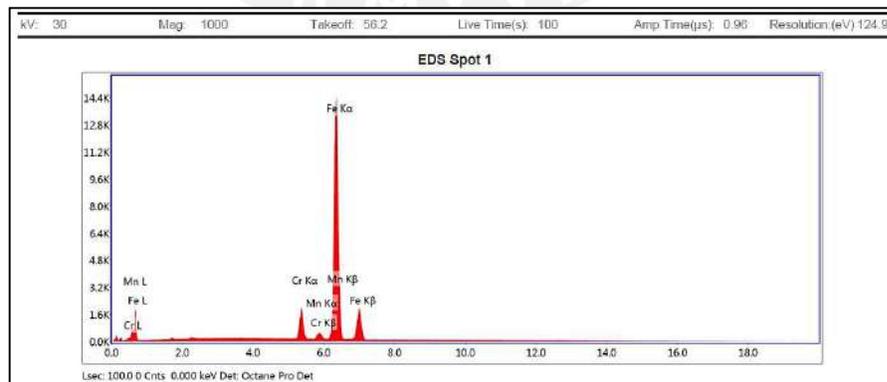


Figura 3.21b

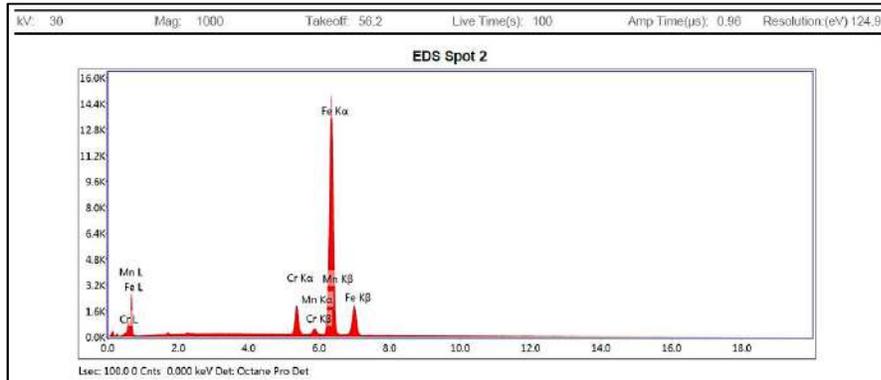


Figura 3.21c

Figura 3.21. Identificación y contabilización de rayos X característicos en los bordes de grano del MA correspondiente a la junta J4R-4, 30KV, con magnificación de 1000: figura 3.21a, localización de los sitios 1 y 2; figuras 3.21b y 3.21c, identificación y contabilización de Rayos X característicos.

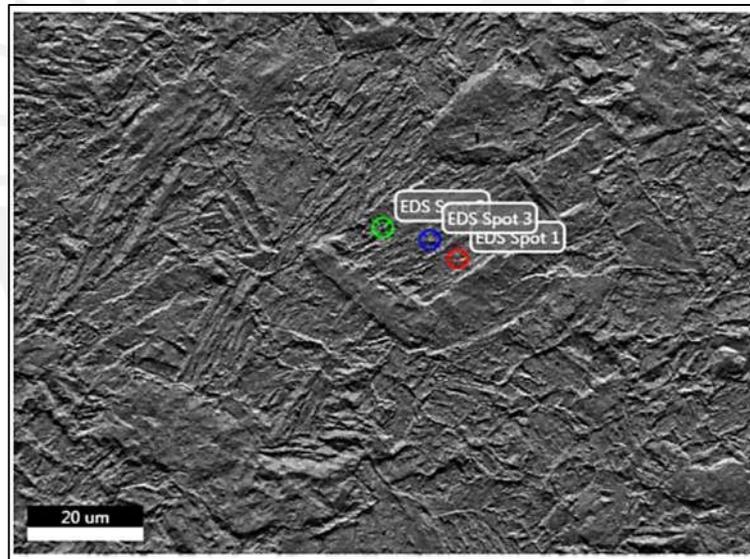


Figura 3.22a

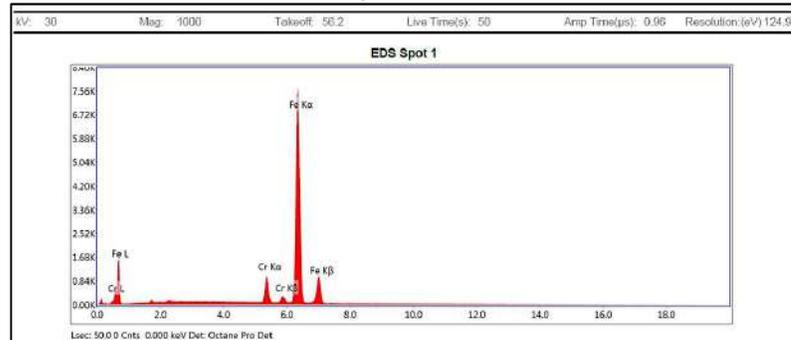


Figura 3.22b

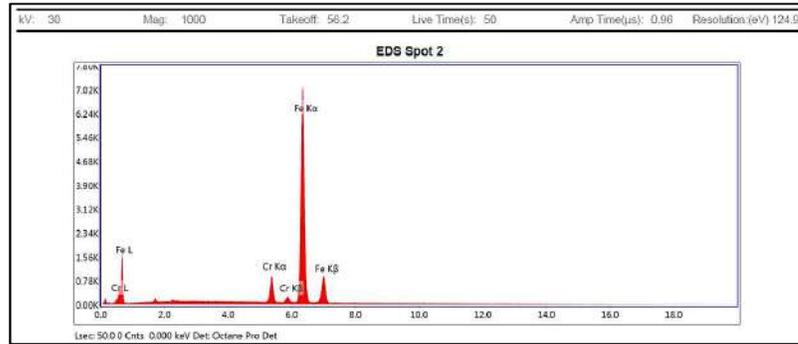


Figura 3.22c

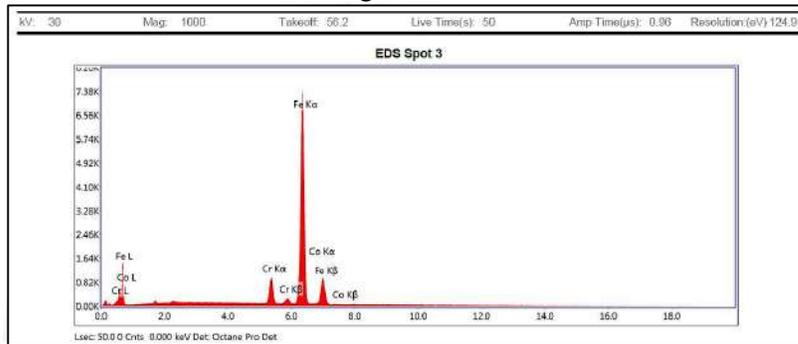


Figura 3.22d

Figura 3.22. Identificación y contabilización de rayos X característicos dentro de los granos del MA correspondiente a la junta J4R-4, 30KV, con magnificación de 1000: figura 3.22a , localización de los sitios 1, 2 y 3; figuras 3.22b, 3.22c y 3.22d, identificación y contabilización de Rayos X característicos

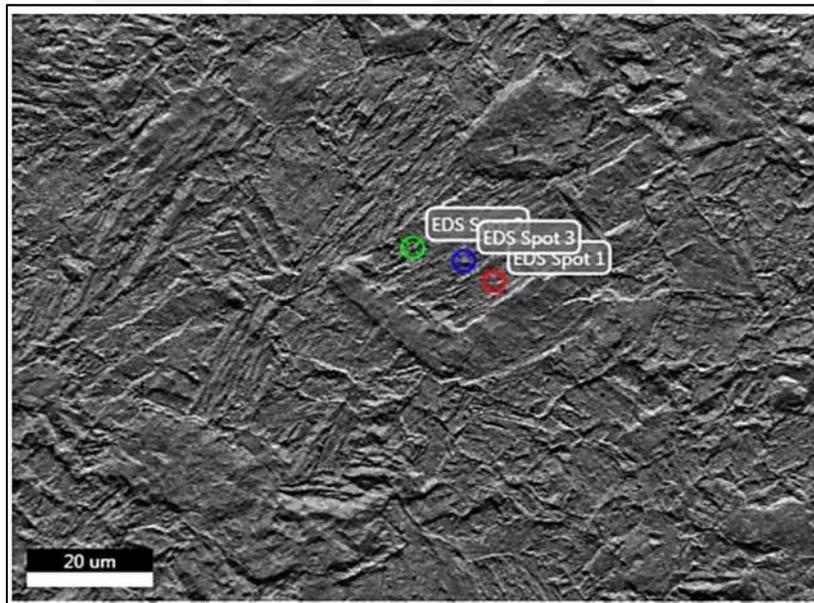


Figura 3.23a

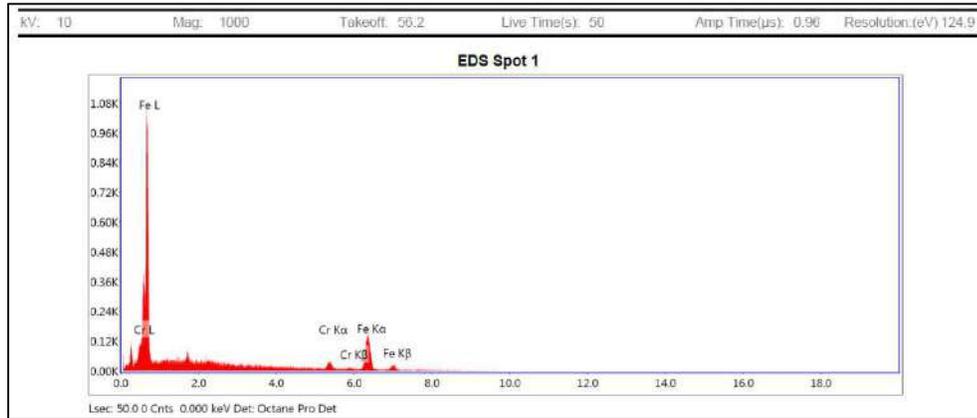


Figura 3.23b

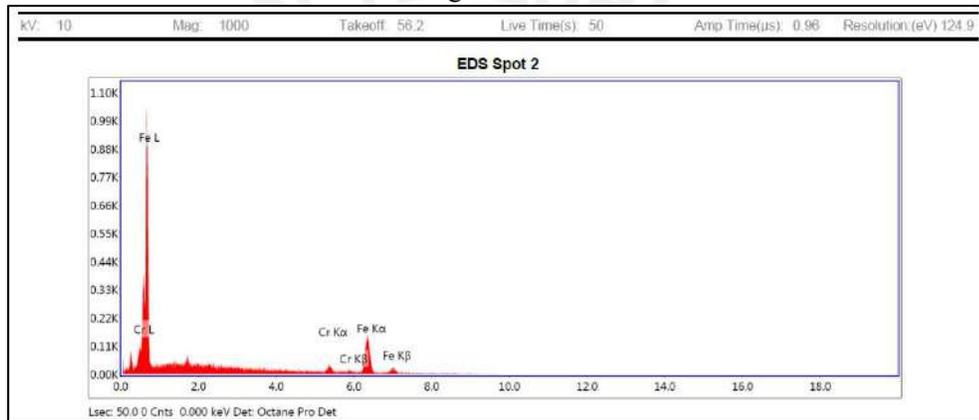


Figura 3.23c

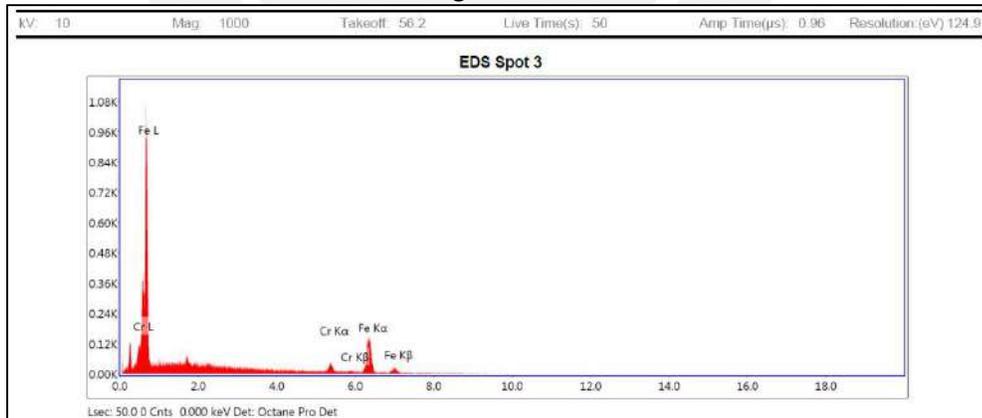


Figura 3.23d

Figura 3.23. Identificación y contabilización de rayos X característicos dentro de los granos del MA correspondiente a la junta J4R-4, 10 KV, con magnificación de 1000: figura 3.23a , localización de los sitios 1, 2 y 3; figuras 3.23b, 3.23c y 3.23d, identificación y contabilización de Rayos X característicos

### **3.3.4.2 Análisis Micrográfico mediante la Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)**

Para confirmar la presencia de los carburos y confirmar su distribución dentro y en los bordes de grano, en las microestructuras de las juntas J4R-1, J4R-3 y J4R-4 (juntas identificadas en la tabla 3.7) tanto en el MA como en la ZAC; se determinó la composición química de las muestras de las juntas en mención, mediante EDS a 10 KV dentro y en los bordes de grano, usando el modo Emisivo (electrones secundarios, muestran la topografía de la superficie) y Rayos X (rayos X característicos, miden la composición química) del microscopio electrónico de barrido.

#### **a) Análisis Micrográfico de la Junta J4R-1**

Para la junta J4R-1; la localización de los sitios que fueron examinados, son mostrados en las figuras 3.24 (MA) y 3.25 (ZAC); las respectivas graficas de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados, son mostrados en los anexos 1.4 (MA) y 1.5 (ZAC).

Los porcentajes en “átomo de metal” y en “peso de metal” obtenidos por el modo EDS (rayos X característicos) son presentados en las tablas 3.14 (MA) y 3.15 (ZAC) para la junta J4R-1. Para efecto de comparación se muestra el rango de concentraciones de átomos metálicos para carburos comunes en la tabla 3.16.

Para la junta J4R-1; en base a los resultados de las tablas 3.14 y 3.15, se confirma la presencia de carburos en los bordes y dentro de los granos para el MA y ZAC, de acuerdo a los párrafos líneas abajo. Se observa que la cantidad de “Cr” en los bordes de grano son mayores que dentro de los granos, en 2.2 y 2.1 veces para el MA y ZAC respectivamente.

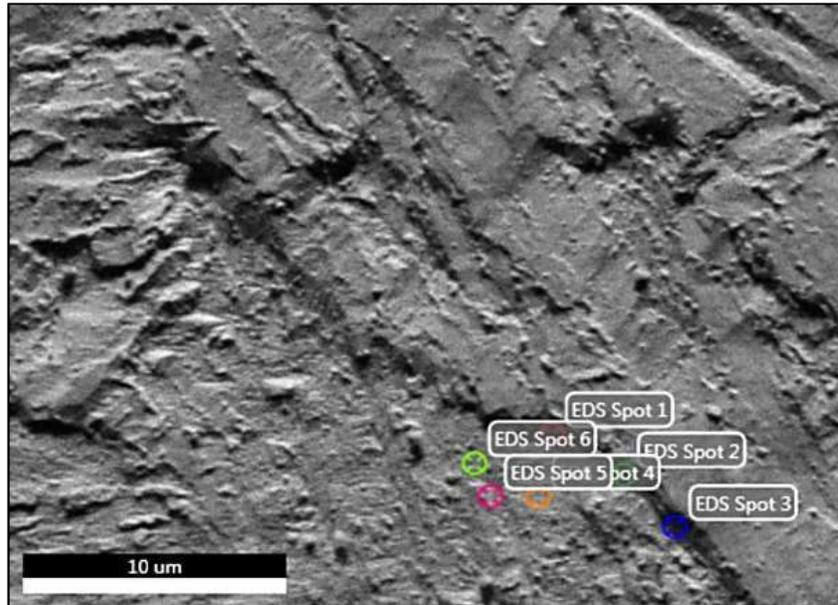


Figura 3.24. Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano del MA correspondiente a la junta J4R-1 (con PWHT,  $T=725^{\circ}\text{C}$ ), a 10KV, con magnificación de 4000: ubicación de los sitios, del 1 al 3 - límite de grano y del 4 al 6 - dentro de los granos

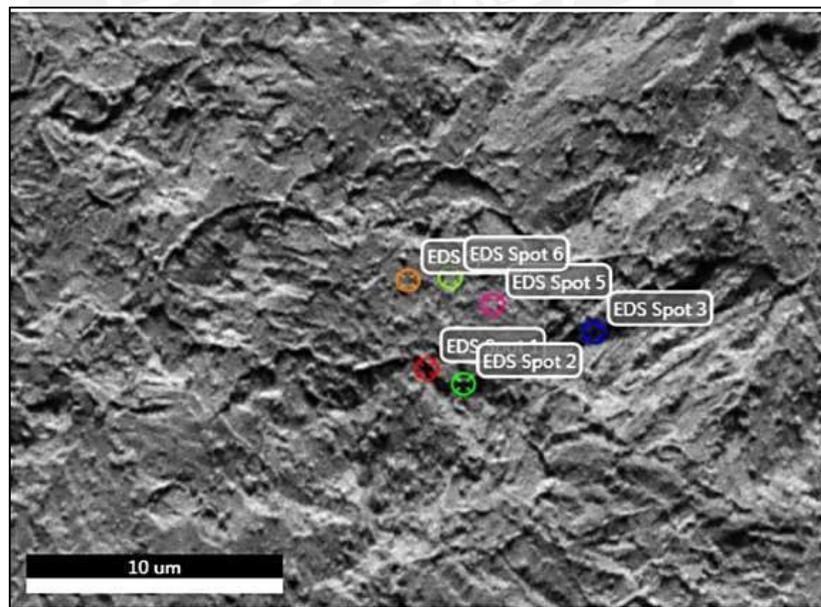


Figura 3.25. Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano de la ZAC correspondiente a la junta J4R-1 (con PWHT,  $T=725^{\circ}\text{C}$ ), a 10KV, con magnificación de 4000: ubicación de los sitios, del 1 al 3 - límite de grano y sitios del 4 al 6 - dentro del grano

Tabla 3.14. Porcentaje en átomo y en peso de los elementos obtenidos mediante EDS en los bordes (sitios 1, 2 y 3) y dentro (sitios 4, 5 y 6) de los granos del MA correspondiente a la junta J4R-1

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SITIO 1</b>	FeL	58.21	59.94	9.46	52.70	63.72	54.27	65.61
	CrK	41.79	40.06	16.70	34.81	48.77	33.37	46.75
<b>SITIO 2</b>	FeL	61.16	62.84	9.34	55.45	66.87	56.97	68.71
	CrK	38.84	37.16	17.87	31.90	45.78	30.52	43.80
<b>SITIO 3</b>	FeL	74.80	76.12	7.42	69.25	80.35	70.47	81.77
	CrK	25.20	23.88	19.61	20.26	30.14	19.20	28.56
<b>SITIO 4</b>	FeL	85.73	86.58	5.61	80.92	90.54	81.72	91.44
	CrK	14.27	13.42	23.47	10.92	17.62	10.27	16.57
<b>SITIO 5</b>	FeL	81.61	82.66	6.08	76.65	86.57	77.63	87.69
	CrK	18.39	17.34	19.56	14.79	21.99	13.95	20.73
<b>SITIO 6</b>	FeL	84.95	85.84	5.70	80.11	89.79	80.95	90.73
	CrK	15.05	14.16	22.67	11.64	18.46	10.95	17.37

Tabla 3.15. Porcentaje en átomo y en peso de los elementos obtenidos mediante EDS en el borde (sitios 1, 2 y 3) y dentro (sitios 4, 5 y 6) de los granos de la ZAC correspondiente a la junta J4R-1

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SITIO 1</b>	FeL	64.18	65.80	9.7	58.0	70.41	59.42	72.18
	CrK	35.82	34.20	20.89	28.3	43.30	27.06	41.34
<b>SITIO 2</b>	FeL	72.45	73.86	8.49	66.3	78.60	67.59	80.13
	CrK	27.55	26.14	22.58	21.3	33.77	20.24	32.04
<b>SITIO 3</b>	FeL	82.67	83.67	6.62	77.2	88.14	78.13	89.21
	CrK	17.33	16.33	25.62	12.9	21.77	12.15	20.51
<b>SITIO 4</b>	FeL	85.31	86.19	6.26	80.0	90.65	80.79	91.59
	CrK	14.69	13.81	31.73	10.0	19.35	9.43	18.19
<b>SITIO 5</b>	FeL	87.61	88.37	5.83	82.5	92.72	83.22	93.52
	CrK	12.39	11.63	31.84	8.4	16.33	7.93	15.33
<b>SITIO 6</b>	FeL	89.15	89.62	5.62	84.1	94.16	84.58	94.66
	CrK	10.85	10.18	38.37	6.7	15.01	6.27	14.09

Para la junta J4R-1; en base a los resultados de las tablas 3.14 y 3.15, se confirma la presencia de carburos en los bordes y dentro de los granos para el MA y ZAC, de acuerdo a los párrafos líneas abajo. Se observa que la cantidad de “Cr” en los bordes de grano son mayores que dentro de los granos, en 2.2 y 2.1 veces para el MA y ZAC respectivamente.

- En la tabla 3.14 para el MA, se obtuvo rangos de valores en peso y [átomo de metal] (considerando los errores), de: 54.27% [52.7%] mín. y 90.73% [89.79%] máx. para el Fe,

y 10.27% [10.92% ] mín. y 46.75% [48.77%] máx. para el “Cr”; realizando la comparación con los valores de % en peso para el Fe (93.73%) y Cr (4.56%) del análisis químico del metal base de suministro (tabla 3.1), y con el rango de % átomo de metal para el Fe (1.5% mínimo, 74.3% máximo) y “Cr” (5.8% mínimo, 65.4% máximo) de los carburos comunes (tabla 3.16), se concluye que hay presencia de carburos con contenidos de cromo en el metal de aporte. Los sitios 1, 2 y 3 (tabla 3.14), correspondiente a los bordes de grano, están comprendidos dentro del rango de concentración de átomos metálicos de los carburos  $M_{23}C_6$  (sitio 1 y 2) y  $M_3C$  (sitio 3).

- En la tabla 3.15 para la ZAC, se obtuvo rangos de valores en peso y [átomo de metal] (considerando los errores), de: 59.42% [58.0%] mín. y 94.66% [94.16%] máx. para el Fe, y 6.27% [6.70%] mín. y 41.34% [43.30%] máx. para el “Cr”; realizando la comparación con los valores de % en peso para el Fe (93.73%) y Cr (4.56%) del análisis químico del metal base de suministro (tabla 3.1), y con el rango de % átomo de metal para el Fe (1.5% mínimo, 74.3% máximo) y “Cr” (5.8% mínimo, 65.4% máximo) de los carburos comunes (tabla 3.16), se concluye que hay presencia de carburos con contenidos de cromo en la zona afectada por el calor. El sitio 2 (tabla 3.15) correspondiente al borde de grano, está comprendido dentro del rango de concentración de átomos metálicos del carburo  $M_3C$ .

Tabla 3.16. Fórmula promedio y rango de concentraciones de átomos metálicos para carburos comunes [37]

Carburos	Formula promedio	Rango de concentración de átomo de metal		
		%Fe	%Cr	%Mo
$M_3C$	$(Fe_{0.72}Cr_{0.25}Mo_{0.03})_3C$	71.4-74.3	23.0-26.8	1.8-3.6
$M_2C$	$(Fe_{0.05}Cr_{0.25}Mo_{0.70})_2C$	1.5-11.9	21.5-26.9	61.9-77.0
$M_6C$	$(Fe_{0.45}Cr_{0.18}Mo_{0.37})_6C$	35.4-57.6	5.8-28.3	22.7-49.5
$M_7C_3$	$(Fe_{0.32}Cr_{0.59}Mo_{0.09})_7C_3$	19.2-37.5	52.0-65.4	5.0-15.4
$M_{23}C_6$	$(Fe_{0.52}Cr_{0.42}Mo_{0.06})_{23}C_6$	50.5-54.5	39.1-46.3	3.2-7.9

### **b) Análisis Micrográfico de la Junta J4R-3**

Para la junta J4R-3; la localización de los sitios que fueron examinados, son mostrados en las figuras 3.26 (MA) y 3.27 (ZAC); las respectivas graficas de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados, son mostrados en los anexos 1.6 (MA) y 1.7 (ZAC).

Los porcentajes en “átomo de metal” y en “peso de metal” obtenidos por el modo EDS (rayos X característicos) son presentados en las tablas 3.17 (MA) y 3.18 (ZAC) para la junta J4R-3.

Para la junta J4R-3; en base a los resultados de las tablas 3.17 y 3.18, se confirma la presencia de carburos en los bordes y dentro de los granos para el MA y ZAC, de acuerdo a los párrafos líneas abajo. Se observa que en el MA; la cantidad de “Cr” en los bordes de grano son sutilmente mayores (1.2 veces) que dentro de los granos; razón por la cual se concluye que los carburos están distribuidos con cierta uniformidad dentro y en los bordes de grano del MA. Además, se observa que en la ZAC; la cantidad de “Cr” en los bordes de grano son ampliamente mayores que dentro de los granos (5.7 veces); razón por la cual se confirma la presencia de abundantes carburos en los bordes de grano en la ZAC, tal como se muestra en la microestructura de la junta J4R-3 en la ZAC (figuras 3.19c y 3.19d).

- En la tabla 3.17 para el MA, se obtuvo rangos de valores en peso y [átomo de metal] (considerando los errores), de: 77.3% [76.3% en átomo] mín. y 93.2% [92.42% en átomo] máx. para el Fe, y 8.7% [9.3% en átomo] mín. y 21.1% [22.32% en átomo] máx. para el Cr; realizando la comparación con los valores de % en peso para el Fe (93.73%) y Cr (4.56%) del análisis químico del metal base de suministro (tabla 3.1), y con el rango de % átomo de metal para el Fe (1.5% mínimo, 74.3% máximo) y Cr (5.8% mínimo, 65.4% máximo) de los carburos comunes (tabla 3.16), se confirma que en la microestructura en estudio hay presencia de carburos en los bordes y dentro de los granos.

- En la tabla 3.18 para la ZAC, se obtuvo rangos de valores en peso y [átomo de metal] (considerando los errores), de: 24.1% [22.8%] mín. y 93.9% [93.22%] máx. para el Fe, y 8.0% [8.5% en átomo] mín. y 78.4% [79.2% en átomo] máx. para el Cr; realizando la comparación con los valores de % en peso para el Fe (93.73%) y Cr (4.56%) del análisis químico del metal base de suministro (tabla 3.1), y con el rango de % átomo de metal para el Fe (1.5% mínimo, 74.3% máximo) y Cr (5.8% mínimo, 65.4% máximo) de los carburos comunes (tabla 3.16), se confirma que en la microestructura en estudio hay presencia de carburos, y que la mayor cantidad de carburos de Cr y Mo se encuentran ubicados en los bordes de grano. Los sitios 5 y 6 (tabla 3.18) correspondiente a los bordes de grano, están comprendidos dentro del rango de concentración de átomos metálicos del carburo  $M_7C_3$  (carburo con contenidos de Cr y Mo).

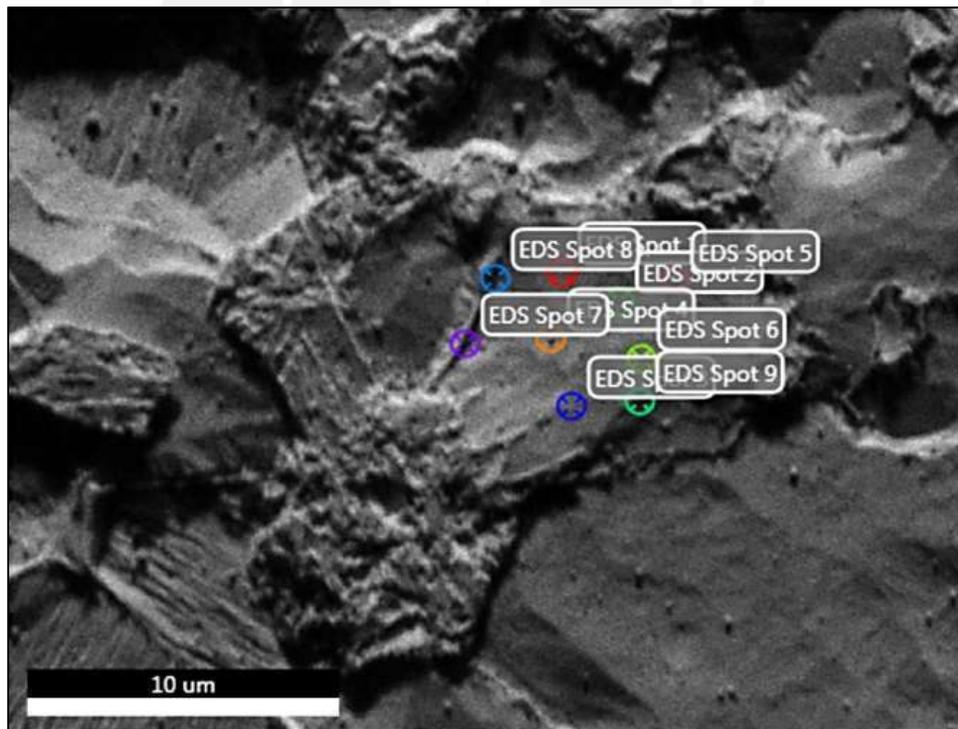


Figura 3.26a

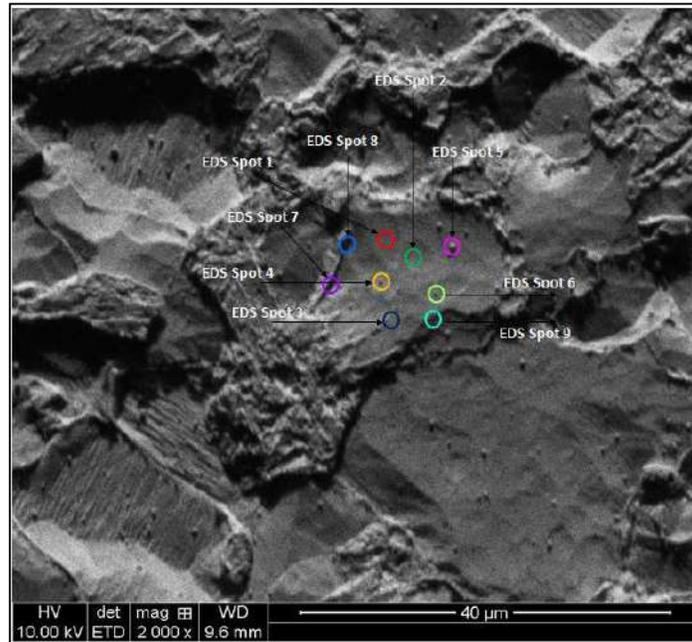


Figura 3.26b

Figura 3.26. Localización de los sitios (figuras 3.26a y 3.26b) dentro y en los bordes de grano en el MA correspondiente a la junta J4R-3, a 10KV, con magnificación 4000: ubicación de los sitios dentro del grano, sitios 1, 2 y 3 - superficie llana y sitios 4, 5 y 6 – superficie con resalte; ubicación de los sitios en los bordes de grano, sitios 7, 8 y 9

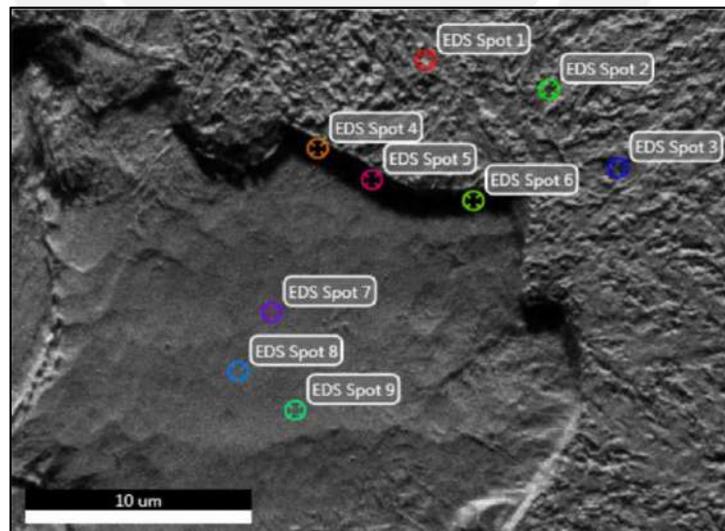


Figura 3.27. Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano en la ZAC correspondiente a la junta J4R-3, a 10KV, con magnificación 4000: sitios dentro del grano, 1, 2 y 3 en un micro-constituyente con relieve rugoso; sitios dentro del grano, 7, 8 y 9 en otro micro-constituyente con relieve llano; sitios en los bordes de grano, 4, 5 y 6

Tabla 3.17. Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS, dentro (sitios 1, 2 y 3 en puntos llanos; sitios 4, 5 y 6 en puntos pequeños con relieve redondo) y en los bordes de grano (sitios 7, 8 y 9) en el MA correspondiente a la junta J4R-3, a 10KV, con magnificación 4000

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SPOT 1</b>	FeL	86.11	85.23	5.12	80.9	89.59	81.7	90.5
	CrK	13.89	14.77	18.34	12.1	17.48	11.3	16.4
<b>SPOT 2</b>	FeL	86.38	85.51	5.01	81.2	89.79	82.1	90.7
	CrK	13.62	14.49	18.26	11.8	17.14	11.1	16.1
<b>SPOT 3</b>	FeL	87.48	86.67	4.84	82.5	90.86	83.2	91.7
	CrK	12.52	13.33	18.83	10.8	15.84	10.2	14.9
<b>SPOT 4</b>	FeL	84.6	83.65	5.26	79.3	88.05	80.2	89.0
	CrK	15.4	16.35	17.61	13.5	19.23	12.7	18.1
<b>SPOT 5</b>	FeL	87.3	86.48	4.86	82.3	90.68	83.1	91.5
	CrK	12.7	13.52	18.78	11.0	16.06	10.3	15.1
<b>SPOT 6</b>	FeL	89.13	88.41	4.54	84.4	92.42	85.1	93.2
	CrK	10.87	11.59	20.11	9.3	13.92	8.7	13.1
<b>SPOT 7</b>	FeL	85.97	85.09	5.26	80.6	89.57	81.4	90.5
	CrK	14.03	14.91	19.42	12.0	17.81	11.3	16.8
<b>SPOT 8</b>	FeL	82.04	80.96	5.81	76.3	85.66	77.3	86.8
	CrK	17.96	19.04	17.21	15.8	22.32	14.9	21.1
<b>SPOT 9</b>	FeL	85.09	84.15	5.27	79.7	88.58	80.6	89.6
	CrK	14.91	15.83	18.27	12.9	18.72	12.2	17.6

Tabla 3.18. Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS, dentro (sitios 1, 2 y 3 en un micro-constituyente con relieve rugoso; sitios 7, 8 y 9 en otro micro-constituyente con relieve llano) y en los bordes de grano (sitios 4, 5 y 6) en la ZAC correspondiente a la junta J4R-3, a 10KV, con magnificación 4000

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SPOT 1</b>	FeL	87.96	87.18	4.8	83.0	91.36	83.7	92.2
	CrK	12.04	12.82	19.57	10.3	15.33	9.7	14.4
<b>SPOT 2</b>	FeL	88.53	87.79	4.65	83.7	91.87	84.4	92.6
	CrK	11.47	12.21	19.54	9.8	14.60	9.2	13.7
<b>SPOT 3</b>	FeL	88.2	87.44	4.84	83.2	91.67	83.9	92.5
	CrK	11.8	12.56	20.32	10.0	15.11	9.4	14.2
<b>SPOT 4</b>	FeL	27.34	25.94	11.94	22.8	29.04	24.1	30.6
	CrK	72.66	74.06	7.91	68.2	79.92	66.9	78.4
<b>SPOT 5</b>	FeL	33.9	33.5	11	29.8	37.19	30.2	37.6
	MoL	7.57	4.35	12.73	3.8	4.90	6.6	8.5
	CrK	58.54	62.14	8.78	56.7	67.60	53.4	63.7
<b>SPOT 6</b>	FeL	30.23	29.66	11.3	26.3	33.01	26.8	33.6
	MoL	6.56	3.75	14.01	3.2	4.28	5.6	7.5
	CrK	63.21	66.6	8.61	60.9	72.33	57.8	68.7
<b>SPOT 7</b>	FeL	74.84	59.62	6.24	55.9	63.34	70.2	79.5
	CrK	12.49	10.6	20.91	8.4	12.82	9.9	15.1
<b>SPOT 8</b>	FeL	89.48	88.79	4.5	84.8	92.79	85.5	93.5
	CrK	10.52	11.21	20.26	8.9	13.48	8.4	12.7
<b>SPOT 9</b>	FeL	89.93	89.26	4.44	85.3	93.22	85.9	93.9
	CrK	10.07	10.74	20.95	8.5	12.99	8.0	12.2

### c) Análisis Micrográfico de la Junta J4R-4

Para la junta J4R-4; la localización de los sitios que fueron examinados, son mostrados en las figuras 3.28 (MA) y 3.29 (ZAC); las respectivas graficas de identificación y

contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados, son mostrados en los anexos 1.8 (MA) y 1.9 (ZAC).

Los porcentajes en “átomo de metal” y en “peso de metal” obtenidos por el modo EDS (rayos X característicos) son presentados en las tablas 3.19 (MA) y 3.20 (ZAC) para la junta J4R-4.

Para la junta J4R-4; en base a los resultados de las tablas 3.19 y 3.20, se confirma la presencia de carburos en el MA y ZAC, de acuerdo a los párrafos líneas abajo. Se observa que la cantidad de “Cr” en los bordes de grano son mayores que dentro de los granos, en 2.0 y 3.1 veces para el MA y ZAC respectivamente.

- En la tabla 3.19 para el MA, se obtuvo rangos de valores en peso y [átomo de metal] (considerando los errores), de: 64.8% [63.4%] mín. y 91.5% [90.67%] máx. para el Fe, y 10.3% [11.0%] mín. y 34.6% [36.33%] máx. para el Cr; realizando la comparación con el porcentaje en peso para el Cr del análisis químico del metal base de suministro (4.56%, tabla 3.1) y el de los carburos comunes (5.8% - 65.4%, tabla 3.16), se confirma que en la microestructura en estudio hay presencia de carburos en los bordes y dentro de los granos. En los sitios 4, 5 y 6 (tabla 3.19) correspondiente a los bordes de grano, están comprendidos dentro del rango de concentración de átomos metálicos del carburo  $M_3C$ .
- En la tabla 3.20 para la ZAC, se obtuvo rangos de valores en peso y [átomo de metal] (considerando los errores), de: del 66.75% [68.32%] mín. y 97.18% [97.36%] máx. para el Fe, y 2.64% [2.83%] mín. – 33.25% [31.68%] máx. para el Cr; realizando la comparación con el porcentaje en peso para el Cr del análisis químico del metal base de suministro (4.56%, tabla 3.1) y el de los carburos comunes (5.8% - 65.4%, tabla 3.16), se confirma que en la microestructura en estudio hay presencia de carburos en los bordes y dentro de los granos. En los sitios 1, 2 y 3 (tabla 3.20) correspondiente a los bordes de grano, están comprendidos dentro del rango de concentración de átomos metálicos del carburo  $M_3C$ .

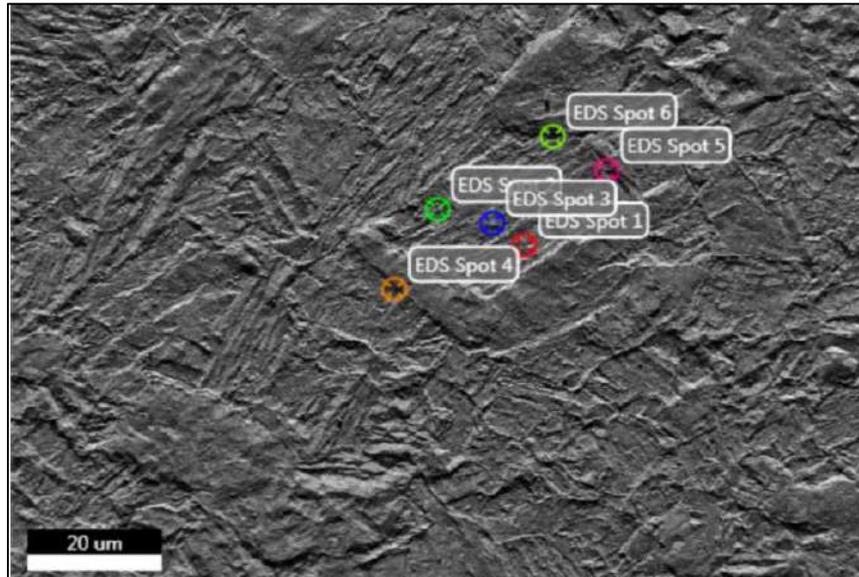


Figura 3.28. Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano en el MA correspondiente a la junta J4R-4, a 10KV, con magnificación 1000: sitios del 1 al 3 – dentro del grano; sitios del 4 al 6 - bordes del grano

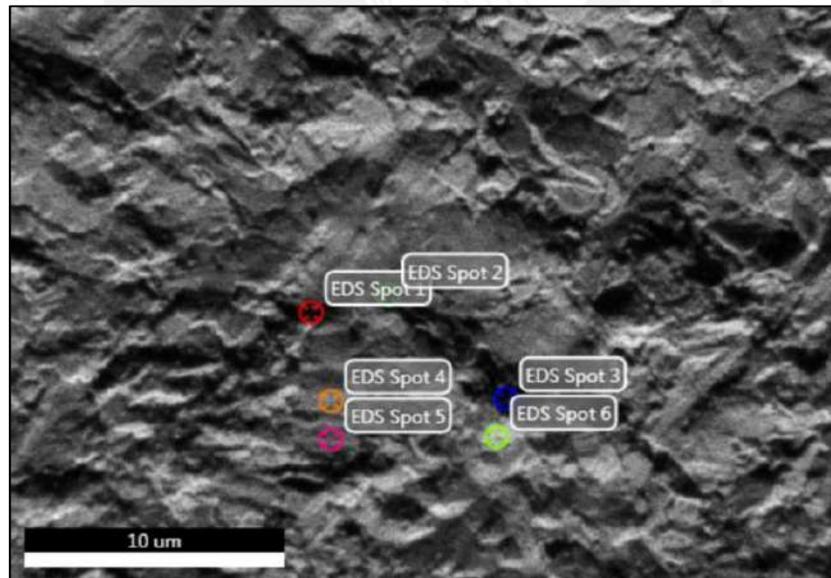


Figura 3.29. Localización de los sitios dentro y en los bordes de grano en la ZAC correspondiente a la junta J4R-4, a 10KV, con magnificación 4000: sitios 4, 5 y 6 – dentro del grano; sitios 1, 2 y 3 – borde de grano

Tabla 3.19. Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS, dentro (sitios 1, 2 y 3) y en los bordes de grano (sitios 4, 5 y 6) en el MA correspondiente a la junta J4R-4, a 10KV, con magnificación 1000

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SPOT 1</b>	FeL	87.17	86.35	4.82	82.2	90.51	83.0	91.4
	CrK	12.83	13.65	17.74	11.2	16.07	10.6	15.1
<b>SPOT 2</b>	FeL	87.31	86.5	4.82	82.3	90.67	83.1	91.5
	CrK	12.69	13.5	18.8	11.0	16.04	10.3	15.1
<b>SPOT 3</b>	FeL	86.58	85.72	4.96	81.5	89.97	82.3	90.9
	CrK	13.42	14.28	18.19	11.7	16.88	11.0	15.9
<b>SPOT 4</b>	FeL	77.66	76.4	6.36	71.5	81.26	72.7	82.6
	CrK	22.34	23.6	15.84	19.9	27.34	18.8	25.9
<b>SPOT 5</b>	FeL	75.35	74	6.73	69.0	78.98	70.3	80.4
	CrK	24.65	26	15.83	21.9	30.12	20.7	28.6
<b>SPOT 6</b>	FeL	69.86	68.34	7.3	63.4	73.33	64.8	75.0
	CrK	30.14	31.66	14.74	27.0	36.33	25.7	34.6

Tabla 3.20. Porcentaje de elementos obtenidos mediante EDS, dentro (sitios 4, 5 y 6) y en los bordes de grano (sitios 1, 2 y 3) en la ZAC correspondiente a la junta J4R-4, a 10KV, con magnificación 4000

Sitios (Spots)	Elemento	% Átomo	% Peso	% Error	% Mínimo en átomo	% Máximo en átomo	% Mínimo en peso	% Máximo en peso
<b>SPOT 1</b>	FeL	78.13	76.88	6.42	71.9	81.82	73.1	83.1
	CrK	21.87	23.12	16.38	19.3	26.91	18.3	25.5
<b>SPOT 2</b>	FeL	71.92	70.46	7.17	65.4	75.51	66.8	77.1
	CrK	28.08	29.54	15.31	25.0	34.06	23.8	32.4
<b>SPOT 3</b>	FeL	68.32	66.75	7.75	61.6	71.92	63.0	73.6
	CrK	31.68	33.25	15.86	28.0	38.52	26.7	36.7
<b>SPOT 4</b>	FeL	89.81	89.13	4.43	85.2	93.08	85.8	93.8
	CrK	10.19	10.87	20.24	8.7	13.07	8.1	12.3
<b>SPOT 5</b>	FeL	97.36	97.18	3.82	93.5	100.89	93.6	101.1
	CrK	2.64	2.83	64.16	1.0	4.65	0.9	4.3
<b>SPOT 6</b>	FeL	86.16	85.28	5.02	81.0	89.56	81.8	90.5
	CrK	13.84	14.72	18.14	12.0	17.39	11.3	16.4

### **3.4 Caracterización de las Juntas con Repetidas Reparaciones con la Mejor Configuración de Tratamiento Térmico (Obtenido en el Capítulo 2.8)**

Las muestras de las juntas J1 (sin reparar), J1R (primera reparación), J2R (segunda reparación), J3R (tercera reparación) y J4R (cuarta reparación) fueron caracterizados mediante ensayos de dureza, impacto Charpy V y análisis de la microestructura.

La mejor configuración (condición) de tratamiento térmico es la que presenta PWHT con parámetro “P” = 20.26.

#### **3.4.1 Ensayo de Dureza Vickers a Temperatura de Ambiente**

Se realizaron indentaciones localizados en la línea cercana a la superficie externa (LS) e interna (LI) de las muestras (probetas) correspondiente a las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R; atravesando las zonas del metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC), línea de fusión (LF) y metal de aporte (MA). En las figuras 3.30 y 3.31, se muestran los perfiles de dureza de las juntas en estudio en la LS y LI respectivamente, las cuales son comparadas con el valor de dureza promedio del MB de suministro (203 HV, tabla 3.2) y con el valor máximo de dureza permitido (248 HV, &1.4.6.1).

Los perfiles de los gráficos de dureza mostrados en la figura 3.30 (línea superior), tienen un comportamiento típico para las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R; los valores de dureza se incrementan desde el MB, pasando por la ZAC y LF, hasta alcanzar sus máximos valores en el MA. Las durezas en el MA en la LS están próximos a la dureza máxima permitida, y la curva formada por estos valores es cóncava hacia abajo.

Los perfiles de los gráficos de dureza mostrados en la figura 3.31 (línea inferior), tienen un comportamiento típico diferente; los valores se van incrementando desde el MB, hasta alcanzar sus máximos valores en la ZAC y/o LF; después de LF, el valor de dureza disminuye hacia el MA. Las durezas en el MA en la LI están por debajo considerablemente de la dureza máxima permitida, y la curva formada por estos valores es cóncava hacia arriba.

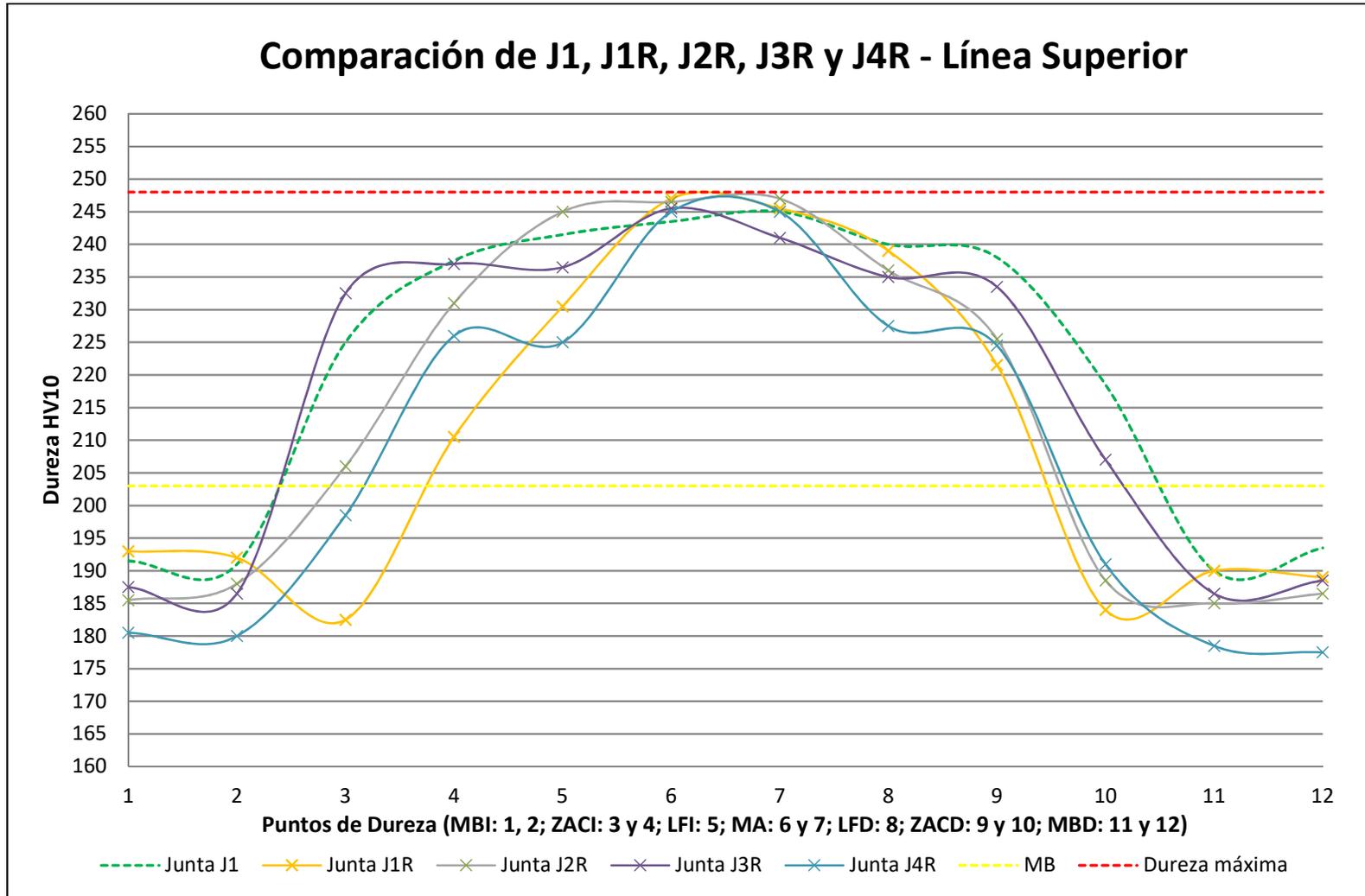


Figura 3.30. Comparación de perfiles de dureza en la línea superior (línea paralela a la superficie externa de la tubería, a 1.5 mm) de las probetas de las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R con parámetro “P = 20.26”

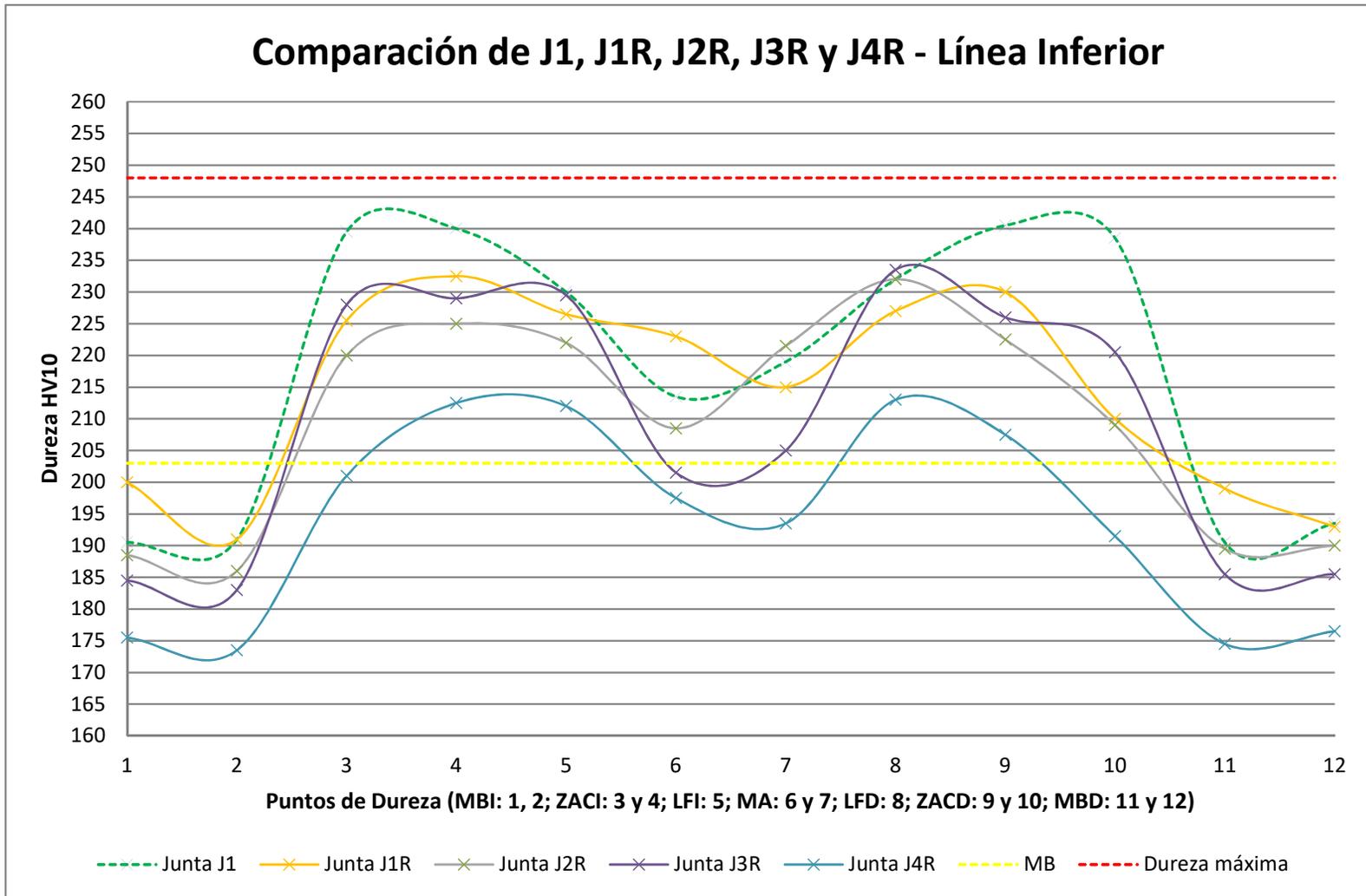


Figura 3.31. Comparación de perfiles de dureza en la línea inferior (línea paralela a la superficie inferior de la tubería, a 1.5 mm) de las probetas de las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R con parámetro “P = 20.26”

Analizando la información proporcionada por las figuras 3.30 y 3.31 se obtienen los siguientes resultados:

- Los valores de dureza en la ZAC, LF y MA son menores que el valor de dureza máximo permitido (248 HV, &1.4.6.1).
- Los valores de dureza en el MA en la LI son menores a los obtenidos en la LS; esto se puede explicar debido a que la soldadura depositada en las capas siguientes después del pase de raíz (refuerzo de raíz, relleno y acabado) aportan ciclos de calor, originando un cierto grado de revenido; razón por la cual los mayores valores de dureza obtenidos se localizan en el MA en la LS, ya que la última capa de metal depositado ya no recibe ciclos de calor posteriores.

La comparación de la variación de la dureza promedio de las juntas J1R, J2R, J3R y J4R con respecto a la junta J1 (sin reparación) en el MB, ZAC y MA, son presentados en la tabla 3.21.

Tabla 3.21. % Variación de la dureza promedio de las juntas J1R, J2R, J3R y J4R con respecto a la junta J1 (sin reparación) en la LS y LI

Código	Juntas	MB LS	ZAC LS	MA LS	MB LI	ZAC LI	MA LI
1	J1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	J1R	-0.3%	-12.4%	0.8%	2.3%	-10.9%	1.3%
3	J2R	-2.7%	-9.2%	1.0%	-1.5%	-11.9%	-0.6%
4	J3R	-2.2%	-6.3%	-0.4%	-3.5%	-7.8%	-6.0%
5	J4R	-6.5%	-9.3%	0.3%	-8.6%	-17.5%	-9.6%

La tabla 3.21 muestra que la variación de dureza en la ZAC en la LS e LI de las juntas con repetidas reparaciones (J1R, J2R, J3R y J4R) disminuyen con respecto a la junta sin reparación (J1), la disminución es considerable en la junta J4R (-17.5%) y en las demás la variación de dureza es leve; razón por la cual el incremento en el # de reparaciones ha generado una disminución en la dureza, la cual es tolerable hasta una cuarta reparación.

### 3.4.2 Ensayo de Impacto Charpy V a -29°C

Los resultados de los valores de la energía absorbida a la temperatura de -29°C, correspondiente a las muestras (especímenes) de las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R, son mostrados en la tabla 3.22. Y en la figura 3.32 se muestra el comparativo de los valores de resistencia al impacto promedio de las juntas en estudio.

La resistencia al impacto con el eje de la muesca en la ZAC, disminuye desde la junta J1 (sin reparación), pasando por J1R (primera reparación), hasta la junta J2R (segunda reparación); después se incrementa sutilmente en las juntas J3R (tercera reparación) y J4R (cuarta reparación). La resistencia al impacto con el eje de la muesca en el MA, muestra un comportamiento aproximadamente constante, esto se puede explicar ya que la metodología de reparación consistió en remover todo el metal de aporte depositado y después realizar la deposición del metal de aporte nuevamente.

La tabla 3.23 muestra la comparación de los *valores de resistencia al impacto promedio* de las probetas (especímenes) de las juntas J1R, J2R, J3R y J4R con respecto de la junta J1.

Tabla 3.22. Valores de energía absorbida en el ensayo de impacto Charpy V a -29°C

Código	Espécimen	Valor 1 (J)	Valor 2 (J)	Valor 3 (J)	Valor promedio (J)	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )
--	MB	210	216	220	215	358
1	J1 - muesca en la ZAC	188	178	185	184	307
1	J1 - muesca en el MA	64	66	68	66	110
2	J1R - muesca en la ZAC	180	184	134	166	277
2	J1R - muesca en el MA	45	60	65	57	95
3	J2R - muesca en la ZAC	142	170	174	162	270
3	J2R - muesca en el MA	62	68	70	67	112
4	J3R - muesca en la ZAC	144	182	169	165	275
4	J3R - muesca en el MA	60	70	55	62	103
5	J4R - muesca en la ZAC	178	158	180	172	287
5	J4R - muesca en el MA	64	48	70	61	102

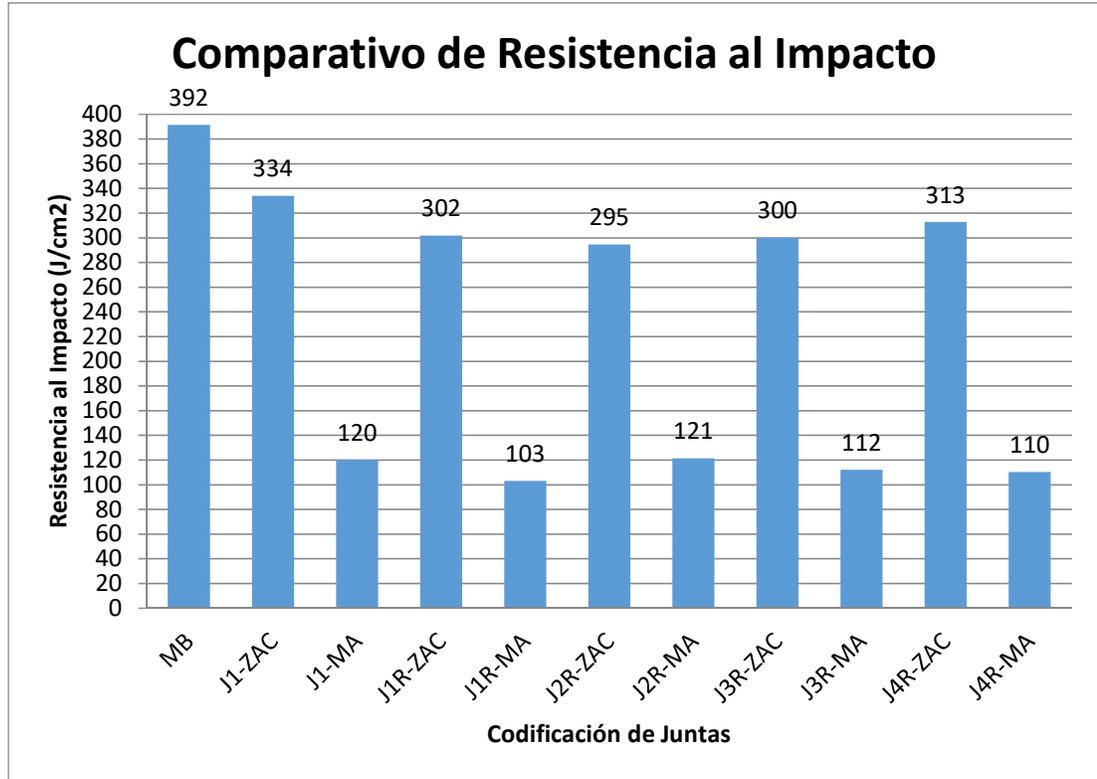


Figura 3.32. Comparativo de la resistencia al impacto (a  $-29^{\circ}\text{C}$ ) en la ZAC, MA y metal base de suministro con parámetro “P” = 20.26

Tabla 3.23: % Variación de la resistencia al impacto con respecto a la junta J1 a  $-29^{\circ}\text{C}$  en la ZAC y MA

Junta - ubicación de la muesca	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )	% Variación respecto a J1 (ZAC / MA)
J1 - ZAC	307	0%
J1R - ZAC	277	-10%
J2R - ZAC	270	-12%
J3R - ZAC	275	-10%
J4R - ZAC	287	-7%
J1 - MA	110	0%
J1R - MA	95	-14%
J2R - MA	112	2%
J3R - MA	103	-6%
J4R - MA	102	-8%

La resistencia al impacto ( $-29^{\circ}\text{C}$ ) con el eje de la muesca en la ZAC de las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R presentan valores de 307, 277, 270, 275 y 287  $\text{J}/\text{cm}^2$  respectivamente para un valor del parámetro “P” = 20.26; en un estudio anterior [9] para el mismo acero soldado (sin reparación) con el mismo valor del parámetro “P”, se obtuvo un valor de resistencia al impacto  $\sim 350 \text{ J}/\text{cm}^2$  (a  $+20^{\circ}\text{C}$ ). La diferencia de los valores de resistencia al impacto con los obtenidos en estudios previos, puede explicarse por la diferencia de temperaturas en la realización del ensayo de impacto Charpy V (a bajas temperaturas el acero disminuye su resistencia al impacto).

La resistencia al impacto (a  $-29^{\circ}\text{C}$ ) con la muesca en el MA de las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R presentan valores de 110, 95, 112, 103 y 102  $\text{J}/\text{cm}^2$  respectivamente para un valor del parámetro “P” = 20.26”; en un estudio anterior [9], para el mismo acero soldado (sin reparación) con el mismo valor del parámetro “P”, se obtuvo valores de resistencia al impacto en el MA de 170  $\text{J}/\text{cm}^2$  (a  $0^{\circ}\text{C}$ ) y 188  $\text{J}/\text{cm}^2$  (a  $+20^{\circ}\text{C}$ ); en otro estudio anterior [28], para el mismo acero soldado (sin reparación) con el mismo valor del parámetro “P”, se obtuvo un valor de resistencia al impacto en el MA de  $\sim 190 \text{ J}/\text{cm}^2$ . La diferencia de los valores de resistencia al impacto con los obtenidos en estudios previos, se puede explicar por la diferencia de temperaturas en la realización del ensayo de impacto Charpy V y por la metodología/proceso/técnica de fabricación de los metales de aporte de los estudios anteriores y de la presente tesis.

Como se aprecia en la figura 3.32 y tabla 3.23, la resistencia al impacto de las juntas J1R, J2R, J3R y J4R no evidencia una variación significativa en comparación con la resistencia al impacto de la junta J1 (junta soldada sin reparación) en la ZAC y MA, sin embargo, realizando la comparación entre la ZAC y MA por junta, se aprecia que los valores de resistencia al impacto en la ZAC son mayores considerablemente que en el MA (figura 3.32 y tabla 3.23). La diferencia de valores de resistencia al impacto entre la ZAC y el MA, se puede explicar principalmente, debido a que en la ZAC el tamaño de grano en promedio es menor que en el MA (figuras 3.5 y 3.6 para J1, figura 3.33 para J1R, figura 3.34 para J2R,

figura 3.13 para J3R y figura 3.17 para J4R); el fundamento físico se debe a que las dislocaciones se desplazan con mayor libertad en los bordes de *grano grueso* que en los de *grano fino*, ya que requieren menos energía para que las dislocaciones salten las imperfecciones en los bordes de *grano grueso*.

### **3.4.3 Análisis Metalográfico de las Juntas con Repetidas Reparaciones**

En las figuras 3.5 y 3.6, figura 3.33, figura 3.34, figura 3.13 y figura 3.17 se muestran las microestructuras de la junta J1 (sin reparación), J1R, J2R, J3R y J4R respectivamente.

Las microestructuras de las juntas J1, J1R, J2R, J3R y J4R son similares, las cuales consisten principalmente de: en el MA se observa una matriz de granos de ferrita de forma irregular, martensita revenida (la martensita tipo listón observada en la figura 3.2 ya no está presente) y con presencia de carburos de diferente dispersión; en la ZAC se observa una matriz de granos de ferrita con límites de grano no bien definidos, con productos de transformación diferentes a la martensita (debido a los diferentes valores/ciclos de temperatura a la que ha sido sometido la ZAC) y con presencia de carburos de diferente dispersión. En un estudio anterior de Vigantas Kumšlytis [9], se aprecia la presencia de carburos dispersos a una escala de 20  $\mu\text{m}$  para el mismo acero soldado (sin reparación) para un valor del parámetro de 20.46 (cercano al parámetro de 20.26 utilizado). En otro estudio anterior de Hans-Olof Andrrn [30], las microestructuras principales reportadas coinciden con lo obtenido.

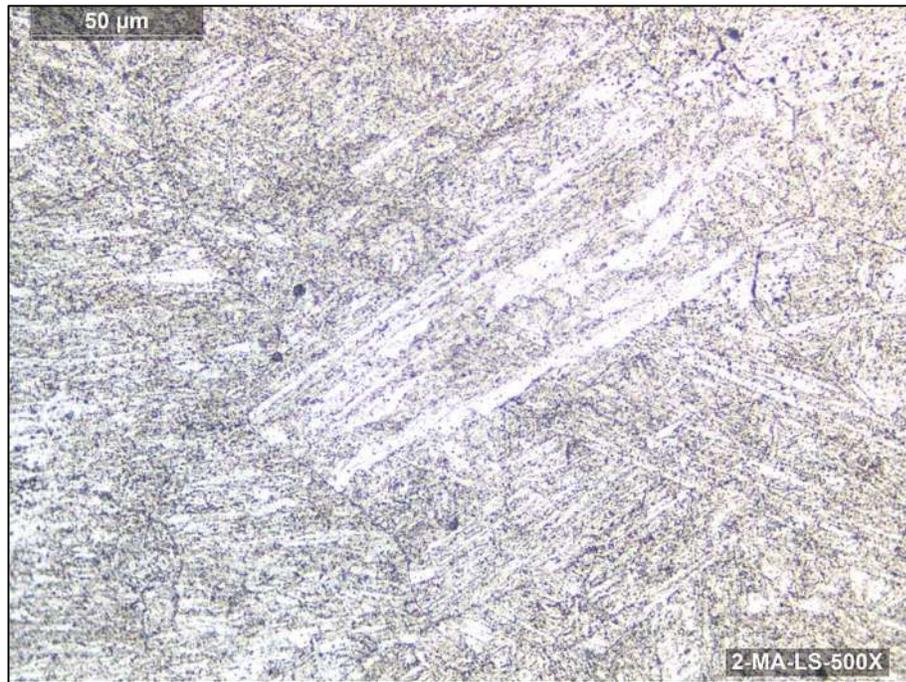


Figura 3.33a

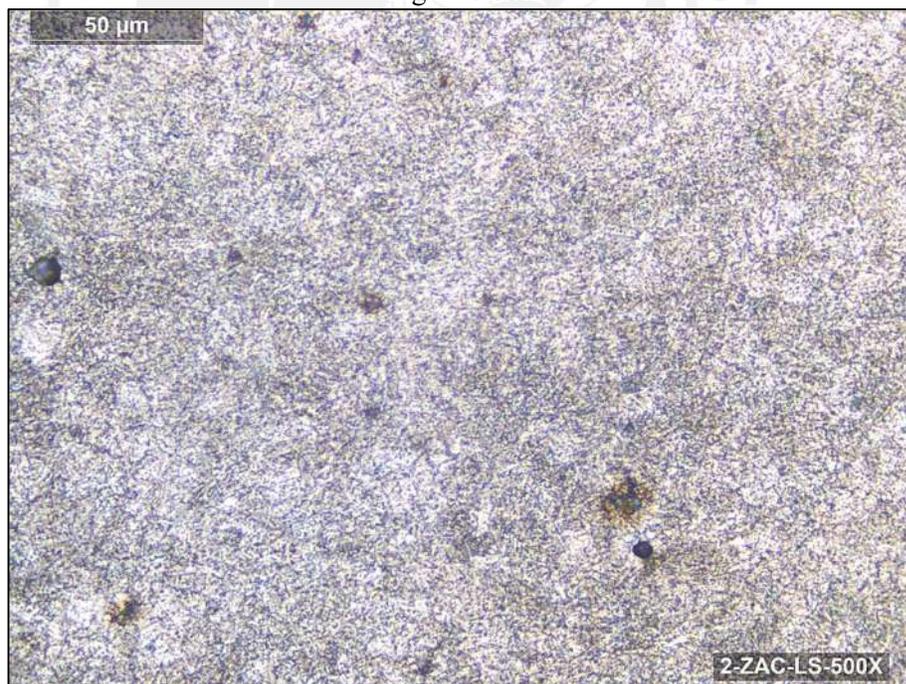


Figura 3.33b

Figura 3.33. Microestructuras de la junta J1R a 500X: metal de aporte (MA), figura 3.33a; zona afectada por el calor (ZAC), figura 3.33b

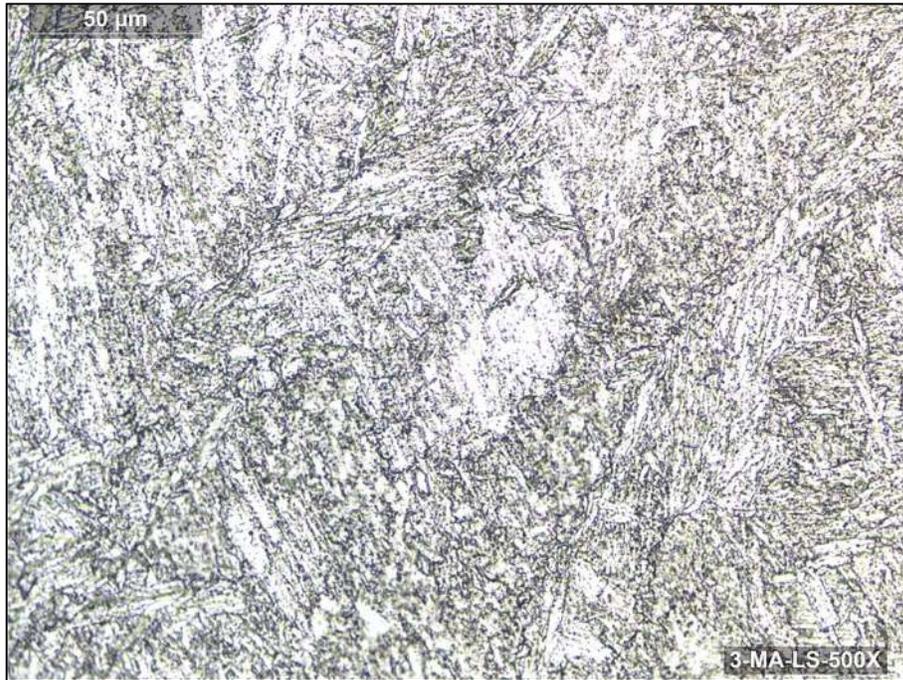


Figura 3.34a

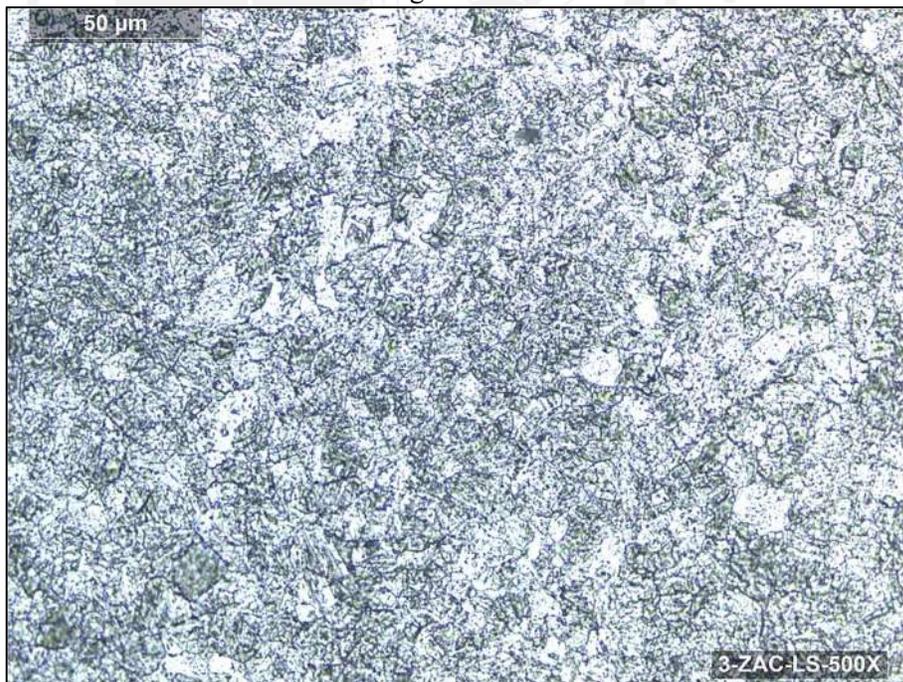


Figura 3.34b

Figura 3.34. Microestructuras de la junta J2R a 500X: metal de aporte (MA), figura 3.34a; zona afectada por el calor (ZAC), figura 3.34b

## CONCLUSIONES

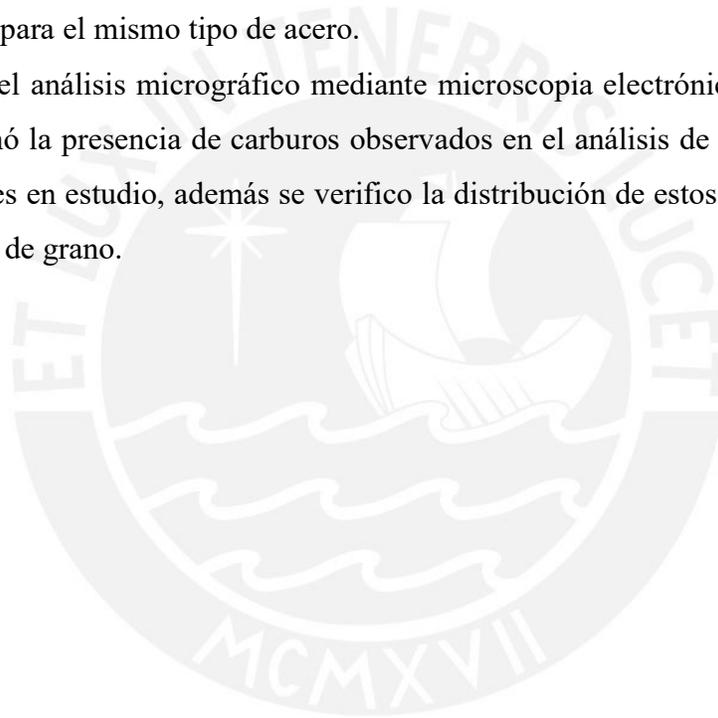
1. La configuración óptima del tratamiento térmico para las juntas soldadas con tres y cuatro reparaciones del acero ASTM A335 (*de acuerdo a los datos obtenidos, los cupones con tres y cuatro reparaciones presentan valores de dureza, resistencia al impacto y microestructura similares*) es cuando el parámetro “P” = 20.26, además su microestructura es favorable ya que presenta principalmente una matriz de ferrita con carburos dispersos aleatoriamente tanto en el borde y dentro de los granos.
2. La configuración del tratamiento térmico para las juntas soldadas con tres y cuatro reparaciones (*de acuerdo a los datos obtenidos, los cupones con tres y cuatro reparaciones presentan valores de dureza, resistencia al impacto y microestructura similares*) con tratamiento térmico antes (950°C por 2h) y después (725°C por 2h) de la soldadura *es aceptable*, ya que los valores de dureza, resistencia al impacto y microestructura en la ZAC y MA son cercanos a lo obtenido en el “cupón soldado sin reparar”, inclusive la resistencia al impacto se ha incrementado; no obstante se debe considerar lo siguiente:
  - a) De acuerdo a lo obtenido en el capítulo 3; hay una disminución considerable en la dureza en el MB con respecto a lo obtenido en el “cupón soldado sin reparar”, esta disminución de dureza es explicada por la microestructura blanda que presenta (ferrita + perlita gruesa) debido al tratamiento térmico aplicado antes de la soldadura; según lo indicado en la especificación ASTM A335 el tratamiento térmico final del acero en estado virgen puede ser “recocido total” o “normalizado+revenido”, en este el primer tratamiento térmico final concuerda con la microestructura obtenida.
  - b) El acero no debe fallar en el metal base durante un ensayo de tracción (ASTM A350-15), a un valor menor a la resistencia a la tracción mínima especificada (60 ksi [415 MPa], según QW-422 ASME Sección IX).
  - c) Se requiere mayores recursos y tiempo para ejecutar los tratamientos térmicos antes y después de la soldadura.

Esta conclusión se puede extender a aceros ASTM A335 Gr. P5 que han presenten altas durezas, altas tensiones internas residuales, varias reparaciones (más de cuatro), o que hayan sido expuestos en servicio periodos de tiempo prolongados.

3. La configuración del tratamiento térmico para las juntas soldadas con tres y cuatro reparaciones del acero ASTM A335 (*de acuerdo a los datos obtenidos, los cupones con tres y cuatro reparaciones presentan valores de dureza, resistencia al impacto y microestructura similares*) con parámetro “P” = 21.79 *no es aceptable a pesar de que los valores de dureza y energía absorbida están dentro del criterio de aceptación de los códigos de construcción (ejem. ASME B31.3)*, ya que la dureza y la resistencia al impacto presentan disminuciones considerables con respecto a lo obtenido en el “cupón soldado sin reparar”; en estudios anteriores [9], [26], [28], se concluyó que el parámetro “P” no debe exceder de 20.5, ya que empiezan a degradarse la microestructura (los carburos diseminados se empiezan a coagular en los bordes de grano).
4. La configuración del tratamiento térmico para las juntas soldadas con tres y cuatro reparaciones del acero ASTM A335 (*de acuerdo a los datos obtenidos, los cupones con tres y cuatro reparaciones presentan valores de dureza, resistencia al impacto y microestructura similares*) con WPHT a 950°C *no es aceptable*, ya que la dureza y la resistencia al impacto presentan disminuciones severas con respecto a lo obtenido en el “cupón soldado sin reparar” y no cumple con los requerimientos de dureza máxima permitida (248 HV) y mínima energía absorbida en el ensayo charpy V (para un espécimen – 14J y para el promedio de tres especímenes - 18J), además su microestructura es frágil debido al incremento en el tamaño de grano (presenta los mayores tamaños de granos obtenidos en la presente tesis) y los carburos coagulados formando colonias en los bordes de grano. Cabe mencionar que la microestructura obtenida presenta una microestructura similar a la obtenida en tuberías expuestas en servicio [26], sin haber estado ninguna hora en servicio.
5. Se concluye que las juntas soldadas del acero aleado ASTM A335 Gr. P5, pueden ser reparadas hasta cuatro veces, con PWHT con parámetro “P” = 20.26 aplicado desde la primera hasta la cuarta reparación, debido a que no se obtuvo disminuciones severas en

la dureza, resistencia al impacto y microestructura comparado con los resultados obtenidos en el “cupón soldado sin reparar”.

6. Se verifico que el metal base en estado virgen (sin haber estado en servicio) usado en la soldadura de los cupones cumple con los requerimientos de la especificación ASTM A335, con respecto a la composición química y el tratamiento térmico de acabado.
7. Se verifico que los valores de dureza HV, resistencia al impacto y microestructura del “cupón soldado sin reparar” son consistentes con los valores obtenidos en estudios anteriores para el mismo tipo de acero.
8. Mediante el análisis micrográfico mediante microscopia electrónica de barrido (SEM), se confirmó la presencia de carburos observados en el análisis de la microestructura de los cupones en estudio, además se verifico la distribución de estos carburos dentro y en los bordes de grano.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Piping Material Classification. “Piping Class Index of PMRT (Proyecto Modernización Refinería Talara)”.
- [2] J. N. Mohapatra, A. K. Panda, M. K. Gunjan, N. R. Bandyopadhyay, A. Mitra, and R. N. Ghosh, “Ageing behavior study of 5Cr-0.5Mo steel by magnetic Barkhausen emissions and magnetic hysteresis loop techniques” (2006), *NDT E Int.*, vol. 40, no. 2, pp. 173–178.
- [3] Creep Properties of Heat Resistant Steels and Superalloys. *Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 87–89.
- [4] The American Society of Mechanical Engineers. (2015). “*Process Piping ASME B31.3-2014*”. Printed in USA
- [5] The American Society of Mechanical Engineers. (2016). “*Process Piping ASME B31.3-2016*”. Printed in USA
- [6] ExxonMobile Development Company. (2010). “*Welding Procedures GP 18-07-01 versión 3.0.0*”.
- [7] V. Kumslytis, A. V. Valiulis, and O. Cernasejus, “The Influence of Temperature-Time Parameter of Welded Joints Thermal Treatment on Strength-Related Characteristics of Chromium-Molybdenum and Low-Alloy Manganese Steels” (2007), *MATERIALS SCIENCE*, vol. 13, no. 2, pp. 1392-1320
- [8] ASM HANDBOOK. 10<sup>th</sup> edition. *Volumen I Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys and Low - Alloy Steels*”. ASM INTERNATIONAL
- [9] A. V. Valiulis, O. cernasejus, and V. Kumslytis, “Effect of PWHT on the Mechanical Properties of P5 Steel Welded Joints” (2010), *Mechatron. Syst. Mater. Mater. Prod. Technol.*, vol. 165, no. 0, pp. 104–109.
- [10] American Petroleum Institute. (2019). “*API 582 2<sup>nd</sup> edition - Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries*”.
- [11] TR (TECNICAS REUNIDAS). (2014). “*REQUISITOS DE CALIDAD PARA SUBCONTRATISTAS (PP-0270-I-203-Att01 Rev 01)*”.
- [12] The American Society of Mechanical Engineers. (2017). “*ASME IX 2017 Edition - Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operatos*”. Printed in USA
- [13] S. H. Avner. (1974). “*Introduction to Physical Metallurgy 2<sup>nd</sup> edition Edition*”.
- [14] G. F. Vander Voort. (1991). “*Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels*”. Printed in USA
- [15] ASTM International. (2015). “*A335/A335M - 15a Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service*”.
- [16] F. Carlos. (2003). “*Introducción a la Metalurgia de la Soldadura*”. Pontificia Universidad Católica del Perú

- [17] American Welding Society. (1996). “ANSI/AWS D10.8-96 Recommended Practices for Welding of Chromium-Molybdenum Steel Piping and Tubing”.
- [18] J. Hilkes and V. Gross, “Welding CrMo steels for power generation and petrochemical applications - past, present and future” (2013), *Biul. Inst. Spaw.*, 2013(2), pp. 11–22.
- [19] ASM HANDBOOK. (1993). “*Volumen 6 Welding Brazing and Soldering*”.
- [20] S. Tang, T. F. Guo, and L. Cheng, “Modeling hydrogen attack effect on creep fracture toughness” (2011), *Int. J. Solids Struct.*, vol. 48, no. 20, pp. 2909–2919.
- [21] ASM HANDBOOK. (1991), “*Volume 4 Heat Treatment*”.
- [22] M. Clerge, C. Boucher, S. Pillot, P. Balladon, P. Bourges, and a Bertoni, “Optimisation of intermediate heat treatments and stress relief of CrMoV steels” (2005), *Weld. Int.*, vol. 19, no. 11, pp. 888–893.
- [23] ExxonMobile Development Company. (2008). “*Additional Requirements for Materials GP 18-10-01 versión 4.0.0.*”.
- [24] NACE STANDARD. (2012). “MR0103-2012 *Standard Material Requirements Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments*”.
- [25] ASTM International. (2012). “E140 -12b<sup>e1</sup> Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness”.
- [26] V. Kumslytis, R. Skindaras, and A. V. Valiulis, “The structure and properties of 5% Cr-0.5% Mo steel welded joints after natural ageing and post-weld heat treatment” (2012), *Medziagotyra*, vol. 18, no. 2, pp. 119–122.
- [27] O. E. Vega, J. M. Hallen, A. Villagomez, and A. Contreras, “Effect of multiple repairs in girth welds of pipelines on the mechanical properties” (2008) *Mater. Charact.*, vol. 59, no. 10, pp. 1498–1507.
- [28] V. Kumslytis, A. V. Valiulis, and O. Cernasejus, “The strength-related characteristics of chromium-molybdenum P5 steel dependence on postweld heat treatment parameters” (2008), *Mechanika*, vol. 71, no. 3, pp. 27–30.
- [29] S. P. Hong, S. Il Kim, T. Y. Ahn, S. T. Hong, and Y. W. Kim, “Effects of extended heat treatment on carbide evolution in Cr-Mo steels” (2016), *Mater. Charact.*, vol. 115, pp. 8–13.
- [30] H. O. Andrén, G. Cai, and L. E. Svensson, “Microstructure of heat resistant chromium steel weld metals” (1995), *Appl. Surf. Sci.*, vol. 87–88, no. C, pp. 200–206.
- [31] ASM HANDBOOK. (2004), “Volume 9 Metallography and Microstructures 2004.”
- [32] ASTM International. (2016). “ASTM E23-16b: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”.
- [33] I. Standard. ISO 14556 (2000). “Steel - Charpy V-notch pendulum impact test - Instrumented test method”.
- [34] ASTM International. (2017). “E3-11 (Reapproved 2017) Standard Guide for Preparation of

Metallographic Specimens”.

- [35] ASTM International. (2016). “ASTM E-407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”.
- [36] E.I. Galindo-Nava, P.E.J. Rivera-Díaz-del-Castillo, “Understanding the factors controlling the hardness in martensitic steels” (2015), *Scripta Materialia*.
- [37] C. J. Moss and P. M. Kelly, “THE MECHANISMS AND DETECTION OF EMBRITTLEMENT IN Cr-Mo PRESSURE VESSEL STEELS” (1994), *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 17, no. 3, pp. 369–380.



## ANEXOS

## Anexo 1.1: Hoja técnica del metal de aporte E8018-B6

<b>SOLDEXA</b>	<b>CERTIFICADO DE CALIDAD DE PRODUCTO</b>				<b>CC-F-42</b>	
					<b>Edición: 03</b>	

Producto: CHROMOCORD 302      Clasificación: E 8018 - B6  
 Lote de Producción: 05-00-2017E20322-82      Especificación: AWS A5.5  
 Fecha de Emisión: 19/06/2017      Diámetro: 3.25 mm

Mediante el presente documento se certifica que el producto indicado en el lote referido es de la misma clasificación, proceso de fabricación, y los requisitos de materiales como el material que se utilizó para una prueba, cuyos resultados se muestran a continuación. Este producto ha sido fabricado bajo el sistema de calidad de SOLDEX S.A. el cual cumple con los requerimientos de la Norma ISO 9001 y los ensayos sobre el metal depositado han sido realizados de acuerdo a las Normas Técnicas Internacionales aplicables.

**Composición Química - EN 10204 : 2006 TYPE 3.1**

Especificación [%]									
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Nb	Cu
0.05 - 0.10	4.00 - 6.00	Max. 0.40	0.45 - 0.65	Max. 1.00	Max. 0.90	Max. 0.03	Max. 0.03	----	----
Otros	----								
Metal Depositado / Alambre Sólido [%]									
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Nb	Cu
0.06	5.00	< 0.40	0.50	0.90	0.30	Max. 0.020	< 0.030	----	----
Otros	----								

**Propiedades Mecánicas - Tracción - EN 10204 : 2006 TYPE 2.1**

Especificación				
Gas de Protección	Condición de Prueba	Resistencia a la Tracción [Mpa]	Limite de Fluencia [Mpa]	Elongación [%]
----	Tratamiento térmico	550	460	19
Metal Depositado				
Gas de Protección	Condición de Prueba	Resistencia a la Tracción [Mpa]	Limite de Fluencia [Mpa]	Elongación [%]
----	Tratamiento térmico	600 - 700	> 460	> 19

**Propiedades Mecánicas - Impacto**

Especificación					
Gas Protección	Condición de Prueba	Temperatura [°C]	Valores Individuales [J]	Valor Promedio [J]	Tipo de Ensayo
----	Después de Soldado	----	----	----	----
Metal Depositado					
Gas Protección	Condición de Prueba	Temperatura [°C]	Valores Individuales [J]	Valor Promedio [J]	Tipo de Ensayo
----	Después de Soldado	----	----	----	----

**Otras Pruebas**

Inspección Radiográfica	Prueba de Soldadura en Filete			Otros
Conforme	Vertical	Conforme	Sobrecabeza	Conforme
				----



**Ing. Ronald Requejo V.**  
SOLDEX S.A.

## Anexo 1.2: Hoja técnica del metal de aporte ER80S-B6

<b>SOLDEXA</b>	<b>CERTIFICADO DE CALIDAD DE PRODUCTO</b>		<b>CC-F-42</b>		
			Edición: 03		

**Producto:** TIGFIL ER80S-B6 2.40mm 4.54kg      **Clasificación:** ER80S - B6  
**Lote producción:** 21-06-2016E50287-01      **Especificación:** AWS A5.28  
**Fecha emisión:** 22/06/2016      **Diámetro:** 2.40 mm

Mediante el presente documento se certifica que el producto indicado en el lote referido es de la misma clasificación, proceso de fabricación, y los requisitos de materiales como el material que se utilizó para una prueba, cuyos resultados se muestran a continuación. Este producto ha sido fabricado bajo el sistema de calidad de SOLDEX S.A. el cual cumple con los requerimientos de la Norma ISO 9001 y los ensayos sobre el metal depositado han sido realizados de acuerdo a las Normas Técnicas Internacionales aplicables.

**Composición Química**

Especificación [%]									
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Nb	Cu
Máx. 0.10	4.50 - 6.00	Máx. 0.60	0.45 - 0.65	0.40 - 0.70	Máx. 0.50	Máx. 0.025	Máx. 0.025	----	Máx. 0.35
Otros	----								

Metal Depositado / Alambre Sólido [%]									
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Nb	Cu
0.08	5.82	0.07	0.54	0.51	0.40	0.006	0.007	----	0.04
Otros	----								

**Propiedades Mecánicas - Tracción**

Especificación				
Gas de Protección	Condición de Prueba	Resistencia a la Tracción Min [MPa]	Límite de Fluencia Min [MPa]	Elongación Min [%]
Ar / 1 - 5% O2	PWHT = 745 +/- 15	550	470	17

Metal Depositado				
Gas de Protección	Condición de Prueba	Resistencia a la Tracción [MPa]	Límite de Fluencia [MPa]	Elongación [%]
Ar / 1 - 5% O2	PWHT = 745 +/- 15	590	500	20

**Propiedades Mecánicas - Impacto**

Especificación					
Gas de Protección	Condición de Prueba	Temperatura [°C]	Valores Individuales [J]	Valor Promedio [J]	Tipo de Ensayo
----	----	----	----	----	----

Metal Depositado					
Gas de Protección	Condición de Prueba	Temperatura [°C]	Valores Individuales [J]	Valor Promedio [J]	Tipo de Ensayo
----	----	----	----	----	----

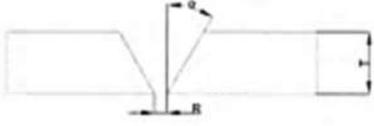
**Otras Pruebas**

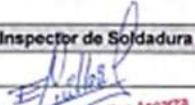
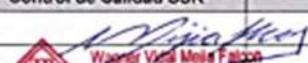
Inspección Radiográfica	Prueba de Soldadura en Filete			Otros
Conforme	Vertical:	----	Sobrecabeza:	----



Ing. Ronald Requejo V.  
SOLDEX S.A.

## Anexo 1.3: WPS de la empresa “SSK Ingeniería y Construcción SAC”

		REGISTRO		02070-GEN-QUA-SSK-02.11f.02	
		ACTIVIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN		Hoja	4 de 5
ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (Ver QW-200.1, Sección IX of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code)		Revisión	0		
		Fecha	15/05/16		
<b>1.0 IDENTIFICACION</b>		Registro N°: <b>WPS/P5B-P5B/01</b>			
Nombre de la compañía: <b>SSK INGENIERIA Y CONSTRUCCION SAC</b>		Rev. N°:	<b>0</b> Fecha: <b>27/10/2016</b>		
Proceso(s) de soldadura: <b>GTAW+SMAW</b>		Autorizado por:	<b>Ing. Wagner Mejia Falcon</b>		
Tipo: <input checked="" type="checkbox"/> Manual <input type="checkbox"/> Automático <input type="checkbox"/> Maquina <input type="checkbox"/> Semiautomático		PQR SOPORTE N°:	<b>PQR/P5B-P5B/01</b>		
<b>2.0 JUNTA (QW-402)</b>		<b>Detalles de Junta</b>			
Diseño de junta: <b>Junta a Tope en V</b>					
Respaldo: Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>					
Material de respaldo (Tipo): <input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Refractario <input type="checkbox"/> No metálico <input type="checkbox"/> Otro					
Esquema, dibujo de fabricación, símbolos de soldadura o descripción escrita debe mostrar el arreglo general de las partes a ser soldadas. Donde sea aplicable, la apertura de raíz y los detalles de la soldadura deben ser especificados.					
$\alpha = 30^\circ$ $R = 3 \text{ mm}$ $f = 0 \text{ mm}$ $T = \text{ver espesores}$					
<b>3.0 METAL BASE (QW-403)</b>					
N° P: <b>5B</b> Grupo N°: <b>f</b> a N° P: <b>5B</b> Grupo N°: <b>f</b>					
Especificación de tipo y grado o número UNS: <b>ASTM A335 Gr. P5</b>					
A especificación de tipo y grado o número UNS: <b>ASTM A335 Gr. P5</b>					
o indicar					
Análisis químico y propiedades mecánicas: <b>---</b>					
Hasta el análisis químico y propiedades mecánicas: <b>---</b>					
Rango de espesores:					
Metal base: Ranura: <b>5 mm – 25.4 mm</b> Filete: <b>---</b>					
Espesor por pase máx. 5 1/8 in. (13 mm)    Si: <b>3mm</b> No: <b>---</b>					
Otro:					
<b>4.0 METAL DE APORTE (QW-404)</b>					
Especificación N° (SFA)	<b>SFA 5.28</b>	<b>SFA 5.5</b>	<b>---</b>		
AWS N° (Clase)	<b>ER80S-B6</b>	<b>E8016-B6</b>	<b>---</b>		
N° F	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>---</b>		
N° A	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>---</b>		
Tamaño de los metales de aporte	<b>3/32", 1/8"</b>	<b>1/8"</b>	<b>---</b>		
Forma producto metal de aporte	<b>VARILLA SOLIDA</b>	<b>ELECTRODO REVESTIDO</b>	<b>---</b>		
Metal de aporte suplementario	<b>N.A</b>	<b>N.A</b>	<b>---</b>		
Rango de espesor depositado					
Ranura	<b>Hasta 10 mm</b>	<b>Hasta 15.4 mm</b>			
Filete	<b>---</b>	<b>---</b>			
Fundente electrodo (clasificación)	<b>---</b>	<b>---</b>			
Tipo de fundente	<b>---</b>	<b>---</b>			
Fundente nombre comercial	<b>---</b>	<b>---</b>			
Inserto consumible	<b>---</b>	<b>---</b>			
Otro					

		REGISTRO		02070-GEN-QUA-SSK-02.111.02						
		ACTIVIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN		Hoja	5 de 5					
		ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)		Revisión	0					
		(Ver QW-200.1, Sección IX of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code)		Fecha	15/05/16					
Registro N°: <b>WPS/P5B-P5B/01</b>										
<b>5.0 POSICIONES (QW-405)</b>			<b>6.0 TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA (QW-407)</b>							
Posición(es) de ranura: <u>Todas</u>			Rango de temperatura: <u>750 °C</u>							
Progresión: Ascendente <u>X</u> Descendente <u>---</u>			Tiempo: <u>2 horas</u>							
Posición(es) de filete: <u>Todas</u>			Otro: <u>---</u> Tamb. - 300°C libre; 300°C - 750°C 100°C/h; 750°C en 2 hora; 750°C-300°C 100°C/h; 300°C - Tamb libre							
Otro: <u>---</u>			<b>8.0 GAS (QW-408)</b>							
<b>7.0 PRECALENTAMIENTO (QW-406)</b>			Composición Porcentual							
Temp. Pre calentamiento Min.: <u>180° C</u>			Gas(es)							
Temp. Interfase Max.: <u>Min. 180°C y Max. 315°C</u>			Mezcla (%)							
Manten. Pre calentamiento: <u>---</u>			Flujo							
Otro (calentamiento continuo o especial, en caso aplique, debe especificarse): <u>---</u>			Protección: <u>Ar</u>							
			Arrastra: <u>---</u>							
			Respaldo: <u>Ar</u>							
			Otro: <u>---</u>							
<b>9.0 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)</b>										
Corriente: <u>DC (Corriente Continua)</u>		Polaridad: <u>DCSP (GTAW) / DCRP (SMAW)</u>								
Amperaje: <u>Ver Tabla Item 11.0</u>		Voltaje: <u>Ver Tabla Item 11.0</u>								
Aporte de Calor (máx.): <u>---</u>		<u>N.A</u>								
Tamaño y tipo de electrodo de tungsteno: <u>---</u>		<u>3/32" - EWTH-2</u>								
Modo de transferencia en GMAW (FCAW): <u>---</u>		<u>---</u>								
Otro: <u>---</u>										
<b>10.0 TÉCNICA (QW-410)</b>										
Pase ancho o angosto: <u>fer pase angosto, siguientes pases ancho</u>		Orificio o tamaño de protección gaseosa: <u>---</u>								
Limpieza inicial y entre pasadas (escobillado, esmerilado, etc.): <u>Escobillado y/o Esmerilado</u>										
Método de limpieza de raíz: <u>Esmerilado</u>										
Oscilación: <u>Como sea requerida</u>		Distancia de boquilla a pieza de trabajo: <u>3 a 5 mm</u>								
Pase múltiple o simple: <u>Múltiple</u>		Electrodo simple o múltiple: <u>Múltiple</u>								
Espaciado electrodo: <u>---</u>		Martilleo: <u>---</u>								
Otro: <u>Heat input máximo 46.8 KJ/cm</u>										
<b>11.0 PROCEDIMIENTO DE SOLDEO</b>										
Pasos de soldadura	Proceso	Metal de aporte		Corriente - Tipo & Polaridad	Amp. (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/cm)	Calor de aporte (KJ/cm)	Otros	
		Clase	Diám							
1	GTAW	ER90S-B6	3/32"	DCSP	95-120	9-15	50 - 60	8.6 - 21.6	---	
2	GTAW	ER90S-B6	1/8"	DCSP	120-160	10-16	60 - 80	12 - 30.7	---	
3	SMAW	ER9016-B6	1/8"	DCRP	115-130	19-24	40 - 70	18.7 - 46.8	---	
4	SMAW	ER9016-B6	1/8"	DCRP	113-129	19-24	40 - 70	22.6 - 46.4	---	
5	SMAW	ER9016-B6	1/8"	DCRP	102-120	17-24	40 - 70	14.9 - 43.2	---	
<b>12.0 NOTAS / COMENTARIOS / OBSERVACIONES:</b>										
<b>13.0 APROBACIÓN</b>										
Inspector de Soldadura SSK		Control de Calidad SSK								
Nombres y Apellidos										
Fecha		Enrique Guillen Ascarza CWI 15015821 QCT EXP. 1/1/2018				Wagner Vidal Mejia Falcon CWI 11071001 QCT EXP. 7/1/2017				
Firma										

**Anexo 1.4:** Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en el MA de la junta J4R-1

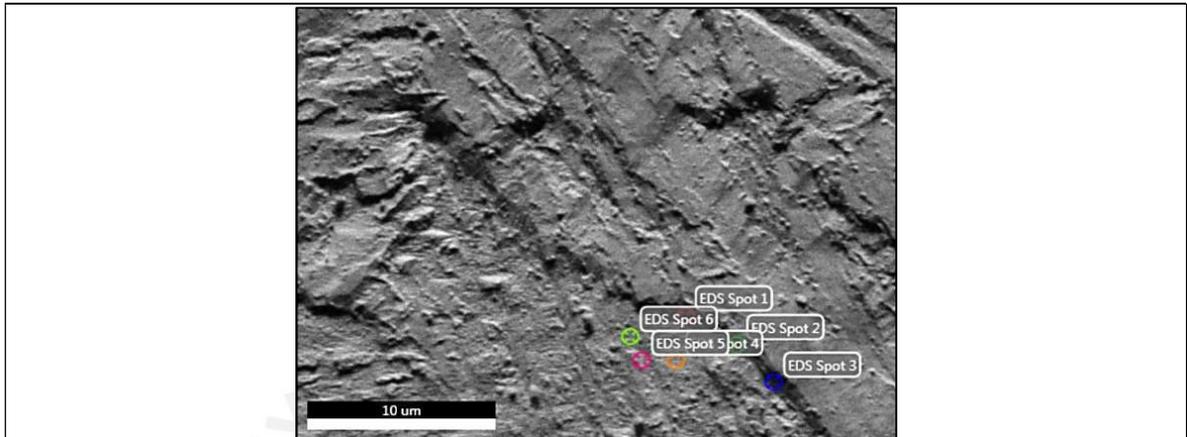


Figura 1.4a

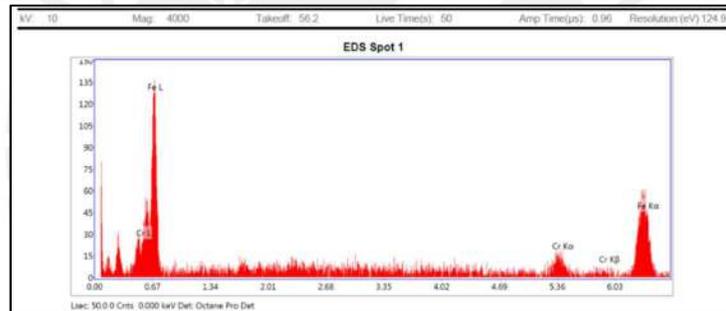


Figura 1.4b

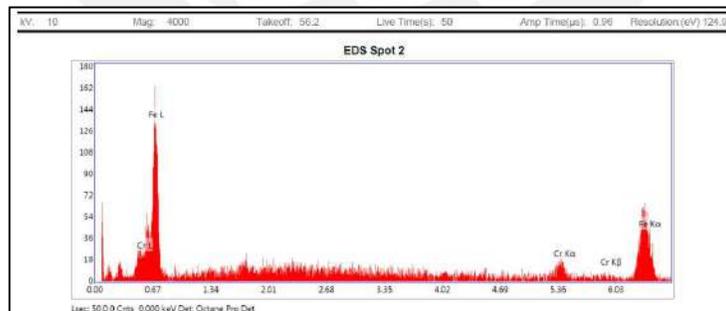


Figura 1.4c

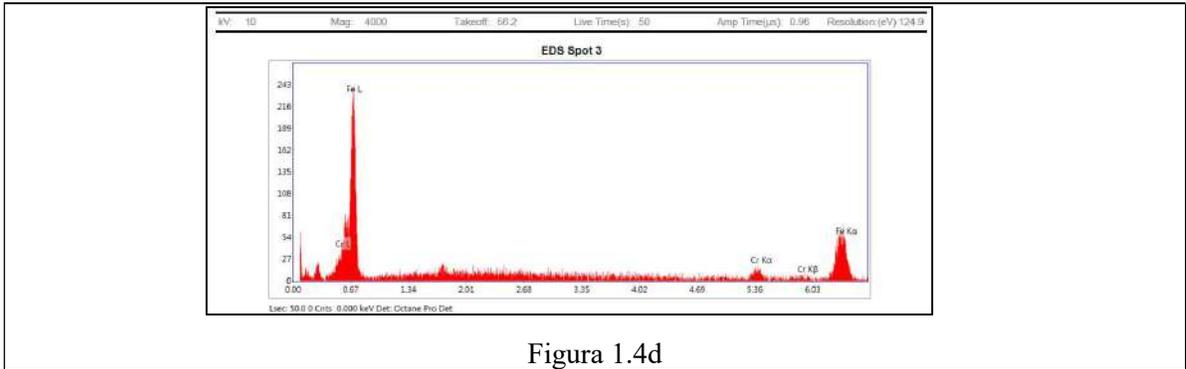


Figura 1.4d

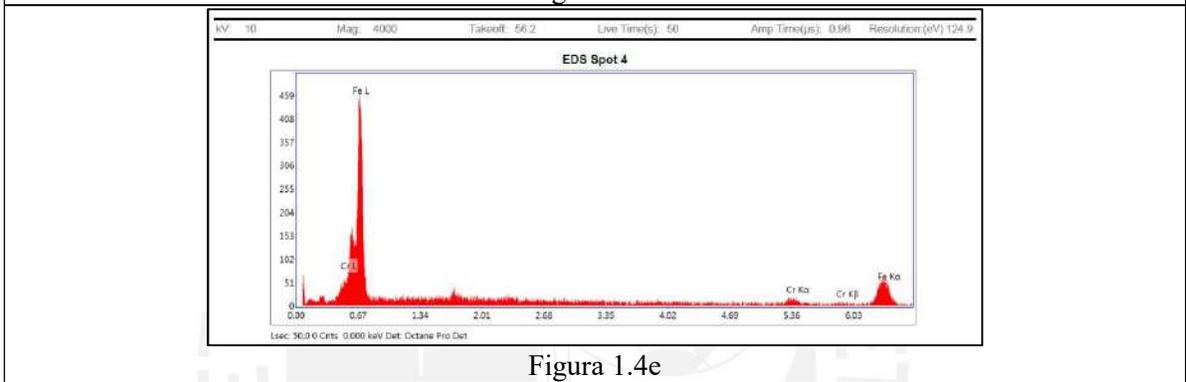


Figura 1.4e

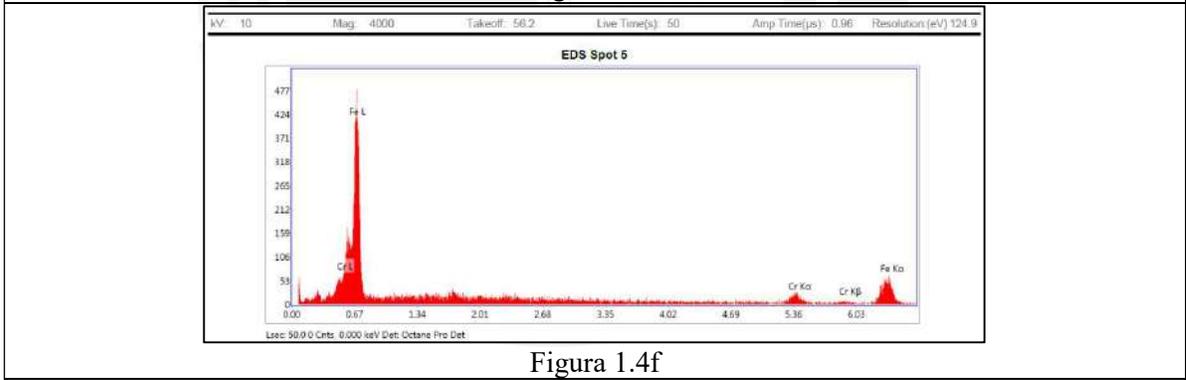


Figura 1.4f

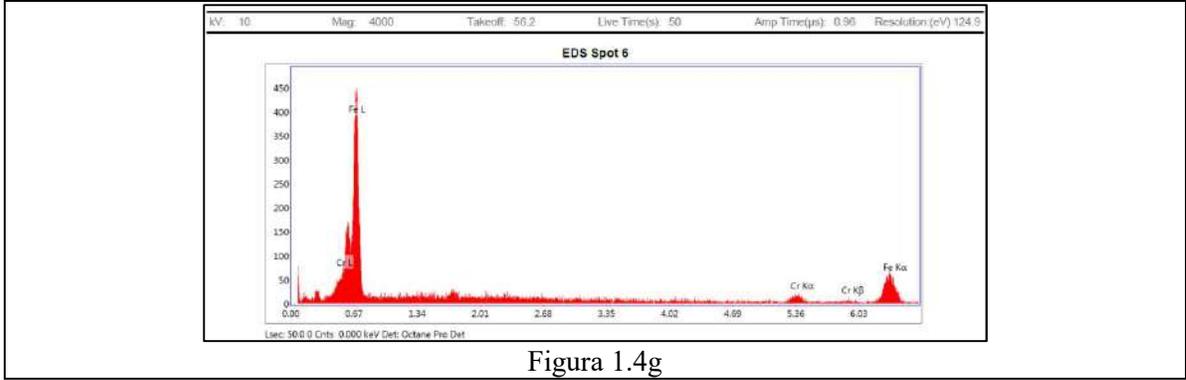


Figura 1.4g

**Anexo 1.5:** Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en la ZAC de la junta J4R-1

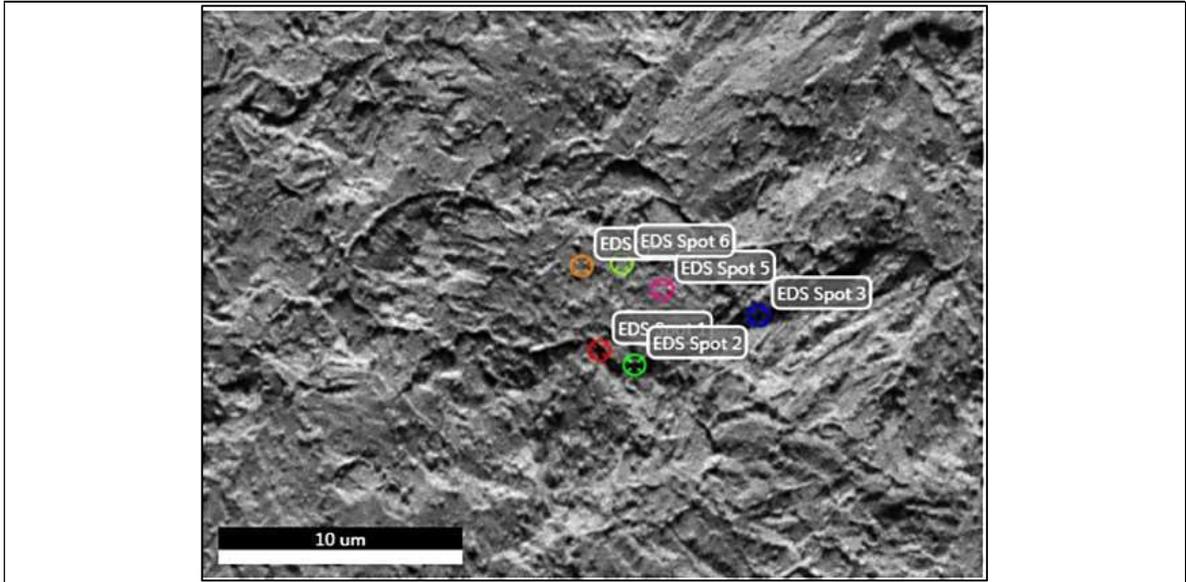


Figura 1.5a

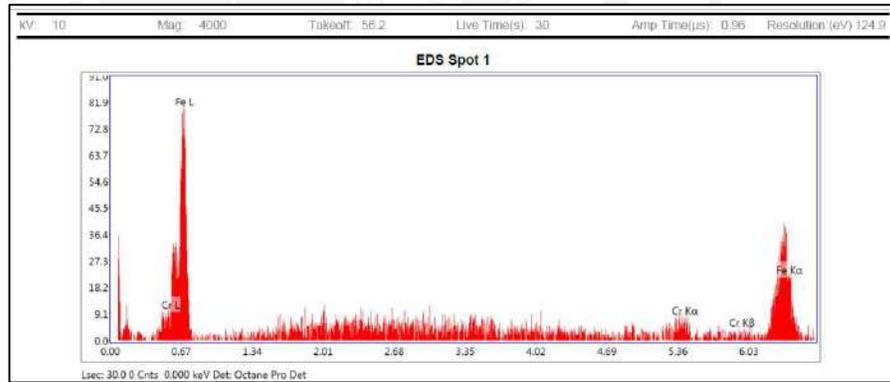


Figura 1.5b

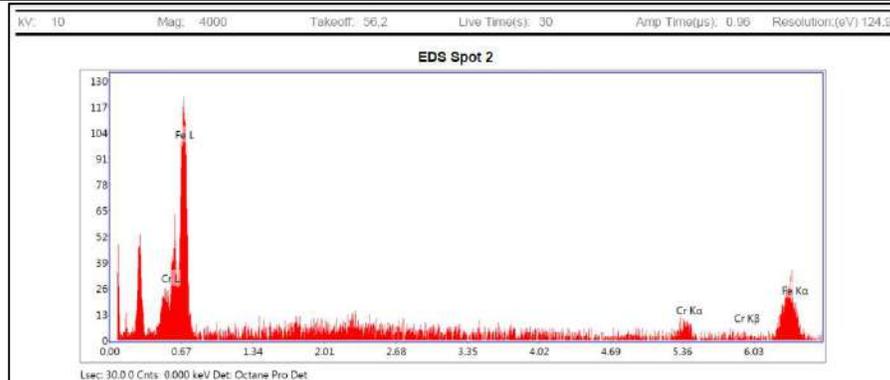


Figura 1.5c

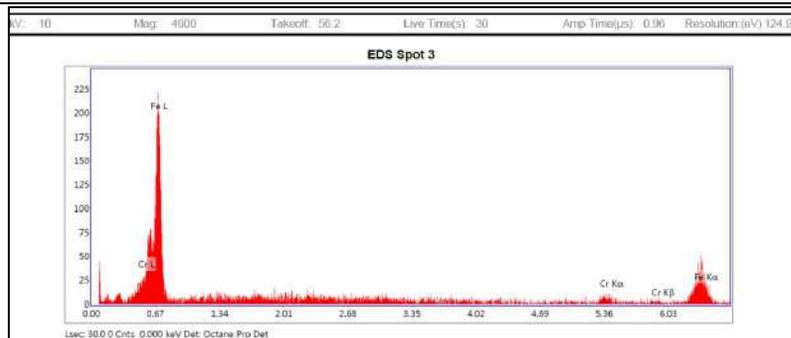


Figura 1.5d

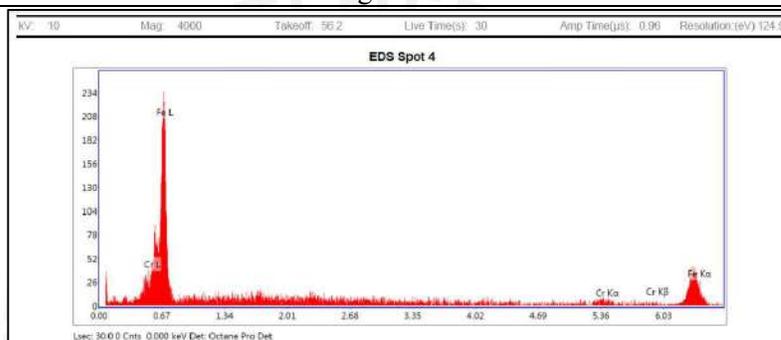


Figura 1.5e

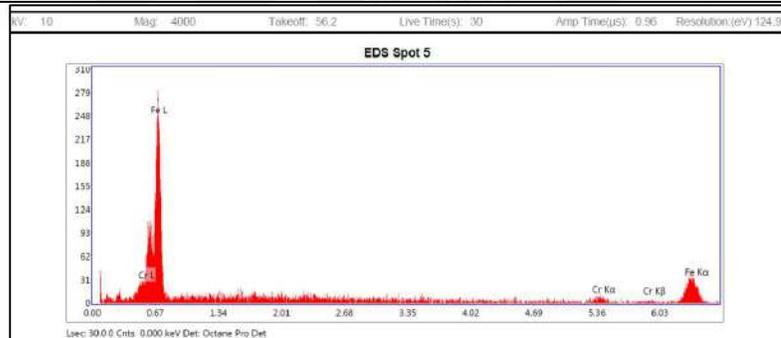


Figura 1.5f

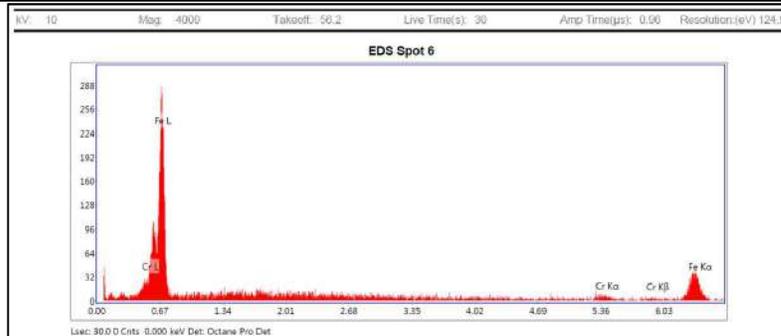


Figura 1.5g

**Anexo 1.6:** Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en el MA de la junta J4R-3

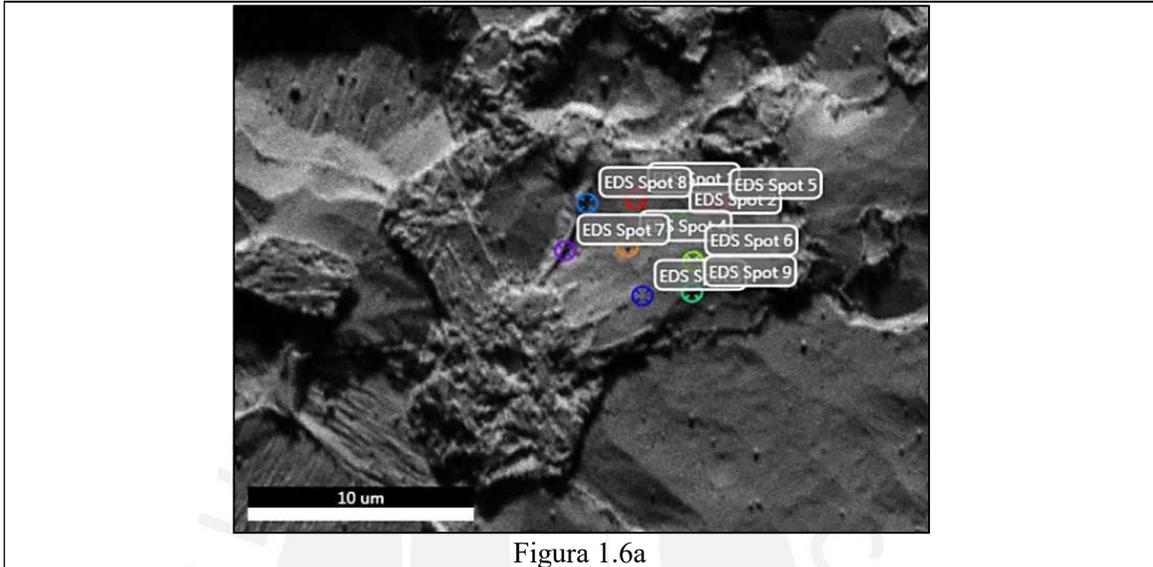


Figura 1.6a

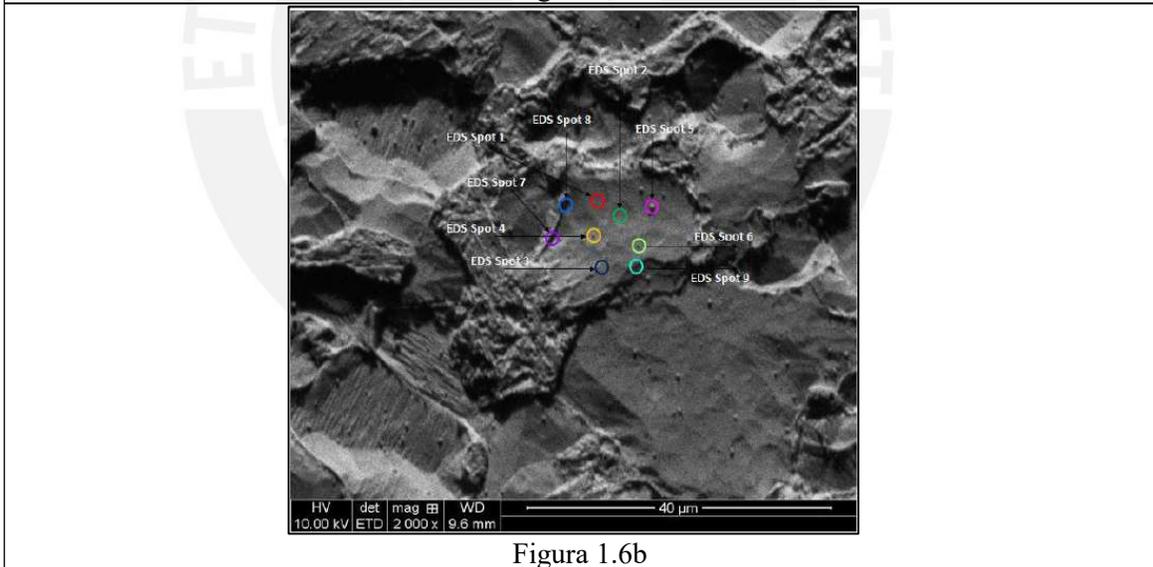


Figura 1.6b

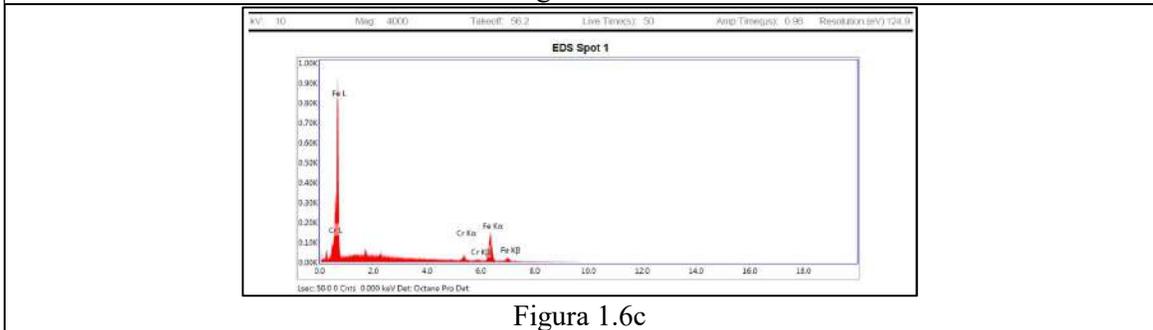


Figura 1.6c

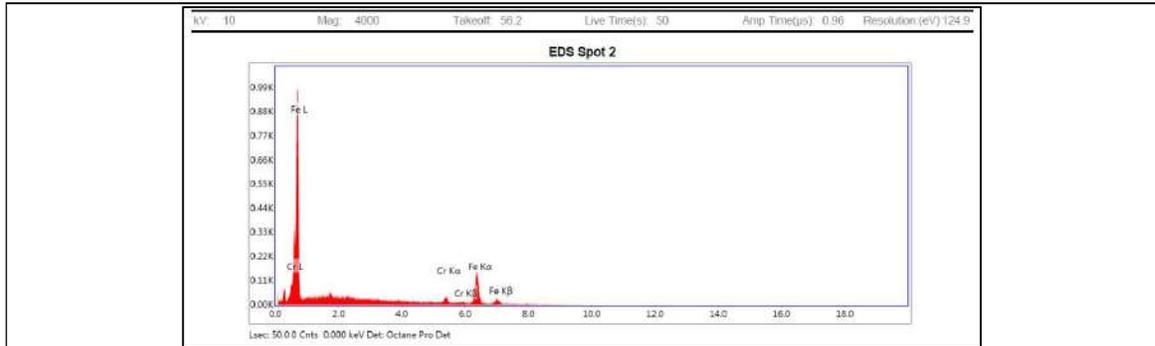


Figura 1.6d

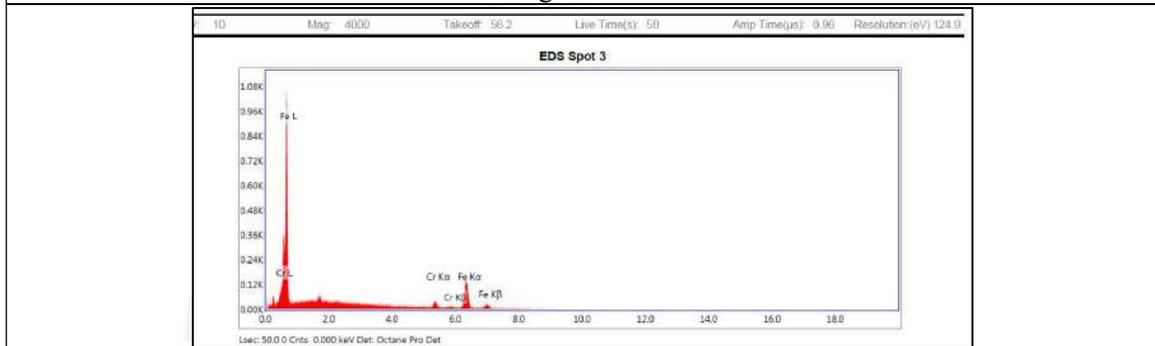


Figura 1.6e

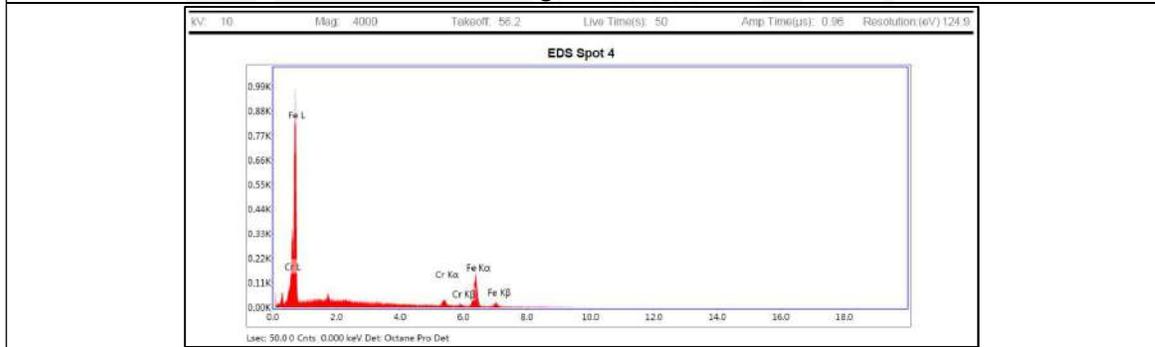


Figura 1.6f

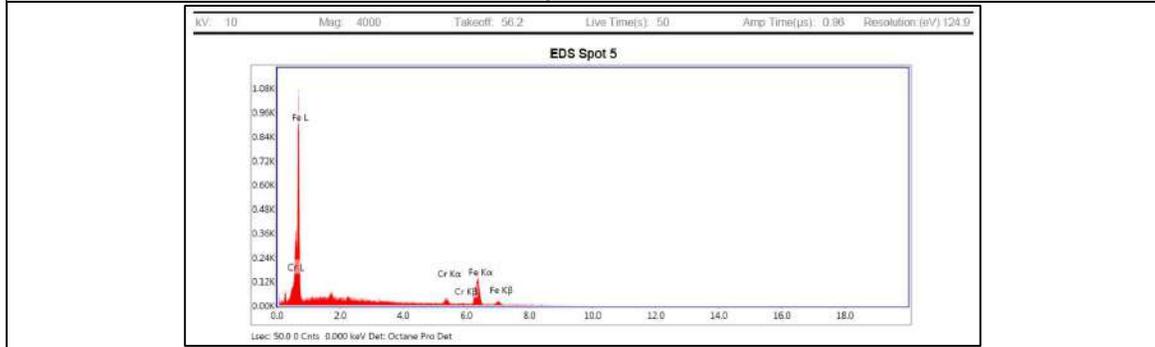


Figura 1.6g

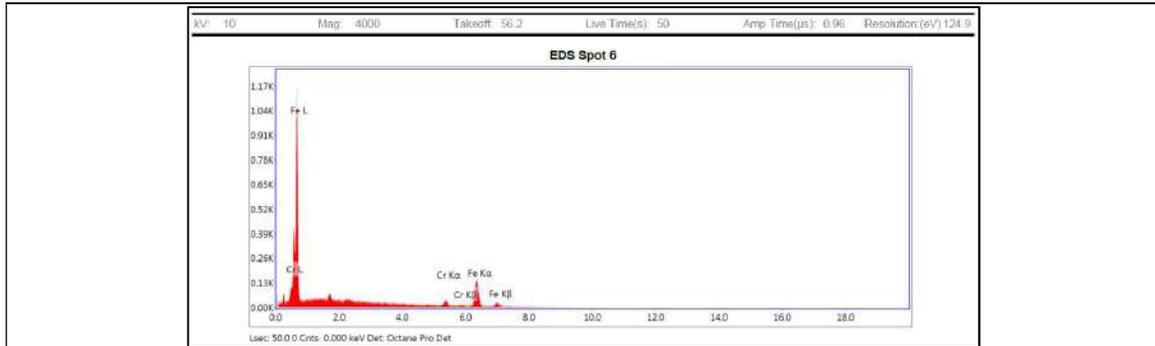


Figura 1.6h

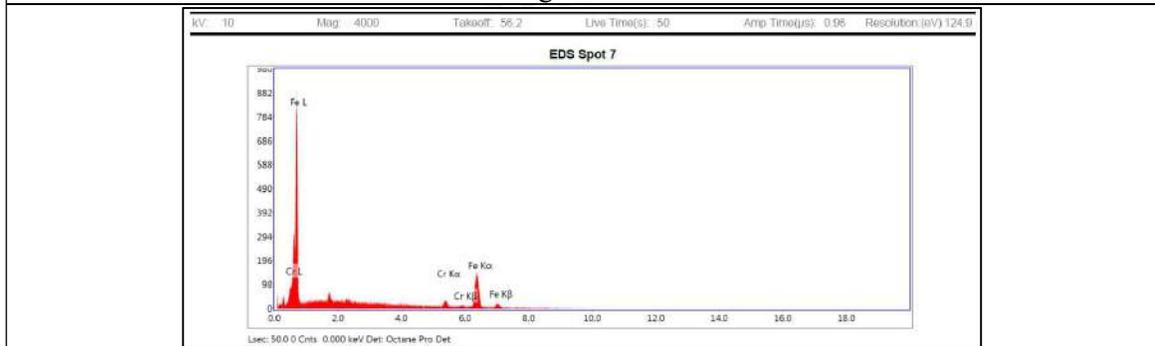


Figura 1.6i

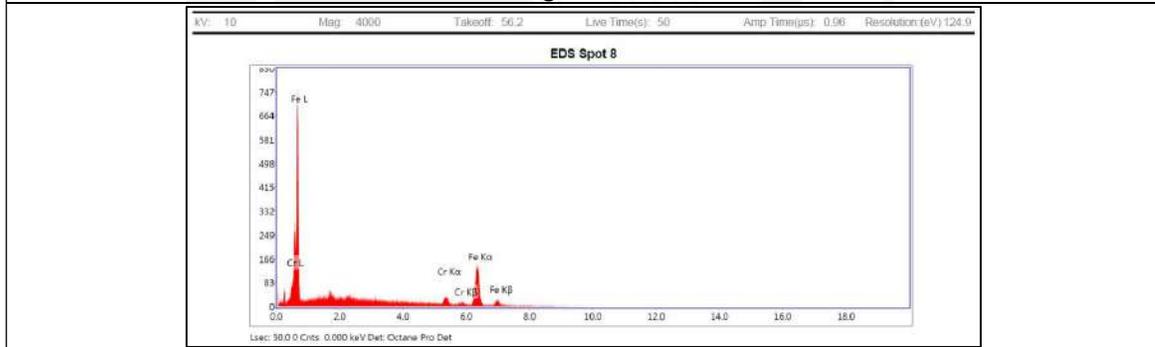


Figura 1.6j

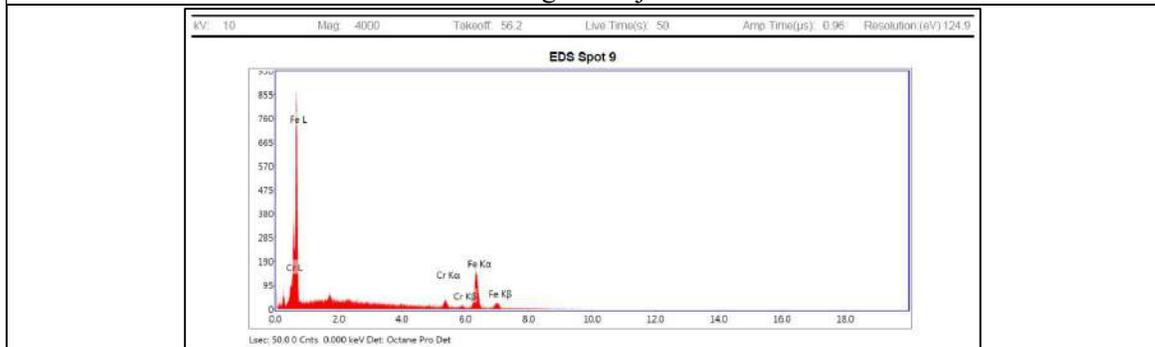


Figura 1.6k

**Anexo 1.7:** Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en la ZAC de la junta J4R-3

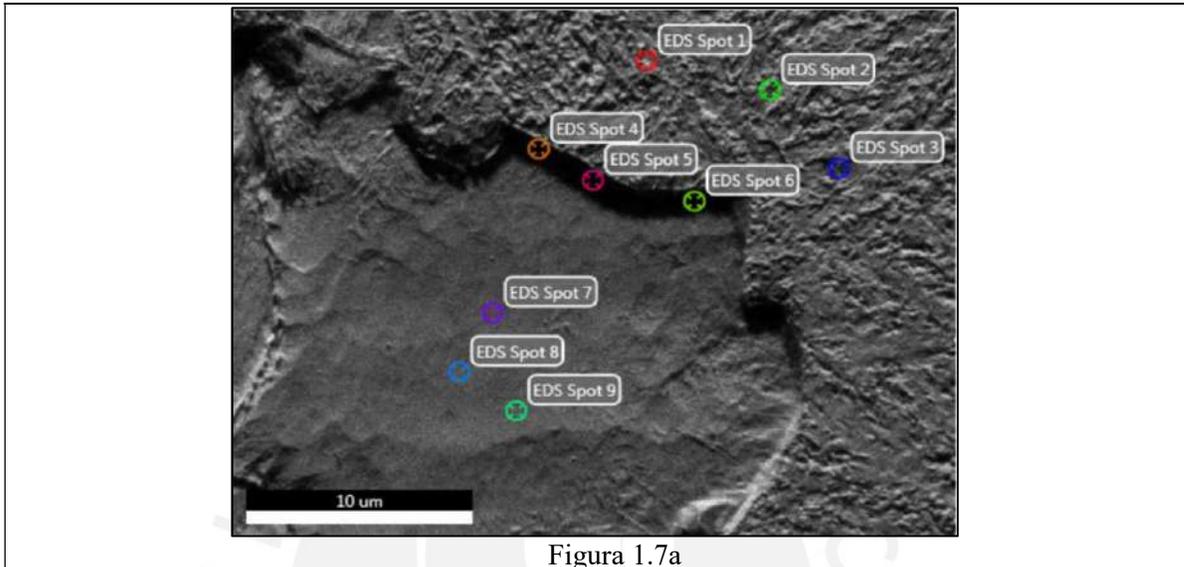


Figura 1.7a

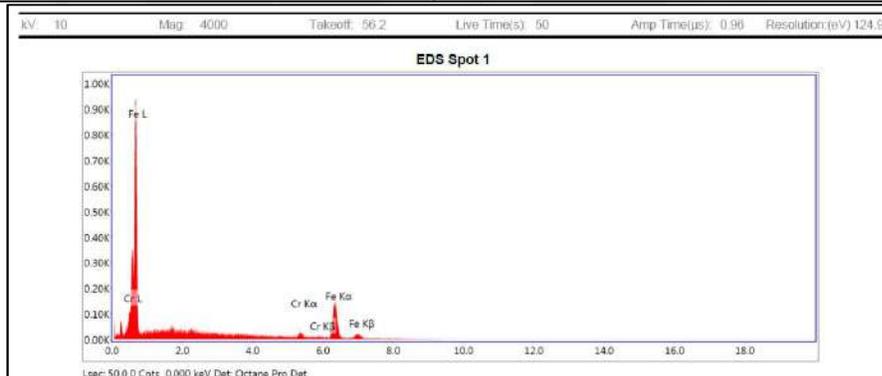


Figura 1.7b

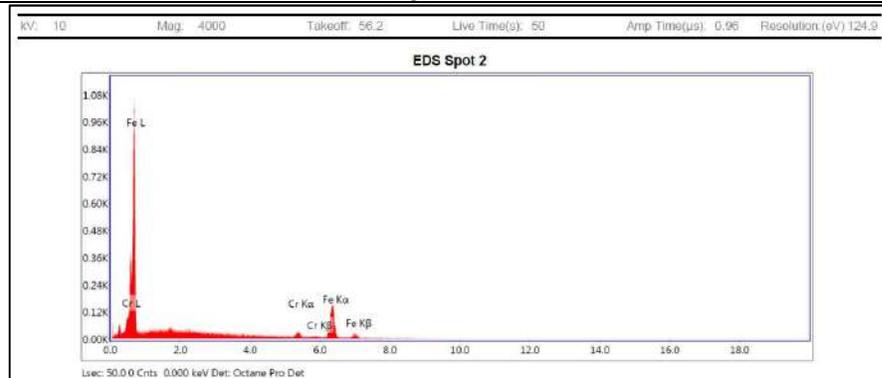


Figura 1.7c

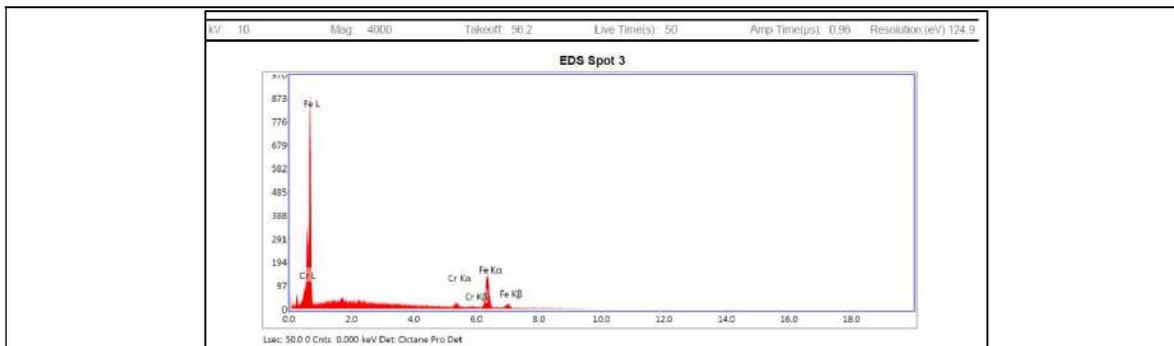


Figura 1.7d

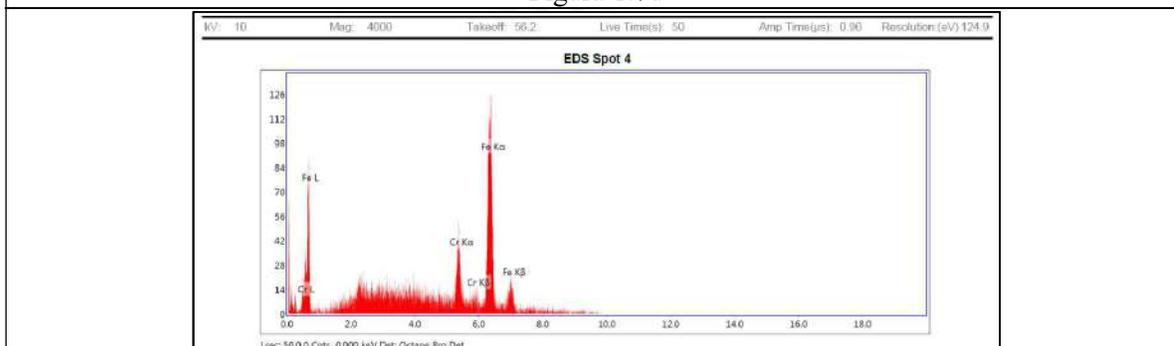


Figura 1.7e

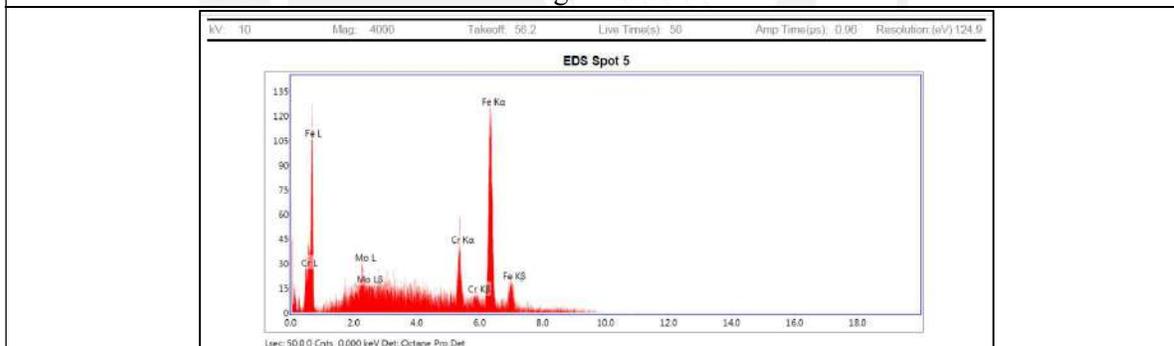


Figura 1.7f

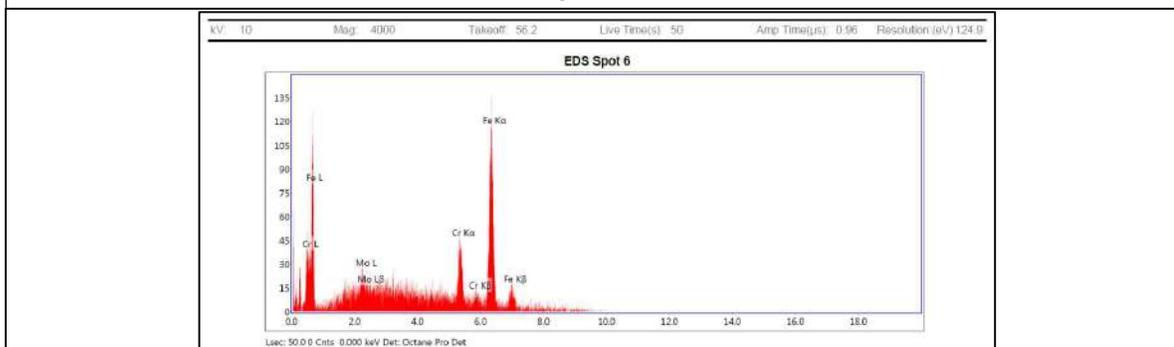


Figura 1.7g

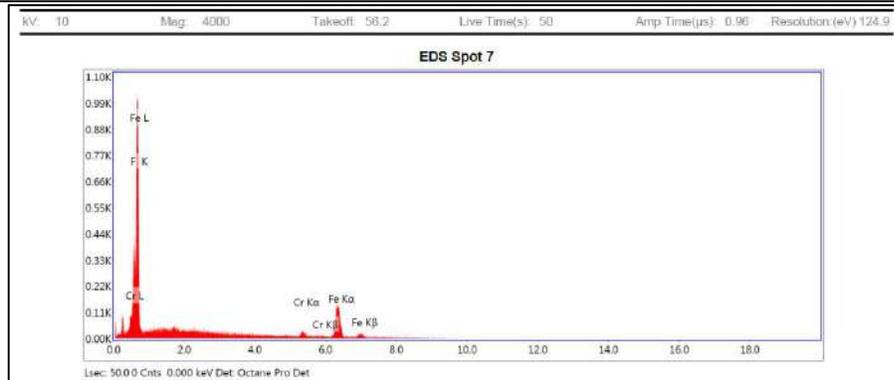


Figura 1.7h

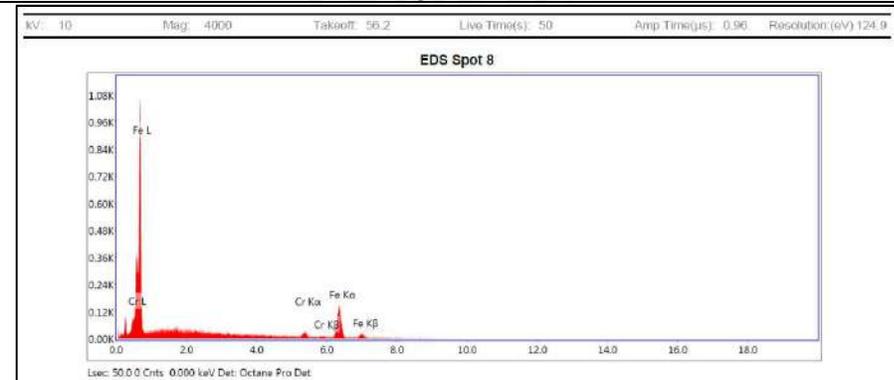


Figura 1.7i

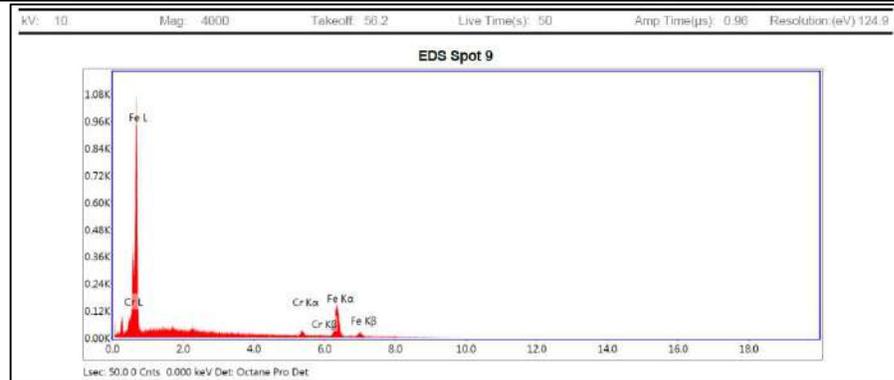


Figura 1.7j

**Anexo 1.8:** Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en el MA de la junta J4R-4

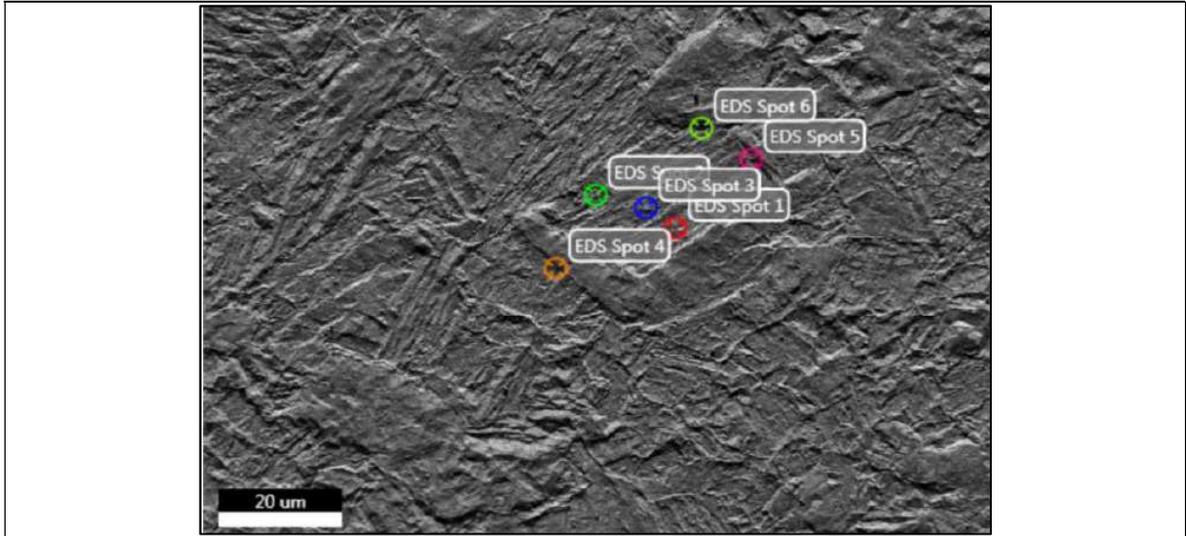


Figura 1.8a

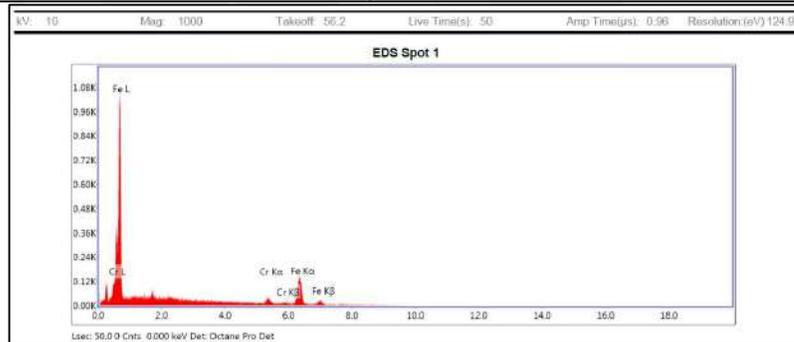


Figura 1.8b

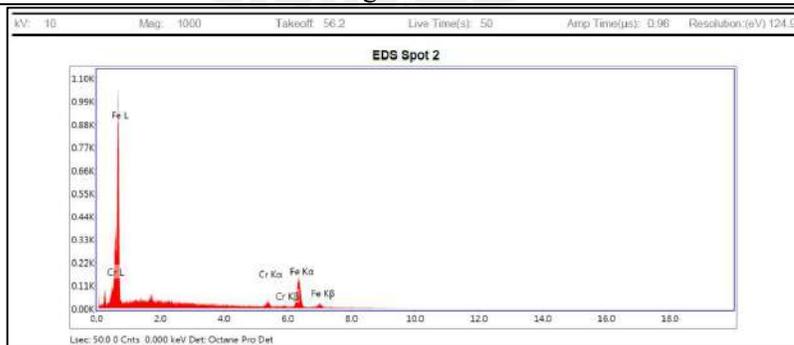


Figura 1.8c

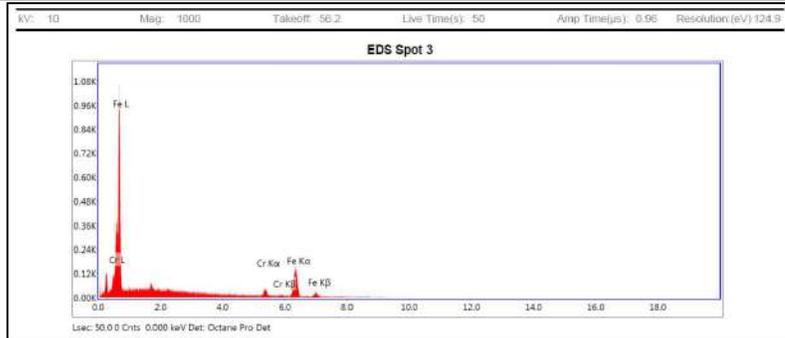


Figura 1.8d

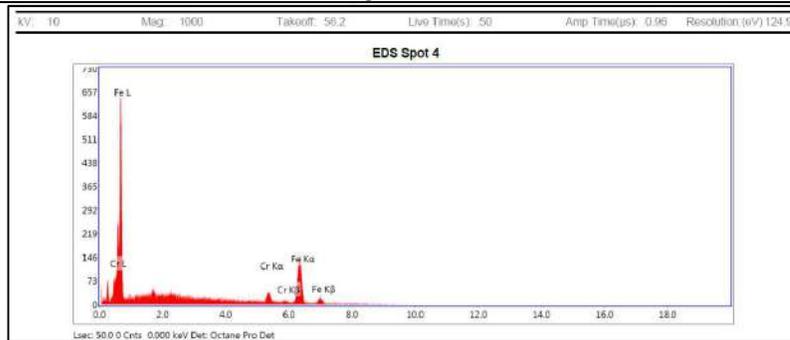


Figura 1.8e

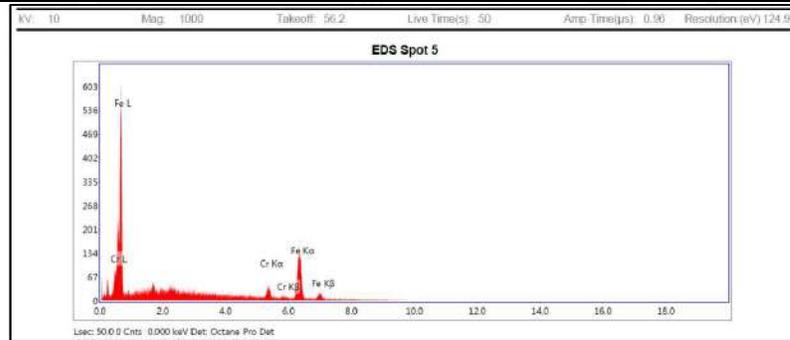


Figura 1.8f

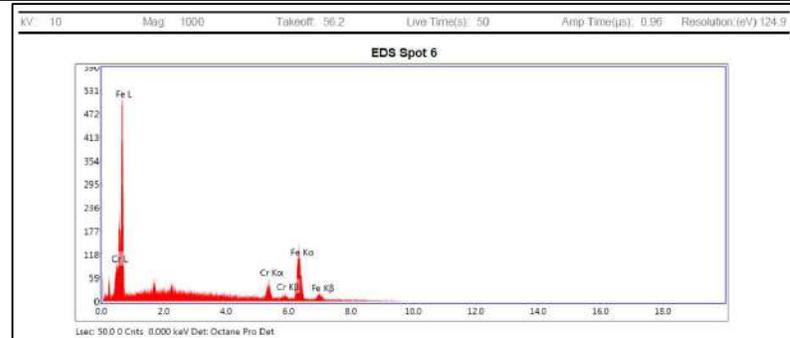


Figura 1.8g

**Anexo 1.9:** Grafica de identificación y contabilización de rayos X característicos de los sitios examinados en la ZAC de la junta J4R-4

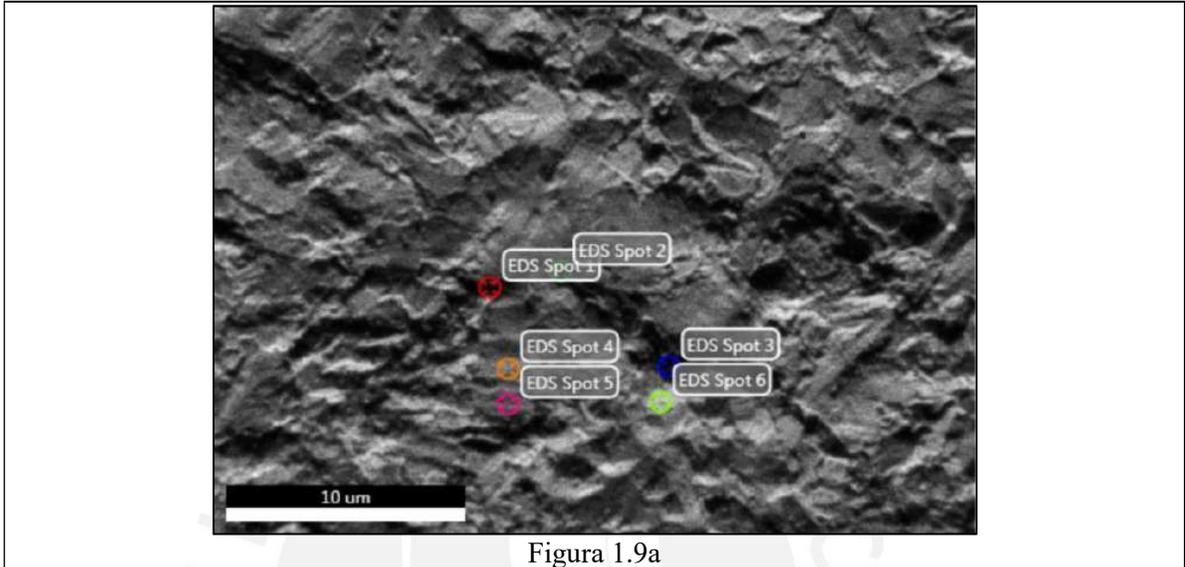


Figura 1.9a

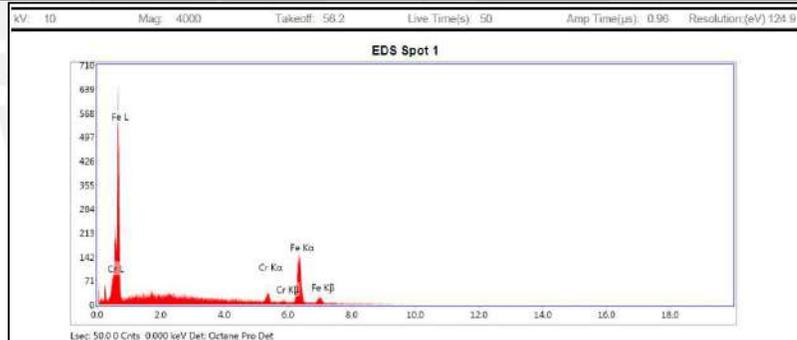


Figura 1.9b

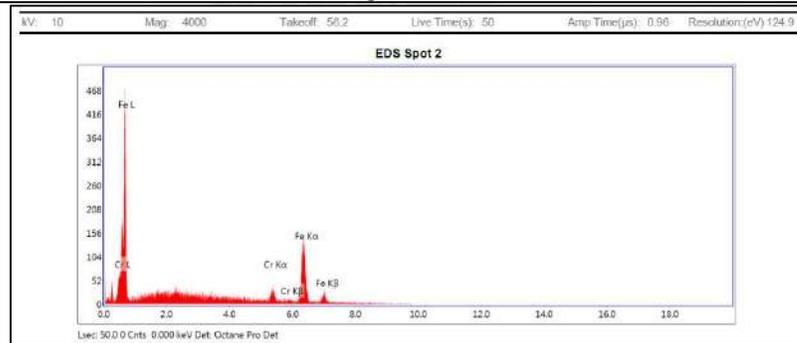


Figura 1.9c

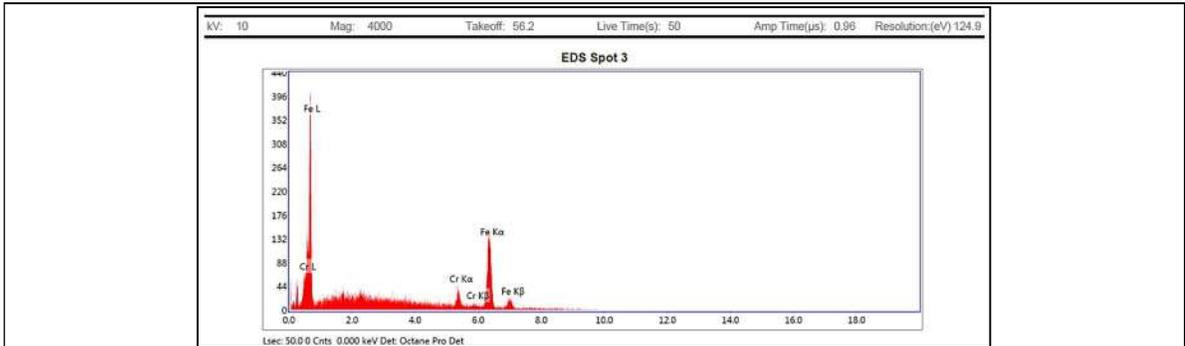


Figura 1.9d

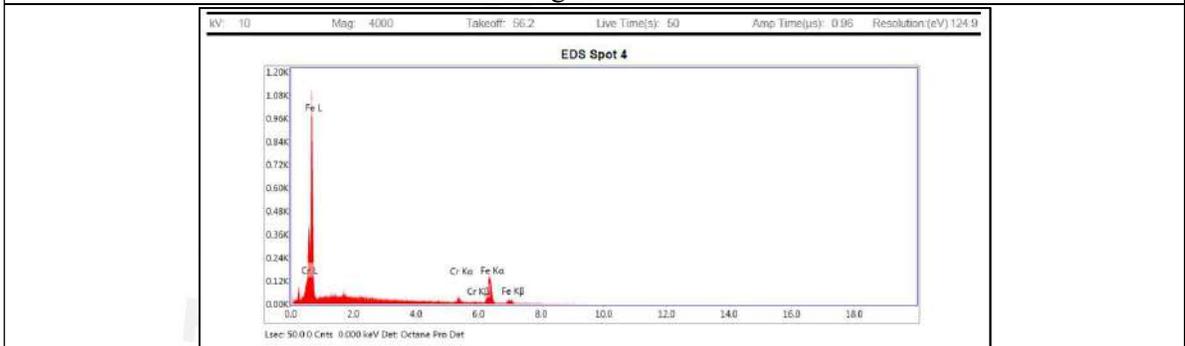


Figura 1.9e

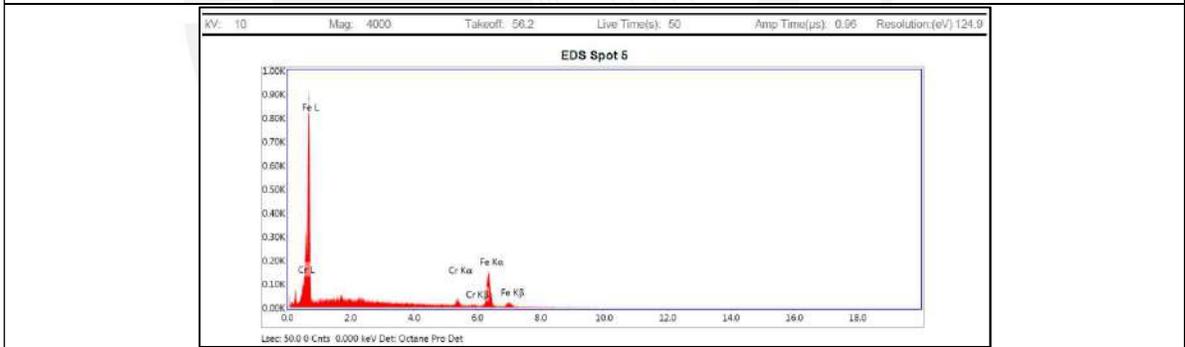


Figura 1.9f

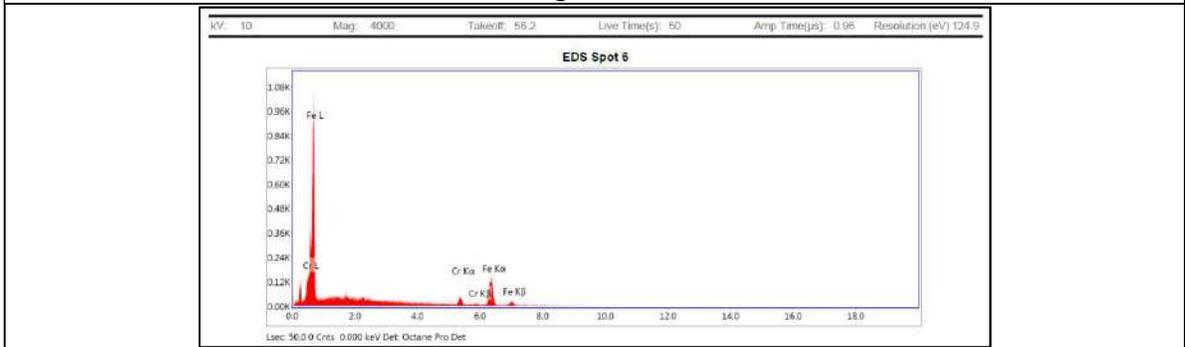


Figura 1.9g