



**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y  
URBANISMO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**TESIS**

**ESTUDIO MICROESTRUCTURAL Y  
COMPORTAMIENTO AL CREEP DE UNA JUNTA  
SOLDADA DEL ACERO ASTM A335 P5 A 600°C**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO (A) MECÁNICO (A) ELECTRICISTA**

**Autores:**

**Bach. Exebio Cajo Guillermo Manuel**

**ORCID <https://orcid.org/0009-0009-6258-843X>**

**Bach. Leon Garcia Carmen Guadalupe de Jesus**

**ORCID <https://orcid.org/0009-0005-8438-6100>**

**Asesora:**

**Dra. Gastiaburú Morales Silvia Yvone**

**ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7657-819X>**

**Línea de investigación:**

**Tecnología e innovación en desarrollo de la construcción y la  
industria en un contexto de sostenibilidad**

**Sublínea de investigación:**

**Innovación y tecnificación en ciencia de los materiales, diseño e  
infraestructura**

**Pimentel - Perú**

**2024**

**ESTUDIO MICROESTRUCTURAL Y COMPORTAMIENTO AL CREEP DE UNA  
JUNTA SOLDADA DEL ACERO ASTM A335 P5 A 600 °C**

**Aprobación del Jurado**

---

**Mtro. VIVES GARNIQUE JUAN CARLOS**

**Presidente Jurado**

---

**MSc. ROJAS CORONEL ANGEL MARCELO**

**Secretario jurado**


---

**Dra. SILVIA YVONE GASTIABURU MORALES**

**Vocal Jurado**

# Guillermo Manuel y Carmen Gu Exebio Cajó y León...

## ESTUDIO MICROESTRUCTURAL Y COMPORTAMIENTO AL CREEP DE UNA JUNTA SOLDADA DEL ACERO ASTM A335 P5 A...

 Universidad Señor de Sipán

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::26396:428163873

Fecha de entrega

9 feb 2025, 2:35 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 feb 2025, 2:36 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

TESIS\_EXEBIO CAJO y LEON GARCIA\_TURNITIN.docx

Tamaño de archivo

5.4 MB

52 Páginas

10,879 Palabras

57,125 Caracteres




# 25% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

## Fuentes principales

- 23%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 14%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



**DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD**

Quien(es) suscribe(n) la DECLARACIÓN JURADA, soy(somos) egresado (s)del Programa de Estudios de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaro (amos) bajo juramento que soy (somos) autor(es) del trabajo titulado:

**ESTUDIO MICROESTRUCTURAL Y COMPORTAMIENTO AL CREEP A 600°C DE UNA JUNTA SOLDADA DEL ACERO ASTM A335 GRADO P5**

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán, conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación con las citas y referencias bibliográficas, respetando el derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y autentico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

Exebio Cajo Guillermo Manuel	DNI: 71314651	
Leon Garcia Carmen Guadalupe de Jesus	DNI: 73940578	

Pimentel, 03 de febrero de 2025

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis principalmente a Dios, por darnos la fuerza necesaria para culminar esta meta trazada. También a nuestros hermanos, por brindarnos su apoyo moral en todas esas noches de investigación.

Nuestros padres fueron un pilar fundamental para poder continuar nuestra carrera profesional, por lo cual el trabajo realizado en este proyecto va dedicado para ellos, en agradecimiento por el esfuerzo que brindaron y seguirán brindando en este nuevo paso que nos espera.

A nuestros docentes por brindarnos sus conocimientos, tiempo y dedicación para llegar a ser unos buenos profesionales.

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestra universidad Señor de Sipán que nos forjó y nos abrió sus puertas a la formación académica para un buen futuro profesional y tener un excelente aprendizaje de calidad.

A nuestro asesor, por su experiencia en el rubro y compartir con nosotros sus conocimientos que nos favorecen en el trabajo de nuestra investigación.

Un sincero agradecimiento a todos mis amigos y compañeros que estuvieron conmigo en los momentos de estrés y alegría durante este largo y retador camino. Su apoyo, confianza, soporte y cariño han sido invaluable. Cada uno de ustedes ha contribuido a mi fortaleza y ánimo de una manera u otra.

## INDICE

DEDICATORIA .....	6
AGRADECIMIENTO .....	7
INDICE DE FIGURA .....	10
INDICE DE TABLAS .....	12
RESUMEN.....	13
ABSTRAC.....	14
I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Realidad Problemática .....	15
1.2 Formulación del problema .....	28
1.3 Hipótesis .....	28
1.4 Objetivos.....	29
1.5 Teoría relacionada al tema .....	29
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
2.1. Tipo y Diseño de Investigación.....	37
<b>2.2. Variables, Operacionalización .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3. Población de estudio, muestra, muestreo y criterios de selección .....</b>	<b>40</b>
2.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.....	40
2.5. Procedimiento de análisis de Datos.....	42
2.6. Aspectos Éticos.....	43
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
3.1. Resultados .....	44
3.2. Discusión.....	61



IV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
4.1.	Conclusiones.....	64
4.2.	Recomendaciones.....	65
V.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	66
VI.	ANEXOS.....	69

## INDICE DE FIGURA

Figura. 1. Identificación de precipitados en acero P5 después del servicio: a) carburo $M_{23}C_6$ a lo largo del límite de grano; TEM [13].....	20
Figura. 2. Identificación de precipitados en acero P5 después del servicio: b) carburo $M_2C$ dentro del grano; TEM [13]. .....	21
Figura. 3. (a) Área cercana a la línea de fusión de la unión soldada de prueba; (b) ZAC de la junta soldada con una estructura de grano fino visible; (c) área del metal de soldadura en la junta soldada [13].....	21
Figura. 4. Curvas de creep comparadas obtenidas a 650°C y 70 MPa (a) y puntos experimentales en Larson-Miller diagrama (b) [14]. .....	22
Figura. 5. Micrográficas SEM que muestran la microestructura revenida: (a) DT+R y (b) T+R [16]. .....	24
Figura. 6. Micrográficas ópticas del metal de soldadura. (a) tal como está soldado; (b) templado a 600°C; (c) templado a 700°C; (d) templado a 750°C [18]. .....	26
Figura. 7. Acero P5 (5%Cr-0.5%Mo) soldado sin TTPS, microestructura [20].....	27
Figura. 8. Diagrama de enfriamiento continuo del acero 5Cr – 0.5Mo [22].....	32
Figura. 9. Acero P5 soldado suministrado por Soldexa .....	44
Figura. 10. Probetas según la norma ASTM E139-00 .....	47
Figura. 11. Montaje y ensayo culminado de creep .....	47
Figura. 12. Fotomicrografía óptica y fotomicrografía electrónica del acero P5. Microestructura: bainita + ferrita.....	48
Figura. 13. Espectroscopía dispersiva en energía del acero P5.....	49
Figura. 14. Espectroscopía dispersiva en energía del acero P5.....	49
Figura. 15. Junta soldada del acero P5 Mostrando las diferentes áreas de componente soldado. MS: metal de soldadura, LF: línea de fusión, ZAC: zona afectada por el calor, y MB: material base.....	51

Figura. 16. Fotomicrografía óptica del metal de soldadura del acero P5. Microestructura: granos columnares de martensita revenida. ....	51
Figura. 17. Fotomicrografía óptica del metal de soldadura del acero P5. Microestructura: granos columnares de martensita revenida. ....	52
Figura. 18. Fotomicrografía óptica, electrónica y espectro dispersivo de energía de rayos X (EDS) de la ZACGG del componente P5 soldado.....	52
Figura. 19. Fotomicrografía óptica y electrónica de la ZACGF del componente P5 soldado. ....	53
Figura. 20. Fotomicrografía electrónica de la ZACIC del componente P5 soldado. ZT: zona transformada; ZNT: zona no transformada.....	54
Figura. 21. Regiones de la junta soldada del acero P5. MS: metal de soldadura; LF: línea de fusión; ZACGG: zona afectada por el calor grano grueso; ZACGF: zona afectada por el calor grano fino; ZACIC: zona afectad por el calor intercrítica.....	56
Figura. 22. Perfil de dureza medido en la última pasada de soldadura y en el pase de raíz de la junta soldada de acero P5.....	57
Figura. 23. Ensayos de tracción de la junta soldada de acero P5.....	59
Figura. 24. Tiempo de deformación a diferentes horas de tratamiento térmico – curva de creep estandar.....	60
Figura. 25. Curvas de creep de la junta soldada del acero P5 con diferentes tiempos de tratamiento post soldadura - velocidad de creep frente al tiempo.....	60
Figura. 26. Tratamiento térmico post soldadura de 2 h a 730°C.....	62
Figura. 27. Tratamiento térmico post soldadura de 3 h a 730°C.....	62
Figura. 28. Tratamiento térmico post soldadura de 4 h a 730°C.....	62
Figura. 29. Tratamiento térmico post soldadura de 8 h a 730°C.....	63

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Temperatura y tiempo de permanencia para el acero P5.....	18
Tabla 2. Acero ASTM A335 Gr. P5, composición química, tratamientos térmicos y propiedades mecánicas [23]. .....	33
Tabla 3. Metales de aporte para la soldadura de acero ASTM A335 Grado P5. ....	34
Tabla 4. temperaturas mínimas de precalentamiento [25]. .....	35
Tabla 5. Composición química del acero P5. ....	44
Tabla 6. Características eléctricas utilizadas en el proceso de soldadura del acero P5....	45
Tabla 7. Resultados de los ensayos de creep de la soldadura con diferentes tiempos de tratamiento post soldadura, a 600 °C y 190 MPa. ....	61

## RESUMEN

En este estudio microestructura y el comportamiento al creep a 600 °C de una junta soldada del acero ASTM A335 grado P5, ampliamente utilizado en aplicaciones de alta temperatura y presión debido a su resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. El enfoque principal fue analizar cómo la soldadura afecta la microestructura de la zona afectada por el proceso y cómo esto influye en la resistencia y estabilidad del material en condiciones de alta temperatura y carga.

Los resultados revelaron coherencias en la influencia de la soldadura en la microestructura de la junta, mostrando cambios en la distribución de fases y precipitados, así como la formación de zonas con características distintas a la base del acero. Estos cambios microestructurales pueden generar discontinuidades y puntos de concentración de tensiones, lo que afecta negativamente la resistencia y la capacidad de soportar cargas prolongadas a altas temperaturas.

A pesar de ello, también se observaron contradicciones, ya que algunas zonas de la junta soldada mostraron una mayor resistencia al creep en comparación con otras, lo que sugiere una variabilidad significativa en la microestructura dentro de la junta, generando un comportamiento heterogéneo al creep.

En conclusión, este estudio resalta la importancia de considerar los cambios microestructurales inducidos por la soldadura, ya que estos pueden afectar la resistencia mecánica y la estabilidad del material en condiciones de alta temperatura y carga. Se plantean desafíos para la predicción y el diseño adecuado de juntas soldadas en aplicaciones a altas temperaturas. Para futuras investigaciones, se recomienda un análisis más profundo de las propiedades mecánicas y el comportamiento al creep de juntas soldadas similares, con el objetivo de optimizar su resistencia y durabilidad en entornos de servicio exigentes.

**Palabras Clave:** Soldadura, resistencia, microestructura, análisis.

## ABSTRAC

In this study, the microstructure and creep behavior at 600 °C of a welded joint of ASTM A335 grade P5 steel, widely used in high temperature and pressure applications due to its mechanical strength and corrosion resistance, were investigated. The main focus was to analyze how welding affects the microstructure of the zone affected by the process and how this influences the resistance and stability of the material under high temperature and load conditions.

The results revealed consistency in the influence of welding on the microstructure of the joint, showing changes in the distribution of phases and precipitates, as well as the formation of zones with different characteristics from the steel base. These microstructural changes can generate discontinuities and stress concentration points, which negatively affect strength and the ability to withstand prolonged loads at high temperatures.

Despite this, contradictions were also observed, as some areas of the welded joint showed higher creep resistance compared to others, suggesting a significant variability in the microstructure within the joint, generating heterogeneous creep behavior.

In conclusion, this study highlights the importance of considering the microstructural changes induced by welding, since these can affect the mechanical resistance and stability of the material under high temperature and load conditions. Challenges arise for the prediction and proper design of welded joints in high temperature applications. For future research, further analysis of the mechanical properties and creep behavior of similar welded joints is recommended, with the aim of optimizing their strength and durability in demanding service environments.

**Keywords:** Welding, resistance, microstructure, analysis.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Realidad Problemática

La producción petroquímica y las plantas de energía, los aceros de aleación ferríticos ASTM A335 se emplean ampliamente debido a su resistencia a alta temperatura en el rango de 550 °C-600 °C y su capacidad para resistir la corrosión del petróleo crudo que contiene sulfuro de hidrógeno y otras sustancias corrosivas [1] y [2]. El acero ASTM A335 grado P5 se utiliza como tuberías y caños de transporte de vapor, así como en otros componentes estructurales que trabaja a alta temperatura [2].

Los aceros al cromo-molibdeno suelen generalmente se componen de cromo que oscila entre el 0.5 y el 9 por ciento y un adjunto de molibdeno que oscila entre el 0.5 y el 1 por ciento. Generalmente el contenido de carbono es alrededor del 0.1 por ciento que garantizar una perfecta soldabilidad, aunque presentan niveles elevados de templeabilidad. El Cr ofrece una mayor resistencia a la corrosión a alta temperatura, mientras que el Mo mejora su resistencia al creep. Por lo general, estos materiales se proporcionan en estado recocido o en una condición que se ha normalizado y revenido [3].

Las tuberías de acero aleado al cromo-molibdeno 5%Cr-0,5%Mo, se instalan en las refinerías mediante el proceso de soldadura. Estos componentes soldados son sometidos a un procedimiento térmico después del procedimiento de soldadura (TTPS) con la finalidad de reducir las tensiones residuales generadas. Los parámetros del TTPS dados en las normas para su aplicación en esta tubería no especifican el tiempo del TTPS. La temperatura de revenido mínima y máxima se especifica en las normas, mientras que allí solo se indica el tiempo mínimo de exposición. Normalmente durante los procesos de TTPS de los aceros Cr-Mo los tiempos de dicho tratamiento se incrementan con la finalidad de obtener la dureza recomendada por la norma. No se tiene muchos estudios del efecto que tiene el tiempo de tratamiento térmico sobre las propiedades especialmente en la resistencia al creep o resistencia a alta temperatura del acero 5% Cr-0,5% Mo. El objetivo de esta investigación es evaluar los cambios microestructurales, dureza, resistencia a baja

y alta temperatura de una junta soldada del acero ASTM A335 P5 tratada térmicamente por un tiempo de 730 °C por 2 horas. Los resultados de estos análisis se compararán con los resultados de las pruebas realizadas en otras juntas soldadas y reportadas en la literatura de revistas indizadas.

Los métodos de tratamiento térmico comúnmente empleados para los aceros Cr-Mo son análogos a los utilizados para otros aceros templables. Estos métodos incluyen el recocido, la normalización y el revenido, el templeado y el revenido, o únicamente el revenido. El recocido, el normalizado y el revenido, así como las técnicas de templeado y revenido, se emplean para lograr las propiedades mecánicas que son esenciales para la aplicación específica [3].

El proceso de recocido de un acero al cromo-molibdeno implica someterlo a una temperatura dentro del rango de 845 °C a 915 °C, manteniéndolo durante 1 hora/pulgada de espesor, con un tiempo mínimo de 2 horas. Posteriormente, el acero se somete a un proceso de enfriamiento controlado, normalmente máximo 10 °C/hora, en el que se reduce gradualmente hasta una temperatura de 37 °C. El proceso antes mencionado produce una microestructura ferrítica comparativamente suave en la totalidad del acero [3].

Los procesos de normalizado + revenido implica someterlo a una temperatura dentro del rango de 845 °C a 915 °C, manteniéndolo durante 1 hora/pulgada de espesor, con un tiempo mínimo de 2 horas, y posteriormente enfriarlo el acero a 25 °C. El proceso de normalizado requiere el uso de enfriamiento en un ambiente de aire quieto. Los tratamientos antes mencionados facilitan el proceso de endurecimiento del acero, normalmente seguido de un procedimiento de revenido posterior [3].

El proceso de revenido de un acero al cromo-molibdeno implica un tratamiento térmico a temperatura menor que 760°C ( $A_{C1}$ ). La duración de este proceso es de 1 a 2 horas, según la composición específica del acero y añadido de componentes de aleación. Posteriormente, la muestra se somete a un proceso de enfriamiento ya sea por exposición al aire quieto o por colocación dentro de un horno [3].



La existencia de tensiones remanentes que surgen a causa de la soldadura o la deformación mecánica de las tuberías de acero aleado puede tener efectos adversos en la confiabilidad y la integridad estructural del sistema, lo que podría provocar fallas. Para mitigar el impacto de las tensiones residuales, se emplea una operación de tratamiento térmico de revenido para aliviar la tubería soldada o deformada. El tratamiento térmico es un proceso posterior a la soldadura que imparte varias características ventajosas a las uniones soldadas. Estos incluyen el alivio en la dureza del MS (metal soldadura) y ZAC (zona calurosa), la mejora de la ductilidad, las alteraciones beneficiosas de las microestructuras de las regiones del metal tratado térmicamente y la mitigación de las tensiones residuales. La aplicación de TTPS mejora tanto la durabilidad frente a la corrosión como la capacidad de resistir fisuras en condiciones de frío al mitigar el impacto de las tensiones residuales. El tratamiento térmico aplicado a los componentes soldados puede producir efectos adversos, incluida la disminución de su resistencia. En aleaciones de acero específicas, el endurecimiento por precipitación puede inducir fracturas en regiones del metal que han estado sujetas a temperaturas elevadas [4, 5].

Los parámetros principales que tienen importancia en el contexto del TTPS son la temperatura y el tiempo de permanencia. Además, es imperativo ejercer control de la velocidad de la temperatura durante el calentamiento y durante el enfriamiento. La determinación de las mejores variables para el TTPS depende de las propiedades físicas deseadas de la unión soldada, como su firmeza, tenacidad y resistencia a la corrosión. La “dureza máxima permitida” es 248 HV.

La Tabla siguiente presenta la temperatura de mantenimiento y la duración prescritas para el TTPS del acero que posee una composición nominal de 5% de cromo y ½% de molibdeno, que se clasifican como P-No 5B. La temperatura y el tiempo de mantenimiento son factores cruciales en los tratamientos térmicos. Sin embargo, no es factible comparar directamente estas variables con los resultados de estudios previos. Por conveniencia y debido a la relación observada entre la temperatura y el tiempo de mantenimiento, las

normas de la Unión Europea incluyen un parámetro denominado "P". Este parámetro está determinado por una fórmula matemática que tiene en cuenta tanto la temperatura como el tiempo.

$$P = T (20 + \log t) \times 10^{-3}$$

Donde T es la temperatura de tratamiento térmico (Kelvin), t es el tiempo (horas) de exposición a dicha temperatura.

*Tabla 1. Temperatura y tiempo de permanencia para el acero P5*

<b>Código de construcción, estándar o especificación</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Ref.</b>
Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries	718 a 746	1 hora/pulgada	[6]
- API RP 582.		(mínimo 2h)	
Power Piping - ASME B31.1 Process Piping –	675 a 760		[7]
ASME B31.3	---		[8]

Fuente: Elaboración propia.

Las normas para los componentes soldados como son las tuberías especifican explícitamente el tiempo de permanencia (t) a la temperatura de revenido (T) en relación con los parámetros de tratamiento térmico de las uniones soldadas. Las normas especifican únicamente el rango de la temperatura de revenido, así como la duración mínima de exposición requerida para el mantenimiento. El impacto del régimen del TTPS sobre el rendimiento mecánico de las uniones soldadas de acero, así como los factores que contribuyen a los cambios en estas propiedades, se dilucidan mediante un examen de su microestructura. La microestructura del acero sufre variaciones como resultado de la exposición prolongada a temperaturas y presiones elevadas, por lo que esto afecta su resistencia [9, 10, 11].

Según el código ASME B31.3, se exige que la dureza de componentes soldadas fabricadas con el acero P5 no supere el límite de 241 HB. El objetivo principal en el TTPS en el acero específico es eliminar la presencia de martensita y reemplazarla con una composición estructuralmente más deseable y dúctil. Además, se ha observado que este proceso también conduce a una reducción de las tensiones residuales [11]. La microestructura del acero P5 en estado de recibido se caracteriza por la presencia de componentes similares a ferrita y perlita dispuestos en una morfología granular. La presencia de carburos con dispersión variable es observable dentro de los granos de ferrita, tanto internamente como a lo largo de los límites de grano [9]. Giudice et al., [12] realizaron experimento para medir la disminución del espesor de probetas de acero ASTM A335 P5 que se oxidaron a temperaturas que oscilaron entre 500 y 1000 °C. Además, realizaron pruebas de creep en muestras tomadas de un tubo radiante que había estado en servicio durante más de 200.000 horas en un horno de cobertura. Esto les permitió desarrollar una correlación entre la pérdida de espesor y la temperatura y el tiempo de trabajo, basada en datos experimentales. Además, esta correlación se utilizó para pronosticar la vida útil restante de los especímenes. Basándose en modelos determinaron que el tubo usado se puede utilizar de forma segura durante un número significativo de años a temperaturas de hasta 650 °C.

Sin embargo, si la temperatura de funcionamiento aumenta a 700 °C, la vida útil restante del tubo será inferior a un año. Por lo tanto, para garantizar condiciones de funcionamiento seguras en el escenario específico, se recomienda reemplazar los tubos radiantes después de que su espesor se reduzca a 4 mm. Además, es fundamental comprobar periódicamente la temperatura de la superficie para garantizar que no supere los 650 °C hasta la próxima inspección anual de la planta. El modelo empírico recientemente desarrollado permite formular hipótesis sobre la historia térmica real del componente antes de la interrupción del servicio. Este modelo sirve como herramienta de diseño para predecir la duración de los tubos nuevos. Puede utilizarse para imitar la vida útil en condiciones ideales de temperatura de funcionamiento estable. En cualquier caso, como lo demuestra

el análisis del historial térmico del tubo desmontado, es absolutamente necesario programar inspecciones periódicas para evaluar con precisión el estado actual de los tubos. Esto se debe a la posible ocurrencia de eventos como el impacto de las llamas, que pueden afectar en gran medida la vida útil reMerda A., [13], examinaron una sección de una junta soldada compuesta de acero bainítico P5. La junta analizada se obtuvo de un trozo de tubería que estuvo expuesta a altas temperaturas durante aproximadamente 96.000 horas. Las pruebas metalúrgicas indicaron un nivel muy pequeño de deterioro en la junta de prueba. La microestructura consistió de bainita y precipitados de diversas formas. El análisis de los precipitados indicó la existencia de precipitados de  $M_{23}C_6$  y  $M_2C$  en la junta. Se detectó la existencia de carburos  $M_{23}C_6$  en el contorno de los granos de la austenita precedente. La identificación de precipitados antes mencionada también indicó la existencia de carburos  $M_2C$  y  $M_{23}C_6$  dentro de los granos/listones. La escasa degradación de la microestructura de la articulación se le atribuyó a que la articulación estuvo expuesta a una temperatura comparativamente baja durante un período relativamente breve. La Figura 1 muestra los precipitados en el acero P5 después de entrar en servicio. El metal de soldadura se caracterizó por la estructura bainítica o bainítico-martensítica de grano grueso con relativamente pocos precipitados de diversa morfología dispuestos de una manera similar a la disposición de los precipitados en el material base. Los granos de solidificación en la soldadura se alargaron en la dirección de la descarga de calor. La Figura 2. muestra las microestructuras en las diferentes zonas de la junta soldada.

Figura. 1. Identificación de precipitados en acero P5 después del servicio: a) carburo  $M_{23}C_6$  a lo largo del límite de grano; TEM [13].

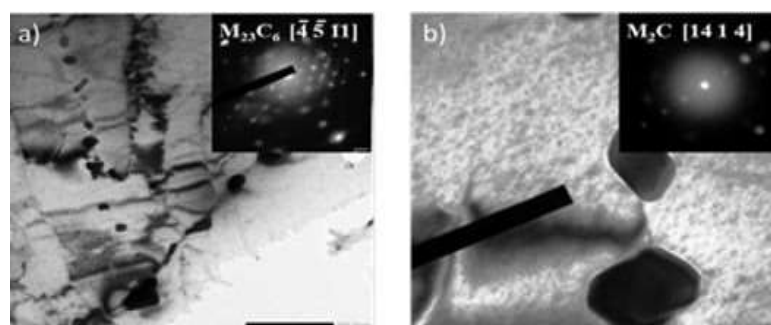


Figura. 2. Identificación de precipitados en acero P5 después del servicio: b) carburo  $M_2C$  dentro del grano; TEM [13].

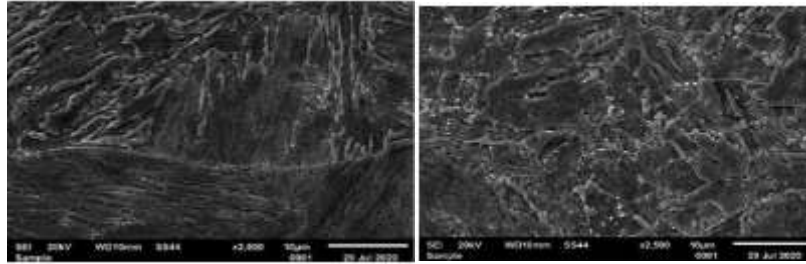
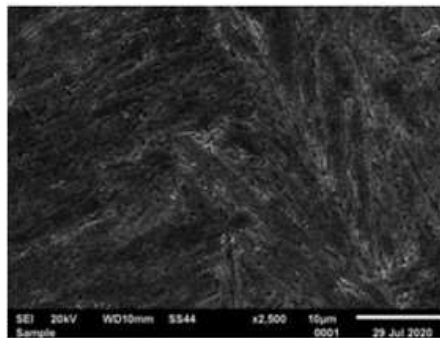


Figura. 3. (a) Área cercana a la línea de fusión de la unión soldada de prueba; (b) ZAC de la junta soldada con una estructura de grano fino visible; (c) área del metal de soldadura en la junta soldada [13].

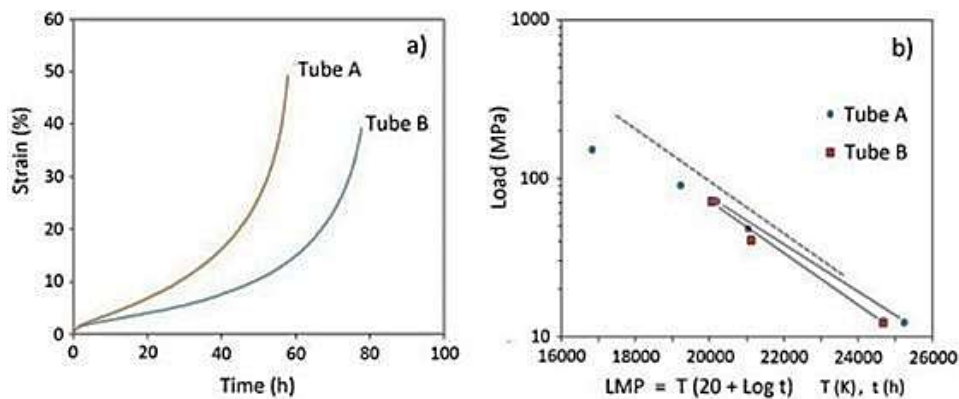


Aliprandi et al., [14] realizaron la evaluación mecánica de muestras de acero ASTM A335 grado P5. Estas muestras lo obtuvieron de dos tubos radiantes del horno de cobertura de la Refinería Milazzo. Los tubos quedaron fuera de servicio debido a reducciones de espesor no deseadas, lo que resultó en una disminución de 7 a 4 mm. Los tubos radiantes están diseñados específicamente para proporcionar duraciones operativas prolongadas a temperaturas elevadas. En consecuencia, se planifican inspecciones periódicas para evaluar su fiabilidad y eliminar los tubos dañados. La composición química de los dos tubos difería algo, aunque se mantenía dentro de los límites aceptables definidos por la Norma.

Sus experimentos revelaron que el tubo con una mayor concentración de elementos de aleación exhibe una microestructura más refinada y rendimientos superiores de tracción y creep, Los resultados de la prueba de creep se analizaron utilizando el parámetro de Larson-Miller, Figura 3. Posteriormente, emplearon un enfoque ideado por los investigadores para estimar numéricamente la vida residual de los dos tubos, utilizando tanto los datos de creep como la reducción gradual del espesor de la pared. Mediante este

método, determinaron que es posible predecir un número significativo de años de vida restantes a temperaturas que alcanzan los 600 °C. A 700 °C, la vida útil equivale a muchos años. Sin embargo, para el tubo con menor contenido de aleación, la vida útil se reduce significativamente a sólo unos pocos cientos de horas a una temperatura de 800 °C. La conclusión a la que llegan estos investigadores es que, para garantizar unas condiciones de trabajo seguras hasta la próxima parada programada de la planta, es muy recomendable sustituir los tubos radiantes una vez que su espesor se reduzca a 4 mm. Además, es importante comprobar constantemente la temperatura de la superficie para garantizar que no supere los 600 °C.

Figura. 4. Curvas de creep comparadas obtenidas a 650°C y 70 MPa (a) y puntos experimentales en Larson-Miller diagrama (b) [14].



Aliprandi et al., [15], durante una parada planificada de una planta examinaron los tubos radiantes de un horno de cobertura. Sus objetivos era identificar y extraer los tubos que presentaran problemas que pudieran comprometer la seguridad, como quemaduras en la superficie exterior y disminución del espesor de la pared según lo evaluado por ultrasonido. Después de un uso prolongado, los tubos compuestos de ASTM A335 P5 exhibieron una combinación de ferrita y carburo finamente disperso dentro de los granos y en los límites de los granos en su superficie exterior. La ocurrencia de calentamiento local, causado por el impacto de las llamas, resultó en el agrandamiento tanto de los granos como de los carburos. En la región más calentada se observó una disminución de la dureza.

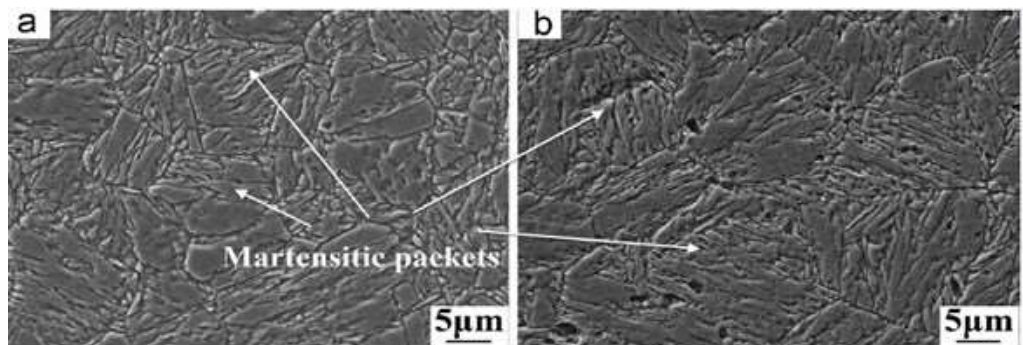
La tensión de fluencia y resistencia máxima a la tracción de las muestras obtenidas del tubo fuera de servicio son superiores a los valores mínimos requeridos por la Norma a

temperatura ambiente. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura, estas resistencias disminuyen gradualmente y la disminución se vuelve más notoria a 600 °C. En cuanto al comportamiento al creep, se ha determinado que se puede predecir una cantidad significativa de vida útil restante a temperaturas de 650°C, incluso considerando el impacto de la corrosión en el espesor de la pared. Por el contrario, las temperaturas elevadas suponen un riesgo importante ya que disminuyen en gran medida la vida útil de los materiales debido al creep, especialmente cuando se reduce el espesor de la pared. Por lo tanto, los tubos que presenten marcas de quemaduras en su superficie exterior y experimenten corrosión, lo que resulta en una disminución sustancial del espesor de su pared original, deben retirarse de servicio. Este tipo de daño indica la aparición de un sobrecalentamiento localizado provocado por el contacto directo con las llamas. Por lo tanto, recomendaron controlar cuidadosamente todas las condiciones operativas que puedan provocar este fenómeno.

Liu et al. [16], examinaron el impacto del tratamiento del doble temple y revenido (DT+R) y el tratamiento de temple y revenido convencional (T+R) en las microestructuras y características mecánicas del acero fundido martensítico 5Cr con bajo contenido de carbono fabricado mediante fundición por electroescoria. Las alteraciones microestructurales lo evaluaron mediante microscopio óptico (MO), microscopio electrónico de barrido (SEM), difracción de retrodispersión de electrones (EBSD) y microscopía electrónica de transmisión (TEM). Realizaron un análisis de las propiedades de los carburos formados durante el revenido utilizando réplicas de extracción de carbono y muestras de láminas delgadas vistas por TEM. El rendimiento mecánico se evaluó mediante la prueba de dureza Vickers, la prueba de tracción y la prueba de impacto Charpy con muesca en V realizadas a temperatura ambiente. El análisis de la microestructura reveló que el tratamiento con DT+R resultó en una microestructura más fina en comparación con el tratamiento con T+R, Figura 1.4. Los carburos presentes en las muestras revenidas fueron identificados como M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Los carburos se desarrollaron

inmediatamente a lo largo de los bordes de los granos de austenita previa, mientras que los del interior de los listones son el resultado de la transformación de la cementita que se formó durante la etapa inicial del revenido. Después de someterse al tratamiento DT+R, el límite elástico mostró un aumento modesto en comparación con la condición T+R, mientras que la tenacidad al impacto mostró una mejora significativa. Realizaron un análisis de los procesos de fortalecimiento, revelando que el aumento de la resistencia se atribuyó principalmente al refinamiento del grano y al fortalecimiento por precipitación. La mayor durabilidad del estado DT+R se puede atribuir a su microestructura más fina, lo que conduce a deflexiones más frecuentes de la grieta de clivaje, así como al tamaño más pequeño de los carburos a través de los bordes de grano de la austenita precedente. La investigación de EBSD reveló que tanto el bloque martensítico como el paquete de acero P5 martensítico revenido con bajo contenido de carbono eran capaces de impedir la propagación de la fractura, y este último demostró una mayor eficacia.

Figura. 5. Micrografías SEM que muestran la microestructura revenida: (a) DT+R y (b) T+R [16].



Kumslytis et al. [17], estudiaron cómo los factores del tratamiento térmico afectan las cualidades mecánicas y la confiabilidad operativa de las uniones soldadas hechas de acero P5 (5%Cr0.5%Mo). El enfoque principal del estudio fue las uniones soldadas y piezas de tuberías de acero al cromo-molibdeno tratadas térmicamente que han sido sometidas a un funcionamiento prolongado a alta temperatura, lo que ha resultado en una disminución notable de sus cualidades mecánicas. El objetivo principal fue examinar los factores que conducen al deterioro de las características mecánicas del acero aleado durante la

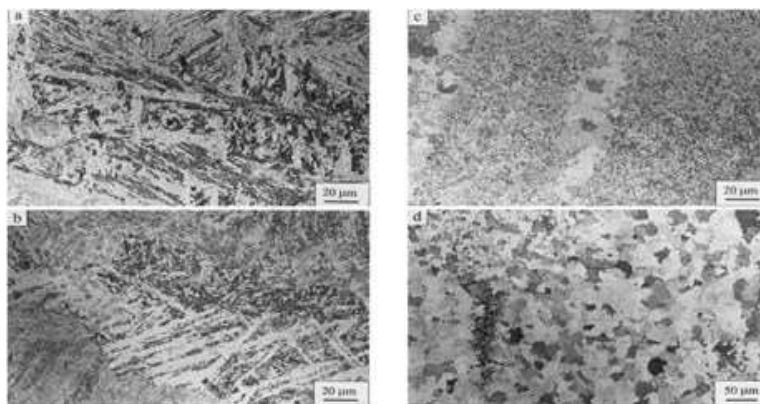


fabricación y uso de equipos. Además, el objetivo fue proporcionar un enfoque sistemático para determinar los parámetros de tratamiento térmico más eficaces para uniones soldadas de acero al cromo- molibdeno. Analizaron varios temas importantes: la correlación entre los parámetros del tratamiento térmico y la resistencia mecánica de las juntas soldadas de acero al cromo- molibdeno (5%Cr-0.5%Mo), la determinación del parámetro óptimo de temperatura/tiempo y la identificación de las razones detrás de los cambios y el deterioro en las características mecánicas del acero. El valor mínimo aceptable para el parámetro temperatura/tiempo de procedimiento térmico P de juntas soldadas fabricadas con acero 5%Cr-0.5%Mo se ha establecido en 19.3. No obstante, observaron que las propiedades mecánicas alcanzan sus valores deseados con valores P más bajos, como una dureza aceptable por debajo de 240 HB cuando P es mayor que 18.7, y valores deseados de tracción y fluencia cuando P es mayor que 17

De manera similar, la resistencia máxima a la tracción por impacto se logra cuando P es mayor que 19. Sin embargo, para obtener la microestructura deseada, es necesario tener una temperatura de tratamiento térmico entre 650°C y 750°C, con un valor P mínimo de 19.3. El valor máximo permitido para el parámetro P de temperatura/tiempo de procedimiento térmico de junta soldadas en acero 5%Cr-0.5%Mo se ha establecido que no debe exceder 20.5. Una vez que el valor supera un cierto umbral, se produce la ruptura de la estructura. Durante este proceso, los carburos se juntan entre los contornos de los granos de ferrita, creando colonias de carburo. Estas colonias luego se fusionan para crear compuestos sólidos y largos, lo que da como resultado la ausencia de carburos finos y dispersos. Además, hay una caída en los valores de las propiedades mecánicas, así como una disminución en la resistencia a la tracción y al impacto de las uniones. Se presentaron dos técnicas para identificar los parámetros óptimos de tratamiento térmico para uniones soldadas de acero 5%Cr0.5%Mo. La selección de los parámetros del tratamiento térmico se puede realizar mediante un nomograma creado o calculándolos según las fórmulas proporcionadas.

Cai et al. [18], realizaron una investigación sobre la microestructura de un metal de soldadura hecho de acero con muy bajo contenido de carbono y un 5 % de contenido de cromo. El estudio implicó examinar la microestructura bajo microscopía óptica y microscopía electrónica analítica, tanto en estado soldado como revenido. El proceso de revenido se realizó a temperaturas de 400, 500, 600, 700 y 750 °C durante 4 horas después del procedimiento de soldadura, Figura 1.5. El análisis TEM reveló que la martensita en el metal de soldadura experimentó una recristalización a una temperatura de 500°C, lo que resultó en la transformación en una estructura de ferrita poligonal gruesa después del revenido a 750 °C. Los precipitados predominantes en el metal de soldadura fueron M7C3, M2X y M23C6, con la excepción de cementita menor presente en bainita. La estabilidad de M2X disminuyó y sufrió una transformación a M23C6 cuando se sometió a temperaturas de revenido superiores a 600 °C.

Figura. 6. Micrografías ópticas del metal de soldadura. (a) tal como está soldado; (b) templado a 600°C; (c) templado a 700°C; (d) templado a 750°C [18].

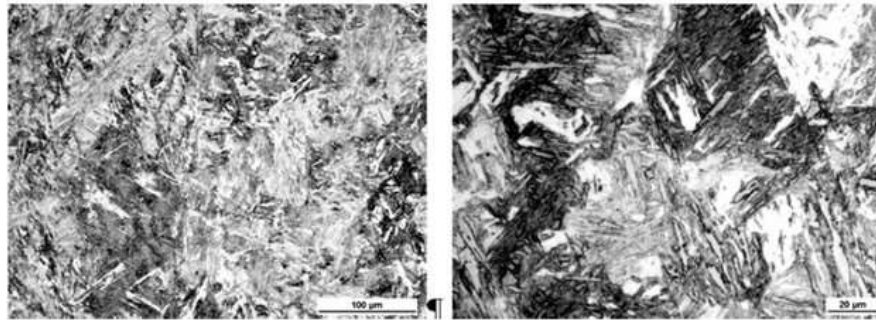


Respecto al fenómeno de la precipitación de carburos, los hallazgos de la evaluación de Hans- Olof Andrén [19] revelaron que, en el acero específico bajo investigación, un lapso de espera de 1 hora dio como resultado lo siguiente: La aplicación de TTPS dentro del rango de temperatura de 400 °C a 750 °C, reveló la formación de carburos finos M7C3 y M2C. Esta precipitación ocurrió aproximadamente a 500 °C, y M7C3 apareció principalmente en los antiguos límites de grano austenítico y dentro de los listones de martensita. Por otro lado, M2C se observó tanto en los límites de grano como dentro de las

dislocaciones. A una temperatura de 600 °C, la precipitación de M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ocurrió específicamente en los límites entre granos. Posteriormente, a una temperatura de 700 °C, se observaron partículas más grandes de M<sub>2</sub>C, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, y M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> dentro de los granos de ferrita poligonal. Se observaron dos tipos distintos de precipitados M<sub>2</sub>C ricos en Cr, que difieren en su contenido de Mo. La composición exhibió variaciones en respuesta a la temperatura del tratamiento térmico.

La siguiente figura 7 presenta la microestructura de la muestra de acero soldado en ausencia de TTPS. La micrografía revela la presencia de finos carburos dentro de los listones gruesos de martensita, que probablemente tengan la forma de placas de carburo.

*Figura. 7. Acero P5 (5%Cr-0.5%Mo) soldado sin TTPS, microestructura [20].*



El acero ASTM A335 grado P5 es un acero actualmente usado en la Refinería de Talara que es uno de los proyectos principales construidos en el Perú. Estos aceros se trabajan en el rango de 550 °C - 600 °C, por lo que es muy importante el estudio a alta temperatura. Son pocos los estudios sobre este acero bajo condiciones de alta temperatura, más se tiene trabajos de evaluación de propiedades a temperatura ambiente.

Este proyecto es crucial porque aborda la necesidad de investigar la resistencia a elevada temperatura de un acero ASTM A335 grado P5 en condición soldado, junto con su evaluación microestructural y propiedades de tracción a temperatura ambiente. Este estudio es muy importante para evaluar en servicio este acero ampliamente utilizado en la nueva refinería de Talara y ganar conocimiento de su uso y degradación.

Esta investigación es técnicamente relevante debido a: nos va a permitir establecer de forma experimental, cual es el valor de la tenacidad al creep de una unión soldada con lo

cual se va a tener datos reales de resistencia de la soldadura bajo condiciones de trabajo. Desde una perspectiva económica es fundamental entender el valor de la resistencia del cordón de soldadura, el valor de la resistencia del cordón de soldadura nos va a permitir optimizar las dimensiones de la misma siendo más eficiente su aplicación en diversos elementos industriales.

Desde el punto de vista social, es importante ya que permitirá la aplicación de factores de seguridad adecuados, permitiendo el bienestar de los trabajadores ante cualquier accidente.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cuál es la resistencia al creep a través de una junta soldada del acero P5 soldado?

## **1.3 Hipótesis**

El ciclo térmico de la soldadura afecta el volumen de grano de la austenita inicial y el estado de precipitación, creando una fuerte heterogeneidad microestructural en la junta. La ZACGG presenta la más alta dureza ocasionado por la precipitación de partículas M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> y M<sub>2</sub>X durante el tratamiento post soldadura. La ZACGF presenta una baja dureza debido a la presencia de granos de austenita previa (GAP) muy finos y con bajo endurecimiento por precipitación en sus límites, lo que genera una transformación rápida de la martensita a lo largo del tratamiento térmico postsoldadura

La ZACIC muestra una dimensión de grano de austenita inicial heterogéneo, producto de su transformación parcial a austenita.

En ese sentido podemos indicar que se producen modificaciones microestructurales y condición de formación de precipitados causados especialmente

en la ZACGF alteran su comportamiento a alta temperatura de la junta soldada del acero P5, degradándose significativamente su resistencia al creep

#### **1.4 Objetivos.**

##### **Objetivo General**

Evaluar la resistencia a alta temperatura de la junta soldada del acero ASTM A335 grado P5.

##### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar la variación microestructurales y avance de las fases precipitadas en las diferentes áreas de la unión soldada en el acero P5.
- Determinar la variación de la dureza que acontecen a través de la unión soldada del acero P5.
- Evaluar la resistencia mecánica de la junta soldada sobre el comportamiento a la tracción del acero P5.
- Evaluar el efecto de las modificaciones microestructurales y estado de precipitación que ocurren en la junta soldada sobre el comportamiento al creep del acero P5.

#### **1.5 Teoría relacionada al tema**

La identificación de los aceros Cr-Mo la realiza el ASTM y el ASME mediante la asignación de un número de especificación, que abarca detalles relacionados con la composición química, propiedades mecánicas, dimensiones, y requisitos adicionales. La denominación de ASTM inicia con la letra A, seguida por el número de especificación y posteriormente incorpora letras o números adicionales para diferenciar varios constituyentes o grados específicos de material. La designación ASME sigue siendo consistente, con la única diferencia de inicia con las letras SA. La especificación o número estándar está sujeto a variación según el proceso de fabricación específico empleado

(como fundición, forja, etc.) o la forma particular de presentación (como lámina, tubo, etc.) del material.

Aceros Cr-Mo: Los aceros al cromo-molibdeno exhiben un comportamiento de endurecimiento al enfriarse desde la temperatura de austenización, al mismo tiempo que muestran susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno. Durante los procesos de soldadura, reparación o deformación mecánica de aceros al cromo-molibdeno, se observa que las transformaciones microestructurales y la presencia de tensiones residuales pueden tener efectos adversos en la confiabilidad y durabilidad de la tubería durante su vida útil. Para mitigar la aparición de grietas en el MS y ZAC, es imperativo que se incorporen medidas de protección en los procedimientos de soldadura. Esto abarca dos tipos de agrietamiento, a saber, agrietamiento por temple y agrietamiento inducido por hidrógeno. Para evitar el agrietamiento, es imperativo utilizar técnicas de precalentamiento y consumibles apropiados.

Para mitigar el impacto de los cambios microestructurales y las tensiones residuales, ocurrido durante el proceso de soldadura, se aplica un PWHT. Esto permite también mejorar la tenacidad del MS y la ZAC. Este tratamiento tiene en cuenta varios factores, incluido el %C del material de aporte y material base, efectos de la dilución, etc. [3, 21].

Se recomienda emplear procesos y procedimientos de soldadura que utilicen metal de aporte con bajo contenido de hidrógeno. La composición del metal de aporte debe parecerse mucho a la del metal base, con la excepción de su contenido de carbono. Por lo general, el metal de aporte exhibe un contenido de carbono más bajo en comparación con el metal base. Sin embargo, es imperativo asegurar una cantidad suficiente de contenido de carbono en la soldadura cuando se somete a procesos de templado y revenido o de normalización y revenido [3]. Los diagramas CCT representan las transformaciones características exhibidos por diferentes tipos de aceros al ser sometidos a procesos de enfriamiento utilizando aire, aceite o agua como medio de enfriamiento. Los diagramas

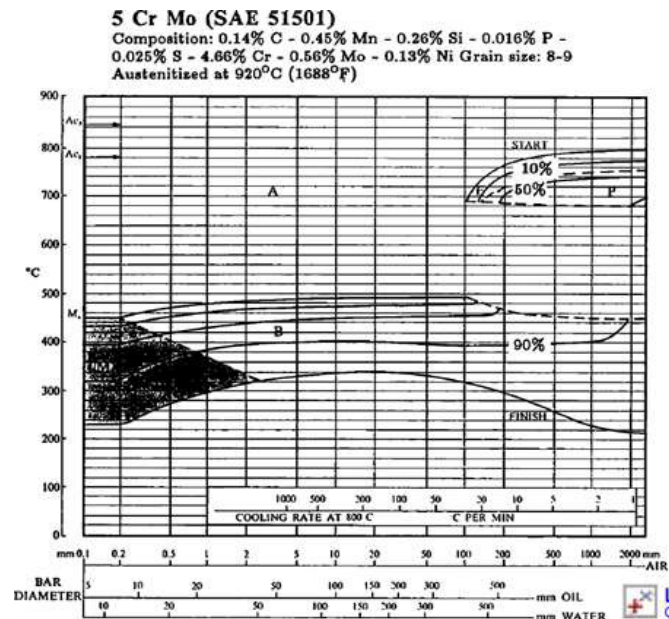
CCT presentados pertenecen exclusivamente a la región central de una barra; sin embargo, es posible inferir el comportamiento de estructuras ubicadas en otras posiciones.

Por ejemplo, la formación microestructural resultante del proceso de enfriamiento en una posición media radial específica dentro de una barra de diámetro significativo exhibirá similitudes con la formación estructural observada en el centro de una barra de menor diámetro, denominada diámetro equivalente. Esta similitud en la formación estructural se observa cuando las velocidades de enfriamiento son comparables [22].

El tamaño de grano de la austenita está influenciado por la temperatura de austenización y el tiempo de residencia, lo que a su vez altera las características de transformación después del proceso de enfriamiento. La composición de la austenita puede verse influenciada por la temperatura de austenización, particularmente en aceros que contienen elementos formadores de carburos. Como resultado, existe la posibilidad de que estén presentes carburos no disueltos. Por lo tanto, es imperativo tener cuidado al modificar los diagramas para adaptarlos a condiciones de austenización que se desvíen de las especificadas [22].

Los diagramas proporcionados se consideran inadecuados para su aplicación en escenarios de soldadura debido a que la ZAC pueden alcanzar temperaturas que oscilan entre 1300 y 1350 °C durante tiempos muy cortos. Siguiendo el tratamiento antes mencionado, se anticipa que la configuración del diagrama sufriría alteraciones significativas cuando se sometiera a velocidades de enfriamiento aceleradas que son pertinentes a este escenario particular. Las alteraciones específicas de las transformaciones dependen de factores tales como la cantidad de calor aplicado, los procedimientos de precalentamiento y post calentamiento y otras variables relevantes. Por lo tanto, la utilización de diagramas CCT en escenarios de soldadura se restringe a la estimación de la temperatura  $M_s$  de la ZAC para los cálculos de precalentamiento [22]. La siguiente figura muestra el diagrama CCT que representa el comportamiento del acero 5Cr – 0.5Mo (SAE 51501).

Figura. 8. Diagrama de enfriamiento continuo del acero 5Cr – 0.5Mo [22].



Las tuberías de acero ferrítico de la norma ASTM A335, que pertenecen a la familia de aceros al cromo-molibdeno, muestran características favorables para los procesos de doblado y conformado, así como para aplicaciones de soldadura por fusión. La elección de la selección dependerá de factores tales como consideraciones de diseño, condiciones de servicio, propiedades mecánicas y características de alta temperatura [23].

Los aceros ferríticos se clasifican como aceros de baja, intermedia y alta aleación que poseen un contenido de cromo de hasta el 10% inclusive. Las tuberías tienen la opción de ser acabadas en caliente o en frío mediante la aplicación de métodos de tratamiento apropiados. La Tabla 3 presenta las especificaciones relacionadas con la composición química, el tratamiento térmico y las propiedades de tracción que se requieren para el acero ferrítico grado P5. En la norma ASTM A335/A335M – 15a se pueden encontrar especificaciones adicionales para la fabricación de tuberías, incluidos el alcance, los detalles de envío, el análisis del producto, los criterios de elongación, las variaciones de diámetro permitidas y otra información relevante.



Tabla 2. Acero ASTM A335 Gr. P5, composición química, tratamientos térmicos y propiedades mecánicas [23].

<b>Requerimientos de composición química</b>								
Grado	Designación UNS	%						
		Composición						
		C	Mn	P	S máx.	Si	Cr	Mo
P5	K41545	0.15 máx.	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50 máx.	4.0-6.0	0.45-0.65
<b>Requerimientos de tratamiento térmico</b>								
Grado	Tratamiento térmico				Temperatura [°C]			
P5	Normalizado y revenido				675 °C			
<b>Requerimientos de tracción</b>								
Grado	Resistencia a la tracción mínima (MPa)				Resistencia a la fluencia mínima (MPa)			
P5	415				205			

En la práctica pueden utilizarse potencialmente diferentes procesos de soldadura por arco eléctrico. El proceso de soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW) se emplea principalmente para el pase de raíz en uniones a tope de tuberías. Esta preferencia se deriva de la velocidad de avance comparativamente más lenta de GTAW en comparación con los procesos de soldadura por arco con núcleo fundente (FCAW) y soldadura por arco de metal protegido (SMAW). En consecuencia, GTAW permite soldar en varias posiciones, incluidos escenarios en los que existen restricciones en las uniones. Los procesos de soldadura SMAW y FCAW se emplean comúnmente para aplicar relleno y completar pases en juntas ranuradas que se encuentran en tuberías y placas. Esta preferencia se debe a la mayor velocidad de alimentación y velocidad de deposición del metal de aporte que ofrecen estos procesos en comparación con el proceso GTAW.

En el contexto de proyectos que involucran la producción e instalación de uniones soldadas a tope en tuberías, es habitual el empleo de procedimientos de soldadura que utilizan una combinación de procesos de soldadura. El objetivo principal detrás de este enfoque es minimizar la duración del proceso de soldadura. Por ejemplo, las combinaciones comunes incluyen la soldadura por GTAW junto con la soldadura SMAW o GTAW combinada con la soldadura FCAW, entre otras.

Respecto al metal de aporte, se requiere que el MS posea una composición nominal idéntica a la del MB, con excepción del contenido de carbono. Por lo general, el metal de aporte exhibe un contenido de carbono más bajo en comparación con el metal base [3, 6]. Con el fin de mitigar la probabilidad de ocurrencia de fracturas, es recomendable emplear metales de aporte caracterizados por un bajo contenido de hidrógeno, adhiriéndose a las prácticas destinadas a minimizar los niveles de hidrógeno. Se deben hacer esfuerzos para reducir o eliminar las fuentes potenciales de hidrógeno. Esto implica la eliminación de la humedad y otras sustancias que contienen hidrógeno (por ejemplo, grasa, aceite, etc.) de las superficies del metal base, así como la utilización de metales de aporte no contaminados y deshidratados y gases de protección. Para garantizar el contenido de humedad adecuado de los metales de aporte, es imperativo cumplir con los protocolos apropiados para la fabricación, el empaque, el almacenamiento y la utilización. Esto requiere la utilización de hornos [24]. La siguiente tabla muestra los MS recomendados para la soldadura de acero ATM A335 Grado P5.

*Tabla 3. Metales de aporte para la soldadura de acero ASTM A335 Grado P5.*

Composición nominal	SMAW [24]	GTAW/GMAW [24]	SAW [3]
P5 (5Cr-0.5Mo)	E8018-B6, E8018-B6L, E502-15	ER80S-B6, ER502	F9XX- EXXX-B6 o B6H

Nota: 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. 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.

La utilización de gas de protección es necesaria en los procesos GTAW y GMAW cuando se utilizan materiales de aporte que contienen un contenido de cromo superior al 2.5% [6].

El logro de una soldadura exitosa de aceros de aleación ferríticos utilizados en recipientes a presión y tuberías requiere un tratamiento cuidadoso del precalentamiento y el control de

la temperatura durante el proceso de soldadura. Esto es crucial para evitar la aparición de endurecimiento y agrietamiento, ya que la presencia de cromo (Cr) y molibdeno (Mo) en estos aceros aumenta su templabilidad. Además, cuando se someten a estas condiciones, estos aceros se vuelven vulnerables a la fragilización por hidrógeno. Además, se observa que la velocidad de enfriamiento tiende a aumentar a medida que aumenta el espesor del acero [25].

La siguiente tabla presenta las temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pasadas recomendadas por los códigos, estándares o especificaciones de construcción para el acero que posee una composición nominal de 5 % de cromo y ½ % de molibdeno, que se incluye en la identificación P-Número 5B según la sección IX de ASME.

Tabla 4. temperaturas mínimas de precalentamiento [25].

Código de construcción, estándar o especificación	Espesor, mm Límites adicionales	Temperatura mínima de precalentamiento, °C	Temperatura entre pasadas, °C	Resistencia a la tracción máx. MPa
ASM HANDBOOK, Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering [26]	Todos los tamaños disponibles por las especificaciones ASTM	150	150 mín.	415
ASM HANDBOOK, Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering [26]	Todos los tamaños disponibles por las especificaciones ASTM	205	205 mín.	> 415
Power Piping - ASME B31.1-2016 [7]	Todos	150	150 mín.	SMTS ≤ 414
Process Piping – ASME B31.3-2014 [8]	Todos	200	200 mín., nota 2	SMTS > 414
Process Piping – ASME B31.3-2014 [8]	> 13 mm/%Cr ≥ 6.0, nota 1	200	200 mín., nota 2	
Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries -	Nota 3 y 4	Cualquier recomendación o requisito de precalentamiento indicado en el código	315 máx.	

SMTS: Especificación Mínima de Resistencia a la Tracción

Nota 1: La composición puede basarse en el análisis de la colada o producto o según los límites de la especificación ...

Nota 2: Después de iniciar la soldadura, la temperatura mínima de precalentamiento se mantendrá hasta realizar PWHT requerido.

Nota 3: Es posible que se requieran temperaturas más altas para juntas altamente restringidas (como boquillas muy separadas).

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.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 2.1. Tipo y Diseño de Investigación

Esta investigación es de tipo experimental aplicada, ya que se busca determinar la resistencia al creep de acero de estudio, eso se realizará mediante ensayos a probetas de acuerdo a la normatividad vigente, aborda una problemática que viene presentándose en la industria de transporte de fluidos a alta temperatura. La aplicación de teoría y conceptos existentes se aplica directamente a la resolución de un problema real.

Además, esta investigación se enmarca como una de tipo descriptiva, ya que permite describir el comportamiento del proceso de soldadura a partir del tamaño de grano de la unión soldada, después de un proceso de revenido. La investigación se enfoca en recopilar datos detallados de las variables para el ensayo correspondiente, como la resistencia de las probetas.

El diseño de la investigación es de tipo experimental ya que se llevará a cabo pruebas y ensayos a probetas para evaluar la resistencia de la unión soldada, esto permitirá determinar el valor real de la resistencia al creep, con lo cual se puede optimizar el diseño.

### 2.2. Variables, Operacionalización

#### **Variable Independiente**

- Proceso de soldadura según norma vigente.
- Tiempo de tratamiento térmico post soldadura a 730°C: 2h, 3 h, 4 h y 8 h.

#### **Variable Dependiente.**

- Resistencia al creep medida a partir de la velocidad mínima de creep
- Esfuerzo de rotura

Operacionalización de Variables.

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	Escala de Medición
Proceso de soldadura	La soldadura es un proceso de fijación en el cual se realiza la unión de dos o más piezas de un material, usualmente logrado a través de la fusión. Se puede agregar un material de aporte, al enfriarse, se convierte en una unión fija a la que se le denomina cordón.	La soldadura se realizó en Soldexa. Se utilizó 10 pases de soldadura, los dos pases de raíz se realizaron con el proceso GTAW y los 8 pases de relleno con el proceso de soldadura SMAW. En los pases de raíz se utilizaron como material de aporte electrodos ER80S-B6 de 2.4 mm y en los pases de relleno electrodos E8018-B6 de 3.25 mm.	Parámetros de soldadura	Registro bibliográfico	Microscopio	Tamaño de grano (micrómetros)
Tratamiento Térmico	El tratamiento térmico es un proceso que modifica las propiedades físicas, químicas o mecánicas de los materiales,	se realizó un tratamiento térmico post-soldadura a una temperatura de 730 °C	Temperatura de revenido	Registro bibliográfico	Horno	Temperatura (oC)

	principalmente metales y aleaciones. Se realiza calentando y enfriando las piezas en un horno a alta temperatura.					
<b>Resistencia al creep</b>	La resistencia al creep es la capacidad de un material para resistir la deformación que se produce por la aplicación de tensión durante un periodo de tiempo prolongado	El creep se produce cuando un material se somete a un esfuerzo constante y a una temperatura constante. Este fenómeno puede iniciar un modo de falla, como la aparición de grietas.	Temperatura de creep	Registro Bibliográfico	Revenido	Deformación (micrómetros)
<b>Esfuerzo de rotura</b>	El esfuerzo de rotura, también conocido como carga de rotura o resistencia a la tracción, es la fuerza máxima que un material puede soportar antes de romperse	Los ensayos de tracción se realizaron según la norma ASTM A370-17 a la junta soldada con tratamiento	Esfuerzo	Registro Bibliográfico	Maquina de ensayo para creep según la norma ASTM E139-00	Esfuerzo (N/mm <sup>2</sup> )

### **2.3. Población de estudio, muestra, muestreo y criterios de selección**

#### **Población**

La población de estudio de esta investigación está compuesta por las diversas aplicaciones del acero P5 e la industria petroquímica y cumple con la norma ASTM A335. Este acero fue suministrado por Soldexa, en forma de tubo sin costura con un espesor de 12 mm.

#### **Muestra.**

Las muestras seleccionadas para este estudio son probetas del cordón de soldadura al creep, según la norma ASTM E139-00.

Se ha considerado 03 probetas por cada condición de revenido a 730 oC. a diversos tiempos de 2 horas, 3, 4 y 8 horas, esto logrará una confiabilidad de mas del 90% de los resultados presentados.

#### **Muestreo**

Se aplicará un muestreo aleatorio simple para seleccionar las probetas que formaran parte de la muestra, cada probeta tendrá las mismas probabilidades de ser seleccionada para cada tipo de revenido que se realizará.

Dentro de los criterios de selección será que cada probeta pase una inspección visual que determine que cumple con la normatividad establecida para ser seleccionada.

### **2.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.**

#### **Técnicas Observación**

A través de esta técnica que consiste en la observación y el registro de los hechos o fenómenos sin la intervención en las variables, permite obtener información objetiva y no sesgada.



## **Analís documentario**

A través de esta técnica se ha establecido los diversos procesos que se debe seguir para las probetas, esto incluye la búsqueda de las normas específicas para cada proceso, como las dimensiones de la probeta, el procedimiento para el tratamiento térmico de la probeta, y la norma para la realización de los ensayos de tracción al creep de las mismas.

## **Instrumentos**

### **Ficha de Probeta**

En este instrumento se ha verificado el proceso de soldadura de acuerdo a la norma establecida, se ha realizado una inspección de la probeta, en este instrumento se detallan la cantidad y características de los cordones de soldadura empleados, además permite la observación de alguna imperfección con lo cual se descartaría la probeta.

### **Ficha de Tratamiento Térmico.**

En este instrumento se registra las condiciones del tratamiento térmico realizado a las probetas, esto incluye el registro de la temperatura del tratamiento térmico y del tiempo que se ha realizado, tomando en cuenta que se debe contar con probetas de diferente tiempo de tratamiento térmico para poder analizar su comportamiento.

### **Ficha de Tracción al Creep**

En este instrumento se registra el esfuerzo y el tiempo en que la probeta sometida a esfuerzo al creep, registra el valor del esfuerzo de rotura, de la probeta.

## **Validez**

En esta investigación se asegura la validez de los resultados ya que fueron las probetas elaboradas de acuerdo a norma, además del tratamiento

térmico se realizó bajo condiciones controladas y el ensayo de tracción al creep, se realizó en una máquina de ensayo estandarizada bajo la normatividad vigente, con lo cual se valida los resultados obtenidos a través de conceptos establecidos en la literatura especializada.

### **Confiabilidad**

La confiabilidad de los procedimientos y los instrumentos están garantizadas a través de la estabilidad y consistencia en la recolección de datos, con análisis de consistencia interna garantizando la confiabilidad de los instrumentos y procedimientos.

## **2.5. Procedimiento de análisis de Datos.**

### **Material de Estudio**

- Material base empleado en este estudio fue el acero P5, el cual es ampliamente utilizado en la industria petroquímica y cumple con la norma ASTM A335

### **Proceso de Soldadura.**

- Se utilizó 10 pases de soldadura, los dos pases de raíz se realizaron con el proceso GTAW y los 8 pases de relleno con el proceso de soldadura SMAW.

### **Caraterización**

- Microscopía Óptica
- Microcópía Electrónica de Barrido
- Medición de Dureza
- Ensayo de Tracción
- Ensayo de Creep

## **2.6. Aspectos Éticos.**

En todos los métodos de la actividad científica deben encaminarse en base a los principios generales y principios específicos establecidos en los Art. 5 y Art. 6 en el Código de Ética en Investigación de la USS. S.A.C.

Esta investigación se ha realizado tomando en cuenta los principios éticos para proteger la autonomía y el respeto por los derechos de autor.

Para los trabajos de investigación en seres humanos se debe aplicar la Declaración de Helsinki y el Reporte Belmont, además del asentimiento o consentimiento informado de ser el caso, que serán evaluados por el Comité Institucional de Ética en Investigación.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

##### Material de estudio

El material base empleado en este estudio fue el acero P5, el cual es ampliamente utilizado en la industria petroquímica y cumple con la norma ASTM A335. Este acero fue suministrado por Soldexa, en forma de tubo sin costura con un espesor de 12 mm, Figura siguiente. La composición química del material base se muestra en la Tabla siguiente.

*Figura. 9. Acero P5 soldado suministrado por Soldexa*



*Tabla 5. Composición química del acero P5.*

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.12	0.29	0.37	0.007	0.004	4.22	0.47

##### Proceso de Soldadura

La soldadura se realizó en Soldexa. Se utilizó 10 pases de soldadura, los dos pases de raíz se realizaron con el proceso GTAW y los 8 pases de relleno con el proceso de soldadura SMAW. En los pases de raíz se utilizaron como material de

aporte electrodos ER80S-B6 de 2.4 mm y en los pases de relleno electrodos E8018-B6 de 3.25 mm. La Tabla 2.2 muestra las características eléctricas utilizadas en el proceso de soldadura. La temperatura de precalentamiento y entre pasadas osciló entre 200 y 315 °C. Una vez finalizada la operación de soldadura, se realizó un tratamiento térmico post-soldadura a una temperatura de 730 °C durante 2 horas. Terminado el proceso de soldadura y tratamiento post soldadura, se procedió a seccionar la muestra para obtener probetas para los ensayos de creep, tracción y dureza.

*Tabla 6. Características eléctricas utilizadas en el proceso de soldadura del acero P5.*

Pasada	Proceso	Metal de aporte	Corriente	Rango de velocidad	Calor de aporte kJ/cm (máx.)
		Clase	Diám.	Amperaje	Voltaje
1	GTAW	ER80S-B6	2.4 mm	120 - 125	11.0 - 11.5
2	GTAW	ER80S-B6	2.4 mm	130 - 135	10.5 - 11.0
3	SMAW	E8018-B6	3.25 mm	105 - 110	22.5 - 22.8
4	SMAW	E8018-B6	3.25 mm	120 - 125	21.9 - 22.5
5	SMAW	E8018-B6	3.25 mm	120 - 125	22.3 - 22.7
6	SMAW	E8018-B6	3.25 mm	120 - 125	22.1 - 22.4
7	SMAW	E8018-B6	3.25 mm	120 - 125	22.5 - 22.8
8	SMAW	E8018-B6	3.25 mm	120 - 125	22.3 - 22.5
9	SMAW	E8018-B6	3.25 mm	115 - 120	21.8 - 22.1
10	SMAW	E8018-B6	3.25 mm	115 - 120	22.0 - 22.7

## Método de Caracterización

### Microscopia óptica

Las mediciones metalográficas se llevaron a cabo con el uso de un microscopio óptico Karl Zeiss. La probeta soldada se sometió a la técnica de preparación metalográfica estándar, que incluyó desbaste con papeles abrasivos con un tamaño de malla de 220, 320, 400, 600 y 1000; y pulido sobre paños cargados con pasta de diamante de tamaño de grano de 5 y 1 micrómetro. El ataque metalográfico se realizó con el reactivo Vilella.

### **Microscopia electrónica de barrido**

Para realizar observaciones de las muestras soldadas se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo Tescan. Las muestras fueron preparadas metalográficamente y luego fueron atacadas con el reactivo de Vilella por un período de 90 segundos. Bajo estas condiciones, fueron observados en el SEM. Este reactivo afecta a la matriz, lo que da como resultado que los precipitados queden en relieve para que puedan así ser examinados.

### **Mediciones de dureza**

Las mediciones de dureza se realizaron a la junta soldada con tratamiento post soldadura de 2 horas a 730 °C. Para ello se utilizó un durómetro marca Identec, usando la escala HV. Previas a las mediciones de dureza, la probeta soldada fue atacada con el reactivo Vilella para visualizar la junta soldada.

### **Ensayos de tracción**

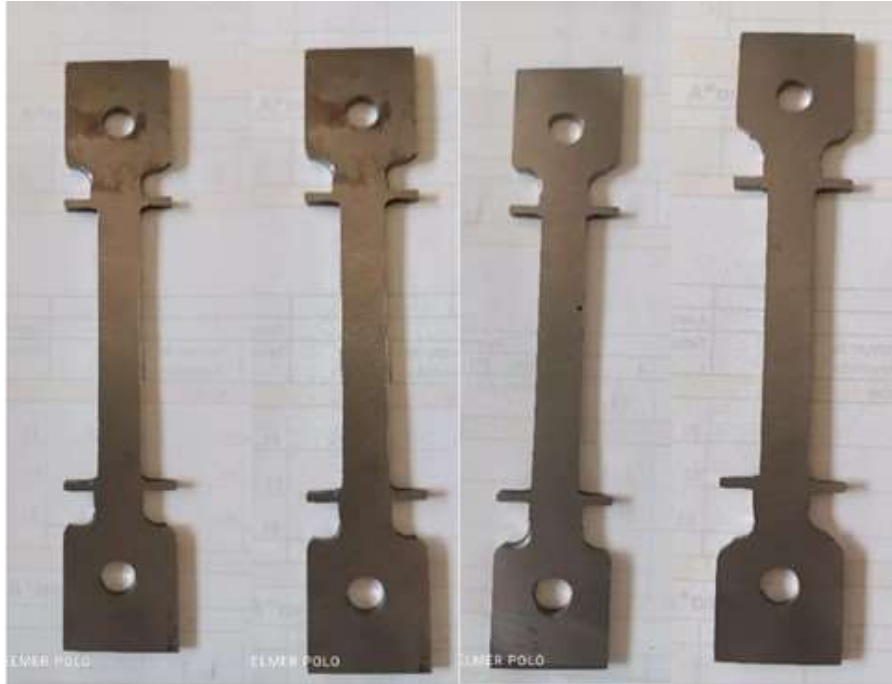
Los ensayos de tracción se realizaron según la norma ASTM A370-17 a la junta soldada con tratamiento post soldadura de 2 horas a 730 °C.

### **Ensayos de creep**

Para evaluar la resistencia a alta temperatura del acero P5 soldado, se consideró sobre revenidos a la misma temperatura del tratamiento térmico post soldadura tal que acumules tiempos de revenido a 730 °C de 2 horas, 3 horas, 4 horas y 8 horas. En el caso de revenido de 2 horas, corresponde a como se recibió el componente soldado y para el caso de tiempos mayores se aplicaron tratamientos

térmicos de revenido a 730 °C tal que acumulados lleguen a las 3 horas, 4 horas y 8 horas. En la Figura siguiente se muestran las 4 probetas de creep según la norma ASTM E139-00.

*Figura. 10. Probetas según la norma ASTM E139-00*



*Figura. 11. Montaje y ensayo culminado de creep*



## Modelo Experimental

Para evaluar la resistencia a alta temperatura del acero P5 soldado, primero se calificó el componente soldado según la norma ASME B31.1-2016 mediante los ensayos de tracción y dureza. Posteriormente se realizaron los ensayos de creep. Se empleó un diseño unifactorial para recolectar datos con el objetivo de probar la hipótesis y alcanzar los objetivos.

## Resultados Detallados

El acero P5 suministrado presenta una microestructura compuesta de bainita y ferrita, como se muestra en la figura 3.1. El acero P5 presenta una composición de alrededor de 5 % de Cr y presenta carburos ricos en cromo como los M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> y ricos en Mo como los M<sub>2</sub>C. La figura 3.2 muestra el análisis dispersivo en energía del acero P5 mediante el mapeo químico de la superficie del acero, donde se observa la presencia de regiones alto en Cr y alto en Mo mostrando la presencia de los carburos.

*Figura. 12. Fotomicrografía óptica y fotomicrografía electrónica del acero P5. Microestructura: bainita + ferrita.*

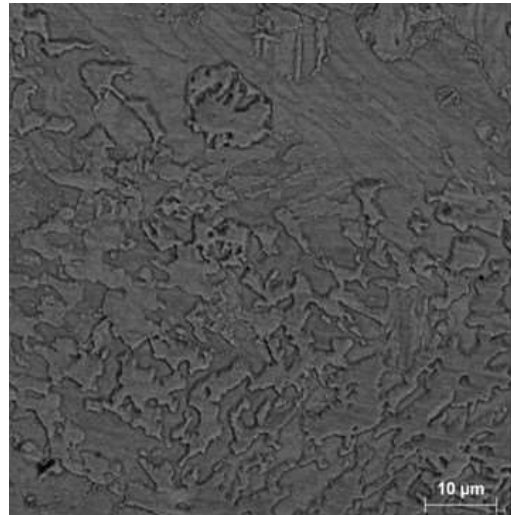
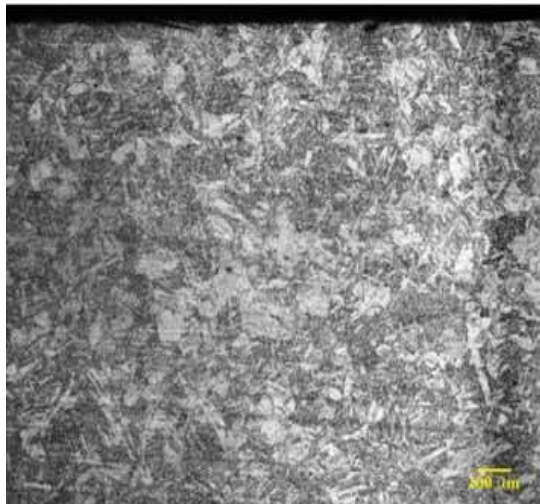




Figura. 13. Espectroscopía dispersiva en energía del acero P5.

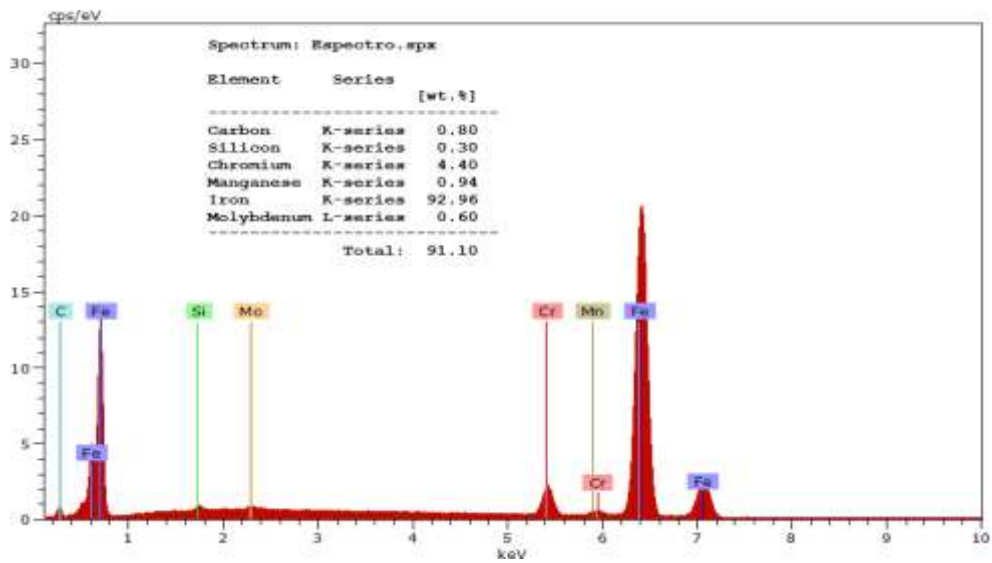
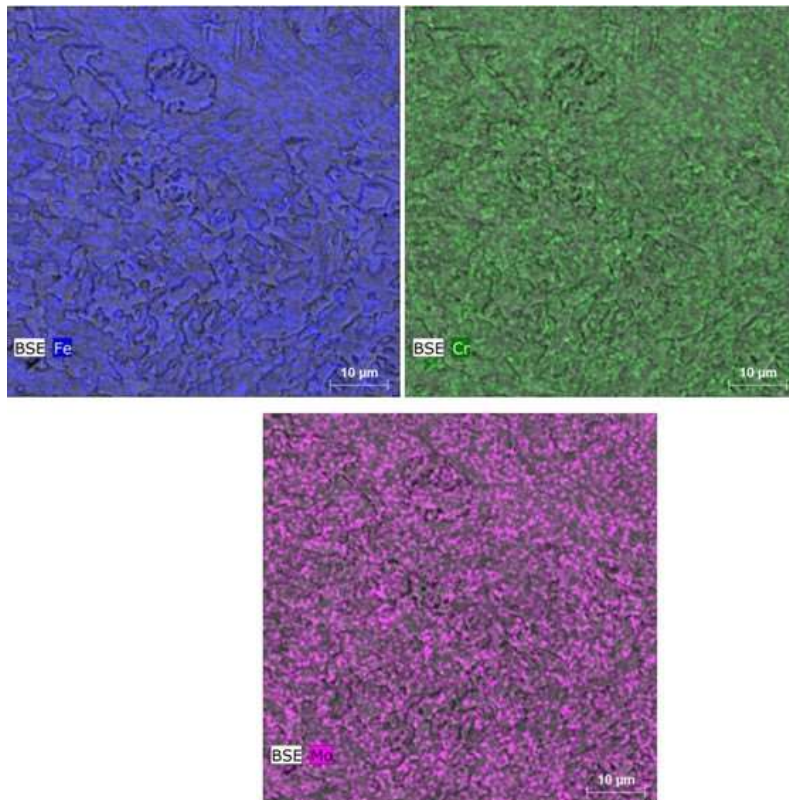


Figura. 14. Espectroscopía dispersiva en energía del acero P5.



Después del proceso de soldadura y tratamiento térmico de 2 horas a 730 °C el componente soldado muestra una microestructura que es características en cada región de la zona afectada por el ciclo térmico del proceso de soldadura (ZAC). La

figura 3.3 presenta la microestructura completa del componente P5 soldado y tratado térmicamente post soldadura, mostrando las partes más significativas de la junta soldada.

Tres áreas principales están involucradas en la soldadura de aceros P95: el metal de soldadura que se deposita durante el proceso de soldadura; la zona afectada por el calor, que es un área donde el ciclo térmico del proceso de soldadura afecta la microestructura del metal base; y el metal base, que se ve afectado por el tratamiento térmico posterior a la soldadura. La temperatura máxima alcanzada durante el proceso de soldadura determina principalmente las alteraciones microestructurales en la zona afectada por el calor [27, 28]. Tres áreas principales componen la zona afectada por el calor. La primera es la zona afectada por el calor de grano grueso (ZACGG), que se refiere a la zona cercana a la línea de fusión y experimentó temperaturas significativamente más altas que  $Ac_3$ ; la segunda es la zona afectada por el calor de grano fino (ZACGF), que se refiere a la zona donde las temperaturas superaron ligeramente al  $Ac_3$ ; y la tercera es la zona afectada por el calor intercrítico (ZACIC), región donde las temperaturas estuvieron en el rango de  $Ac_3$  y  $Ac_1$ .

El metal de soldadura presenta una estructura de granos columnares, producida por el crecimiento del grano austenítico a lo largo del gradiente térmico impuesto por el ciclo térmico de la soldadura. Durante el tratamiento térmico post soldadura a  $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el metal de soldadura conserva su morfología columnar, Figura 3.5. El metal de soldadura presenta una microestructura de martensita revenida con granos columnares presentando una morfología de listones de martensita.

La línea de fusión que corresponde la parte donde el material base llega a su temperatura de fusión presenta una estructura de martensita revenida gruesa morfología columnar de los granos de austenita previa a bajos aumento, no se vio afectada por el tratamiento térmico post soldadura.

En el proceso de soldadura, durante el enfriamiento esta región se transforma a martensita y durante el tratamiento post soldadura se transforma en martensita revenida como se observa en la Figura siguiente.

Figura. 15. Junta soldada del acero P5 Mostrando las diferentes áreas de componente soldado. MS: metal de soldadura, LF: línea de fusión, ZAC: zona afectada por el calor, y MB: material base.

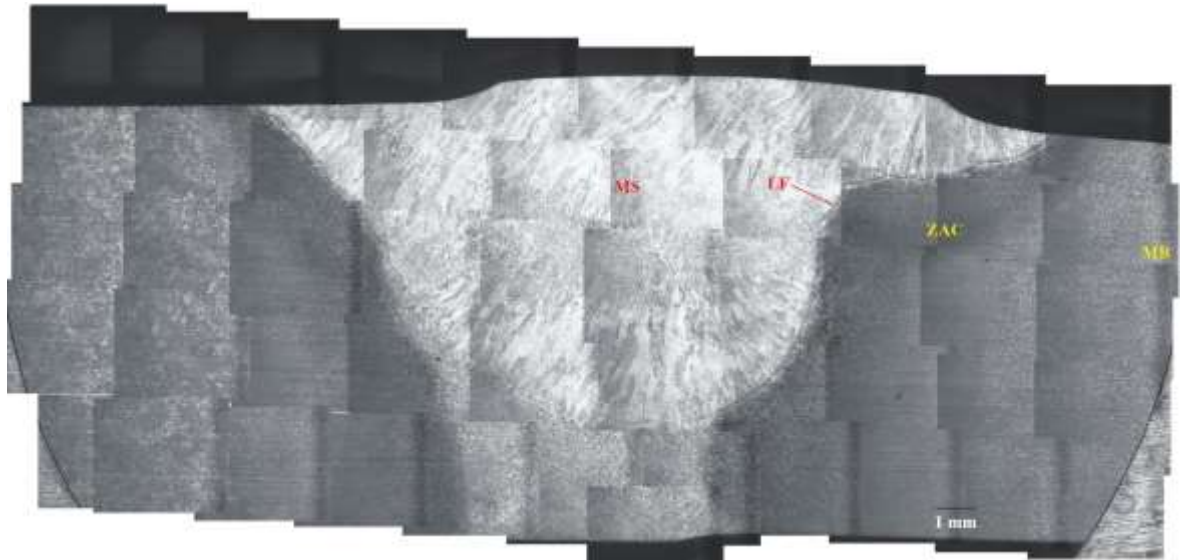


Figura. 16. Fotomicrografía óptica del metal de soldadura del acero P5. Microestructura: granos columnares de martensita revenida.

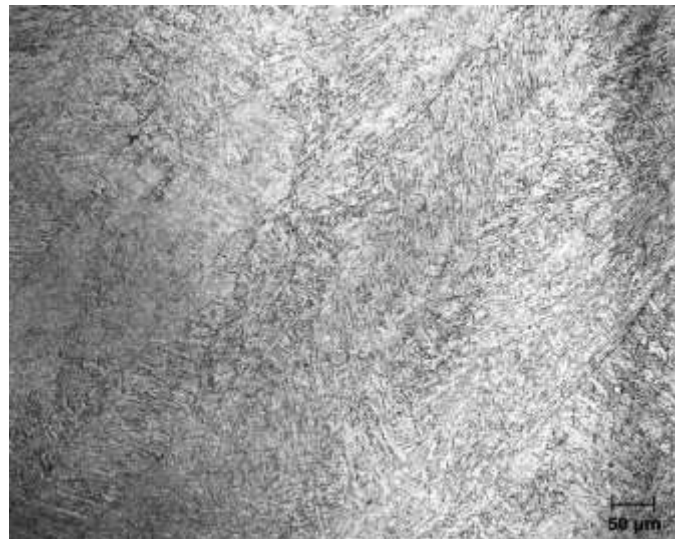
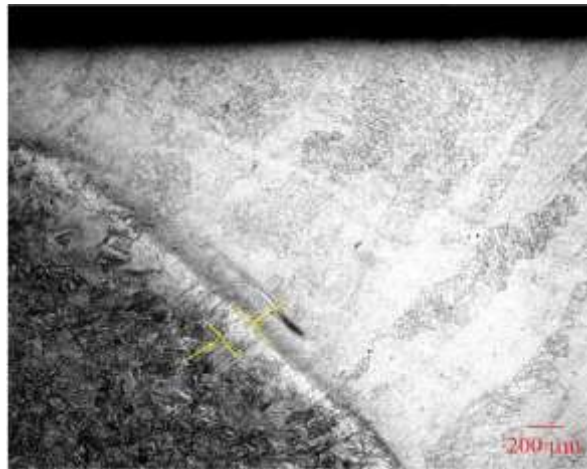
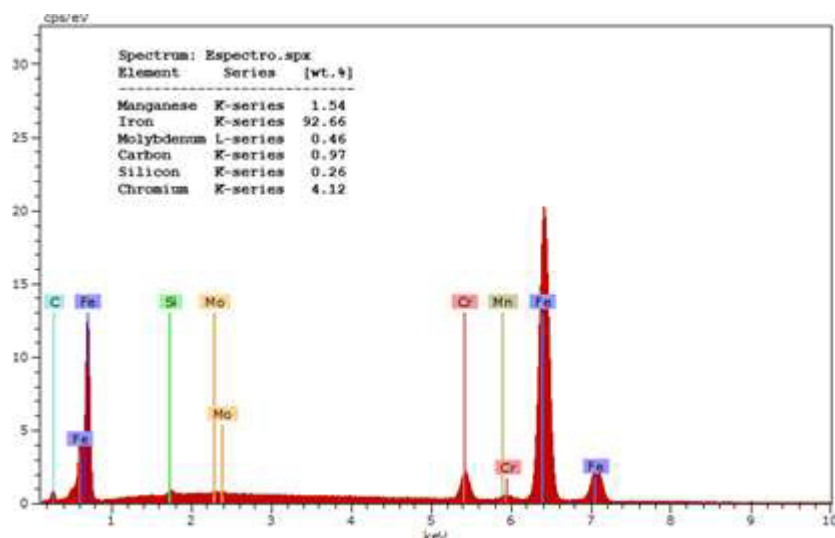


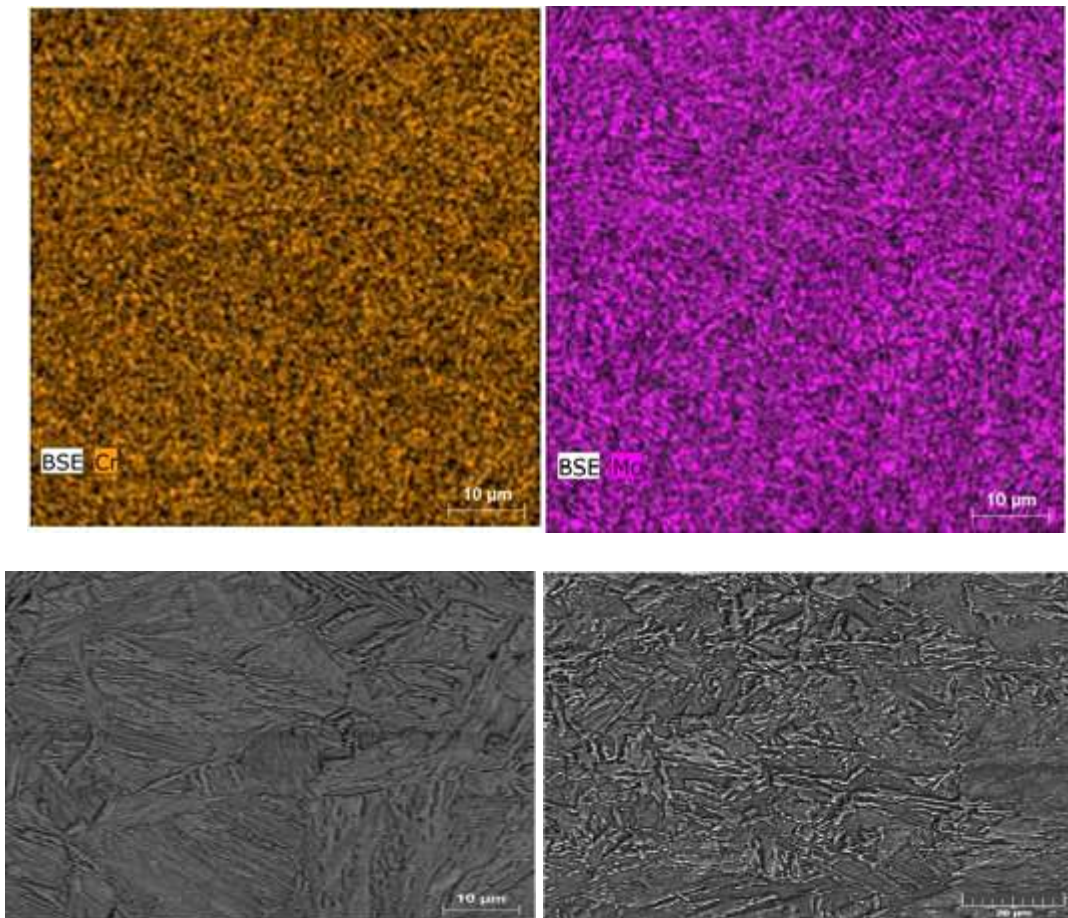
Figura. 17. Fotomicrografía óptica del metal de soldadura del acero P5. Microestructura: granos columnares de martensita revenida.



Dentro de la zona afectada por el calor de grano grueso (ZACGG) el ciclo térmico inducido por la soldadura provoca la disolución de los precipitados y facilita el desarrollo del grano. En consecuencia, los elementos de aleación, después del procedimiento de soldadura, se encontrarán en su mayor proporción como elementos en solución sólida. En esta zona, durante el tratamiento térmico post soldadura a 730 °C, ocurre una re-precipitación de partículas M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> y M<sub>2</sub>X. La ZACGG muestra una estructura martensítica revenida formada por gruesos listones de martensita. La Figura 3.7 muestra la ZACGG con su respectivo espectro dispersivo de energía que indica la composición química de esta región y presencia de precipitados.

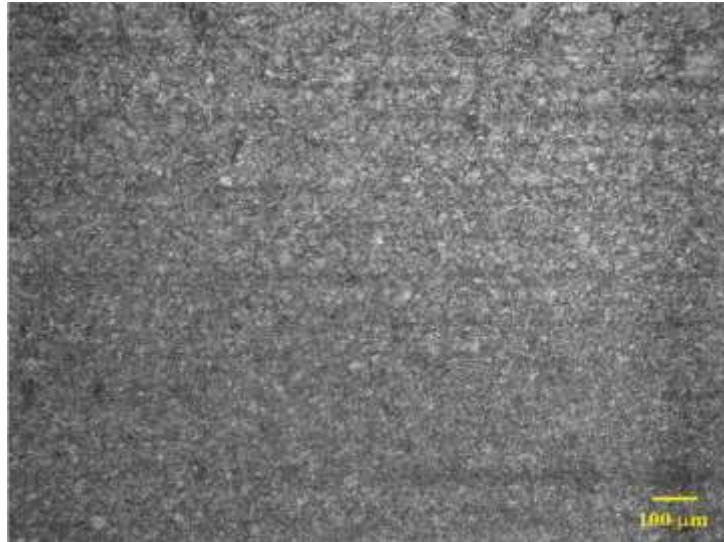
Figura. 18. Fotomicrografía óptica, electrónica y espectro dispersivo de energía de rayos X (EDS) de la ZACGG del componente P5 soldado





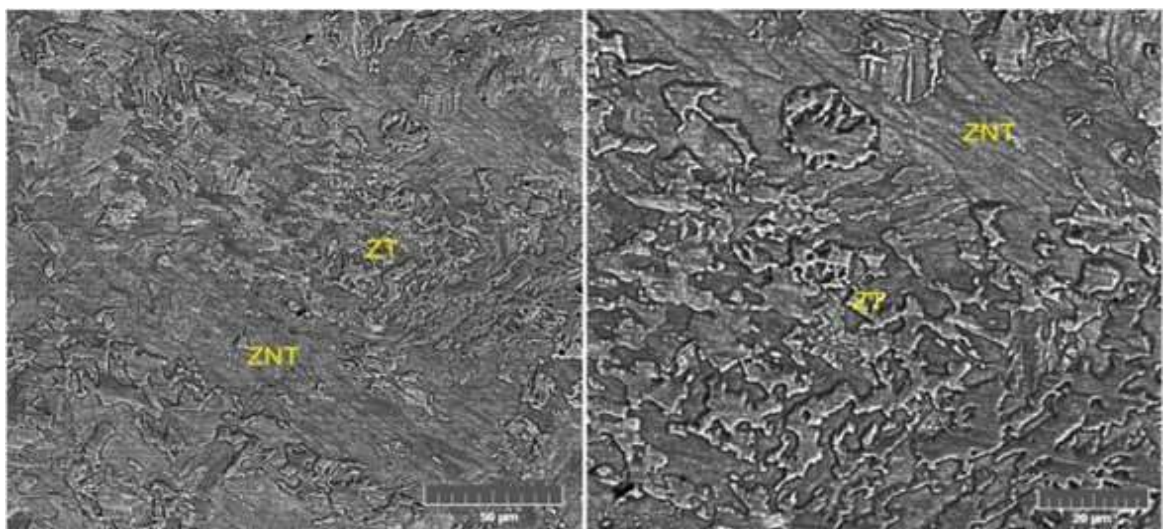
La zona afectada por el calor de grano fino (ZACGF) durante el ciclo térmico de soldadura alcanza temperaturas superiores al  $A_{c3}$ , lo que permite la transformación completa a austenita. Debido a la baja cantidad de elementos aleantes presentes en la solución sólida, en esta región ocurre una mínima re-precipitación de partículas durante el tratamiento térmico después de la soldadura. Esta zona está compuesta de granos de austenita previa muy finos (hasta  $10\ \mu\text{m}$ ), que tienen una estructura martensítica, como se muestra en la figura.

*Figura. 19. Fotomicrografía óptica y electrónica de la ZACGF del componente P5 soldado.*



Durante la soldadura, en el rango de temperaturas de la zona afectada por el calor intercrítica (ZACIC) ocurre una transformación parcial a austenita, un sobre revenido de la zona no transformada a austenita y un engrosamiento de los precipitados. Todo esto origina una estructura muy heterogénea. Después del tratamiento térmico post soldadura, esta región presenta regiones transformadas con una estructura martensítica revenida y regiones no transformadas con una estructura de martensita sobre revenida, Figura siguiente. En esta zona, similar a la ZACGF, presenta un alto grado de precipitación de partículas de segunda fase.

*Figura. 20. Fotomicrografía electrónica de la ZACIC del componente P5 soldado. ZT: zona transformada; ZNT: zona no transformada.*



El tamaño de la zona afectada por el calor de grano grueso fue de alrededor de 700  $\mu\text{m}$ ; el tamaño de la zona afectada por el calor de grano fino fue de alrededor de 1000  $\mu\text{m}$ ; y el tamaño de la zona afectada por el calor de grano intercrítica fue de alrededor de 1300  $\mu\text{m}$ , esto hace un total de ZAC de alrededor de 3 mm, como se muestra en la Figura 21.

La Figura 22 muestra los perfiles de dureza obtenidos en la última pasada de soldadura y en el pase de raíz del componente soldado y tratado térmicamente a 730 °C por 2 horas. Las mediciones de dureza realizadas en las últimas pasadas de la junta soldada reportaron para el metal de soldadura valores promedios de  $214.8 \pm 6.8$  HV10, mientras que en el pase de raíz del metal de soldadura el valor promedio fue de  $206.7 \pm 12.8$  HV10. Ambas mediciones cumplen con los requisitos de la Sección IX, del Código ASME para calderas y recipientes a presión que menciona durezas menores de 225 HB.

Figura. 21. Regiones de la junta soldada del acero P5. MS: metal de soldadura; LF: línea de fusión; ZACGG: zona afectada por el calor grano grueso; ZACGF: zona afectada por el calor grano fino; ZACIC: zona afectad por el calor intercrítica.

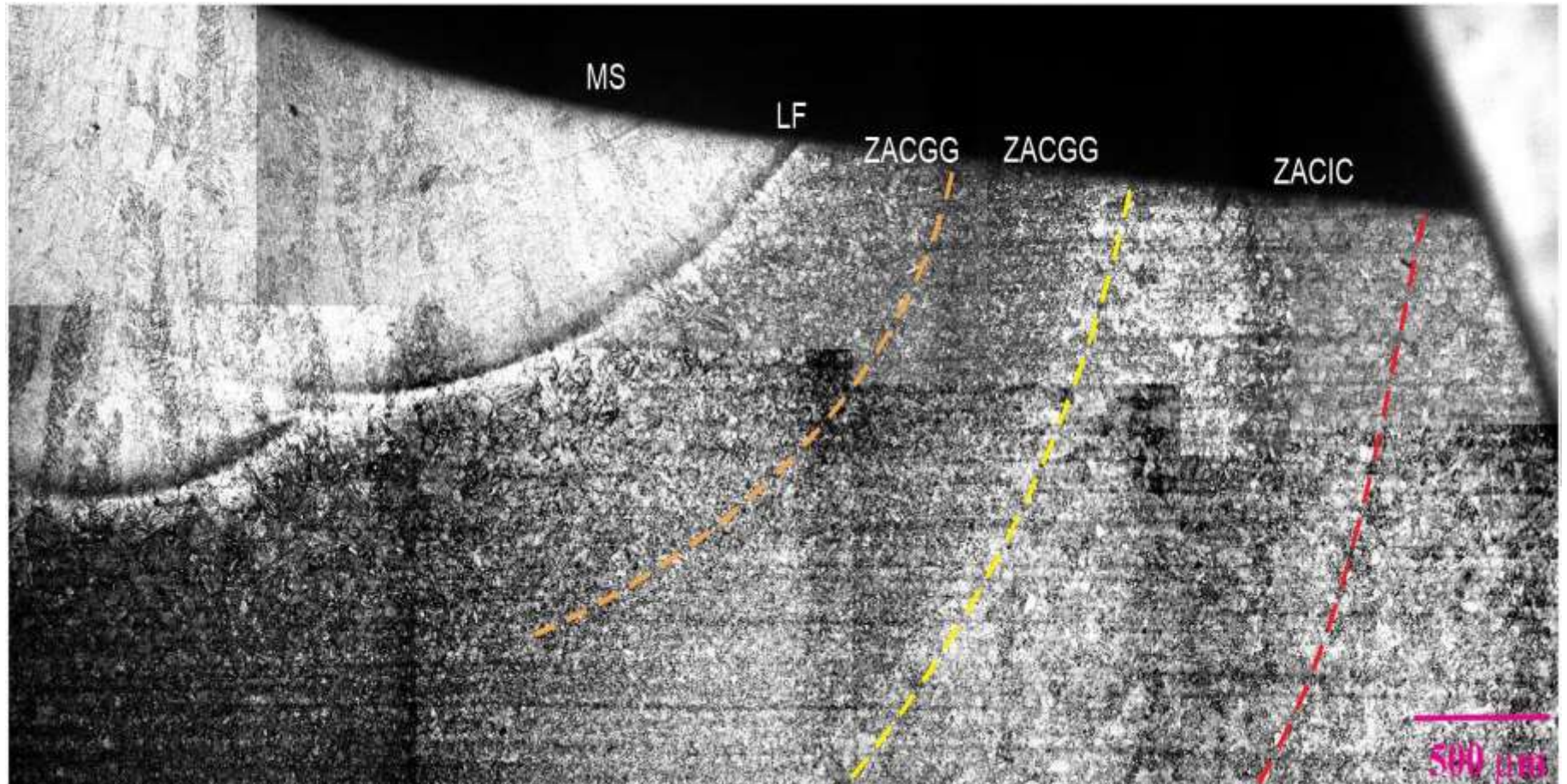
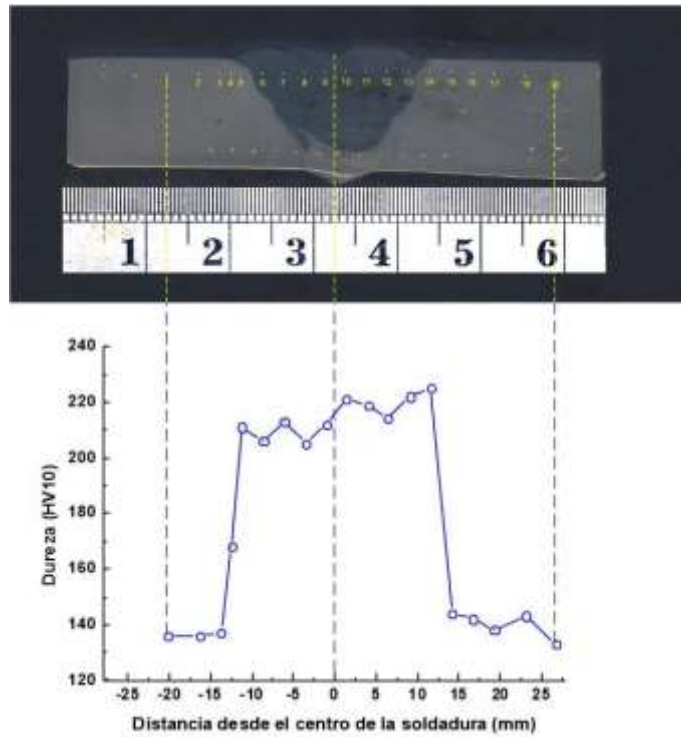
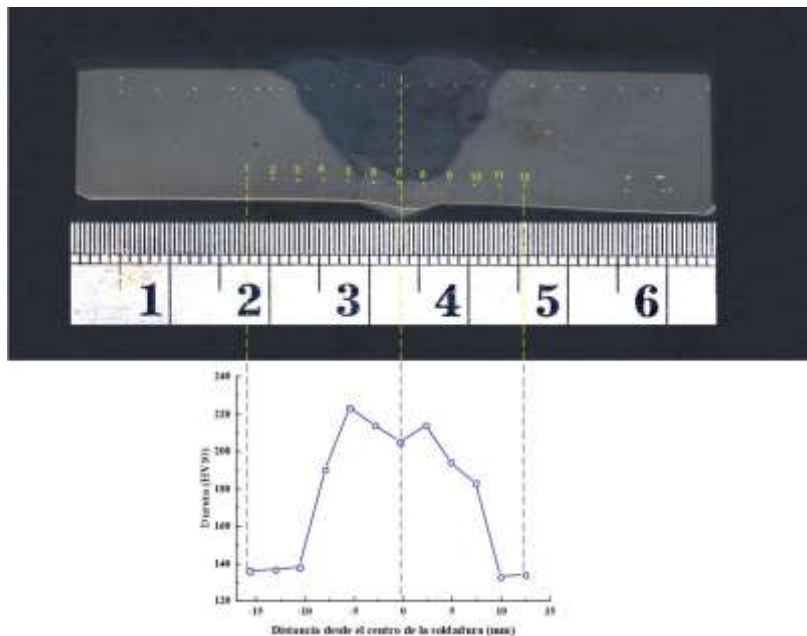




Figura. 22. Perfil de dureza medido en la última pasada de soldadura y en el pase de raíz de la junta soldada de acero P5



D	-20.2	-16.3	-13.8	-12.5	-11.3	-8.7	-6.1	-3.5	-1.0	1.4	4.0	6.3	9.1	11.6	14.1	16.7	19.3	23.1	26.8
HV10	136	136	137	168	211	206	213	205	212	221	219	214	222	225	144	142	138	143	133



D	-15.6	-13.1	-10.6	-7.9	-5.5	-2.9	-0.3	2.3	4.8	7.4	9.9	12.4
HV10	136	137	138	190	223	214	205	214	194	183	133	134

D = distancia desde el centro de la soldadura; HV10 = dureza Vickers

Con lo que respecta a la zona afectada por el calor de grano grueso y la zona afectada por el calor de grano fino, durante el proceso de soldadura estas zonas alcanzaron temperaturas mayores a Ac3 por lo que sufrieron una transformación a martensita durante el enfriamiento. Durante el proceso de tratamiento térmico post soldadura realizado a una temperatura de 730 °C, la dureza del metal de soldadura disminuirá debido a la transformación en martensita revenida. De igual manera la zona afectada por el calor de grano grueso durante el tratamiento post soldadura ocurre la transformación de la martensita en martensita revenida, lo que produce la disminución de su dureza. La zona afectada por el calor de grano fino es la zona donde la caída en dureza es mayor. Esto se debe a la poca o nada precipitación de partículas en sus límites de grano de austenita previa lo cual disminuye drásticamente el endurecimiento de los límites de grano [29].

Durante el proceso de soldadura, en la zona afectada por el calor intercrítica se produce una transformación parcial en austenita. Además, se produce un sobre revenido en la región que no sufre transformación en austenita, lo que provoca el engrosamiento de los precipitados. Este fenómeno produce una estructura que presenta una fuerte heterogeneidad y esto explica la baja dureza de la zona afectada por el calor intercrítica.

La Figura 3.11 muestra las curvas de tracción realizadas a la junta soldada, dos repeticiones. Los valores reportados fueron para la resistencia a la tracción de 497 y 498 MPa y para tensión de fluencia de 327 y 340 MPa. Las mediciones de resistencia a la tracción obtenidas cumplen con los requisitos de la Sección IX, del Código ASME para calderas y recipientes a presión que menciona resistencia a la tracción mayores a 415 MPa.

Para evaluar la resistencia a alta temperatura de la junta soldada, se realizaron tratamientos de revenido adicionales a la misma temperatura del tratamiento térmico

post soldadura de 730 °C, tal que los tiempos acumulados reporten tratamientos térmicos post soldadura de 2 horas, 3 horas, 4 horas y 8 horas. Posteriormente se sometieron a ensayos de creep a 120 MPa y 600 °C.

Las curvas de creep de las uniones soldadas a diferentes tiempos de tratamiento térmico después de la soldadura se muestran en la Figura 23. En este caso, se utilizó mecanizado para extraer muestras de creep de la ubicación central (espesor medio) de las juntas soldadas.

Figura. 23. Ensayos de tracción de la junta soldada de acero P5

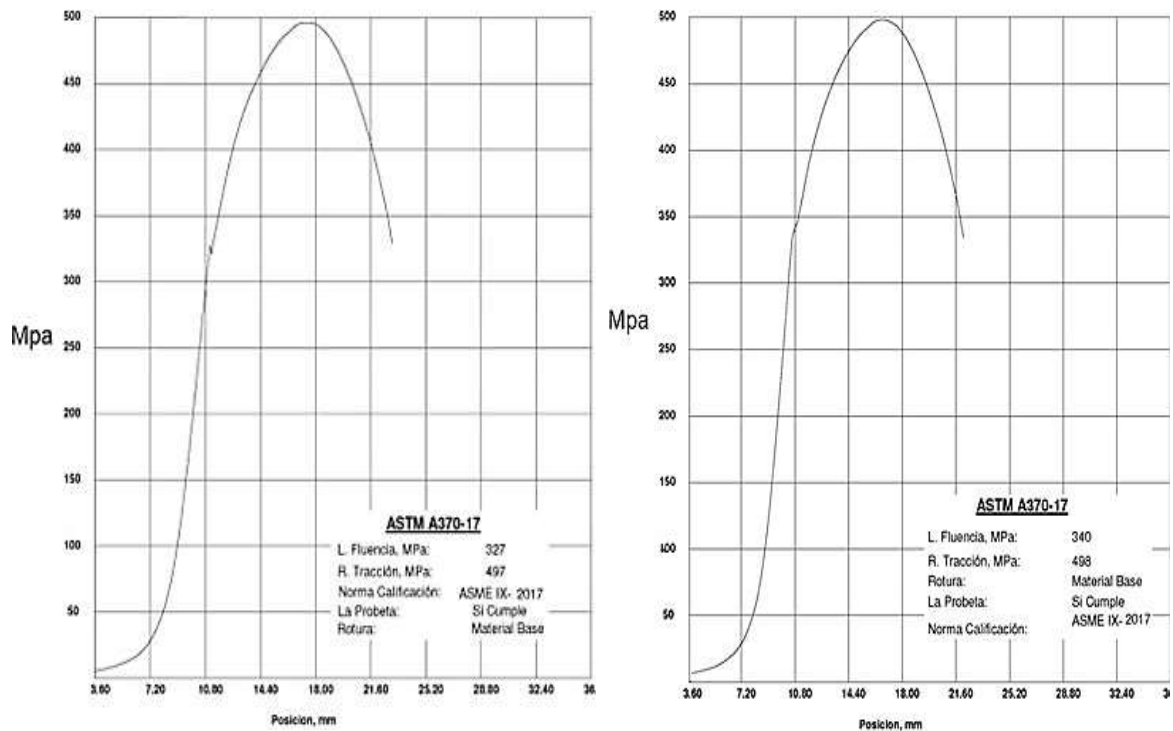


Figura. 24. Tiempo de deformación a diferentes horas de tratamiento térmico – curva de creep estandar

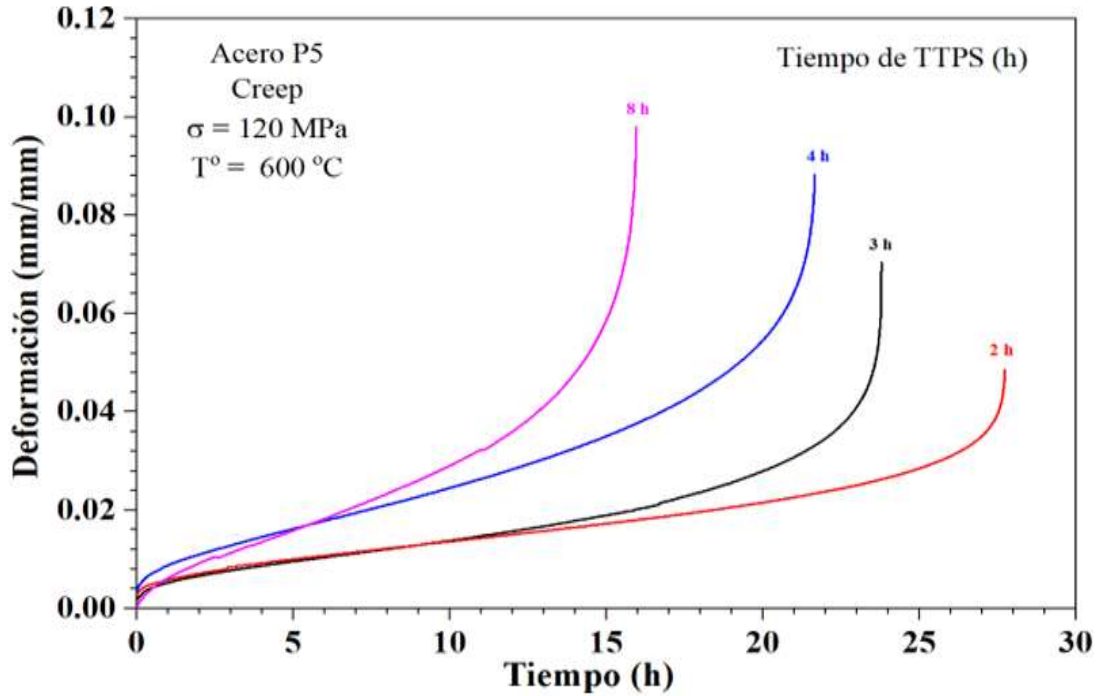
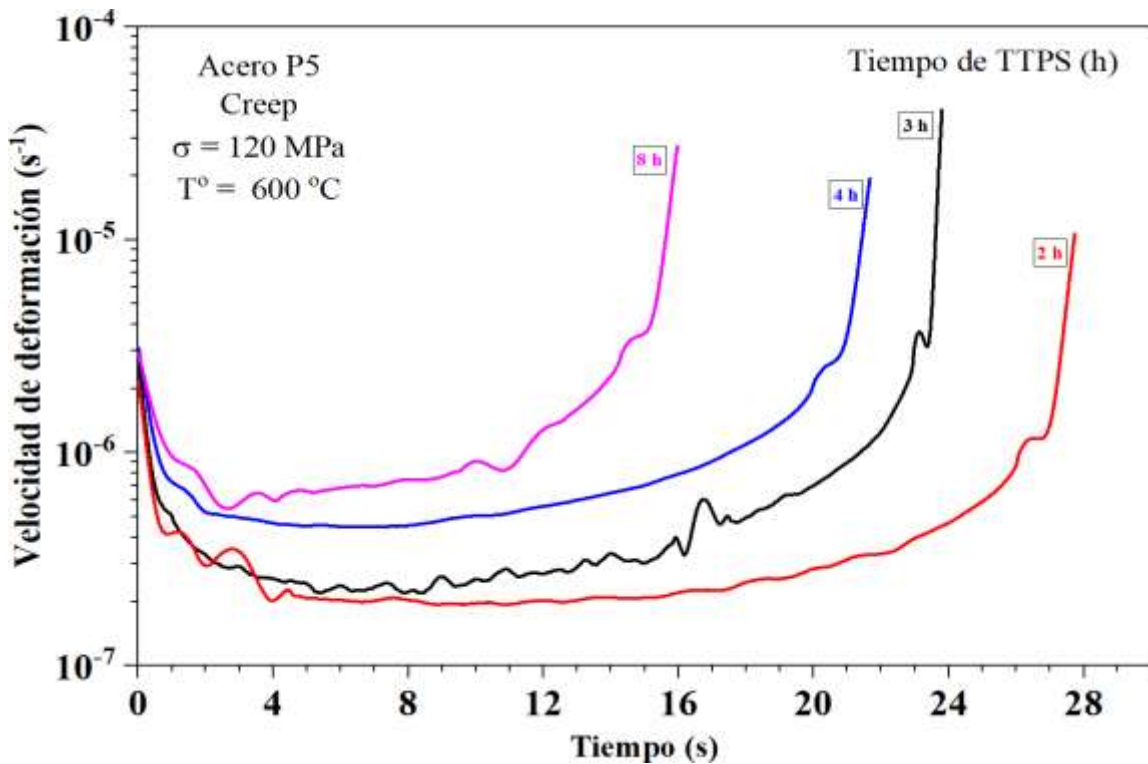


Figura. 25. Curvas de creep de la junta soldada del acero P5 con diferentes tiempos de tratamiento post soldadura - velocidad de creep frente al tiempo.



Con base en los resultados mostrados en la figura se puede observar la etapa secundaria exhibe una extensión considerable, pero la etapa terciaria es más bien breve. La Tabla 3.1 presenta un resumen de los resultados de las pruebas de creep realizadas a la junta soldada del acero P5. En general, según los datos mostrados en la Tabla 3.1, existe una consistencia en el comportamiento a creep observada en las muestras obtenidas con diferentes tiempos de tratamiento post soldadura. Un tiempo de 2 horas de tratamiento térmico post soldadura a 730 °C, permite obtener la más alta resistencia al creep de la junta soldada del acero P91 con una velocidad de creep de  $2.01 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ , y un tiempo de rotura al creep de 27.73 h.

Tabla 7. Resultados de los ensayos de creep de la soldadura con diferentes tiempos de tratamiento post soldadura, a 600 °C y 190 MPa.

Tiempo TTPS $t_{TTPS}(h)$	Tiempo de fractura $t_f(h)$	Velocidad mínima de creep $\dot{\epsilon}_m (s^{-1})$	Deformación (%)
2	27.73	$2.01 \times 10^{-7}$	4.8
3	23.80	$2.60 \times 10^{-7}$	7.0
4	21.67	$4.71 \times 10^{-7}$	8.8
8	15.97	$7.03 \times 10^{-6}$	9.8

### 3.2. Discusión.

Una vez finalizados los ensayos de creep, las muestras fracturadas se sometieron a análisis. El examen del daño por creep se realizó en las secciones metalográficas longitudinales de las muestras que tenían fracturas por creep a lo largo de la junta soldada. Esta investigación utilizó técnicas de metalografía óptica y se muestra en la figura 3.10. En todas las probetas ensayadas a creep la fractura ocurre en la ZACGF, a excepción de la probeta con tratamiento post soldadura de 8 h que fallo en el metal de soldadura.

Figura. 26. Tratamiento térmico post soldadura de 2 h a 730°C

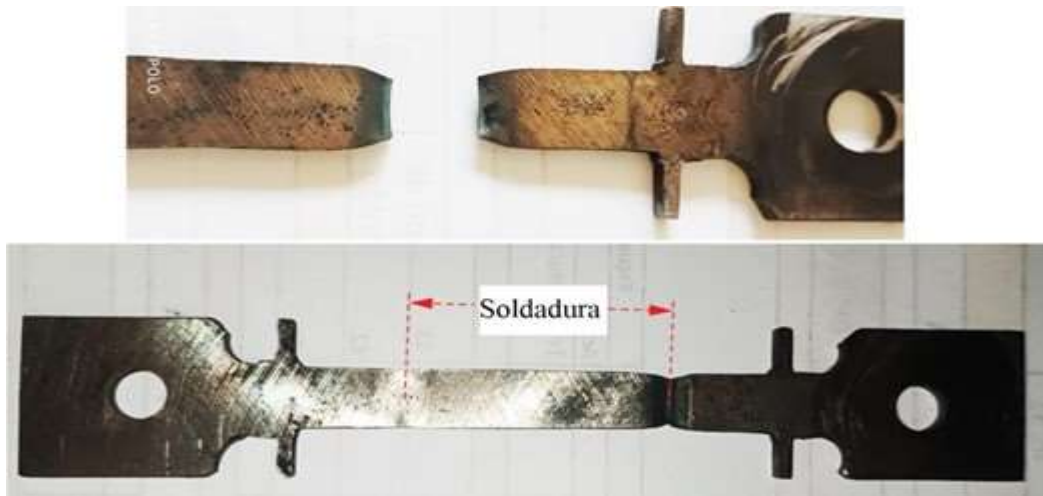


Figura. 27. Tratamiento térmico post soldadura de 3 h a 730°C

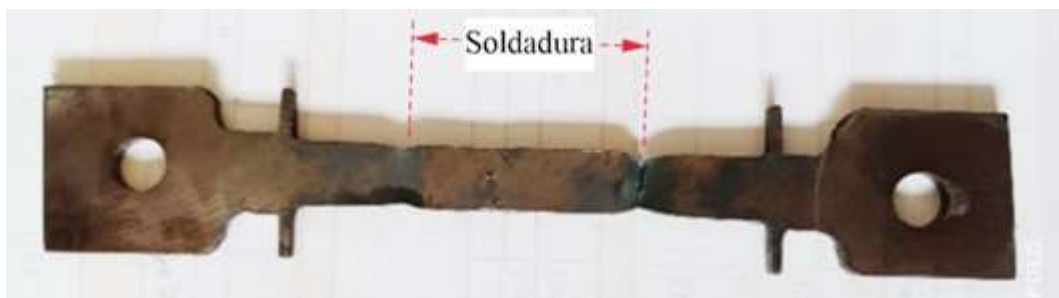


Figura. 28. Tratamiento térmico post soldadura de 4 h a 730°C

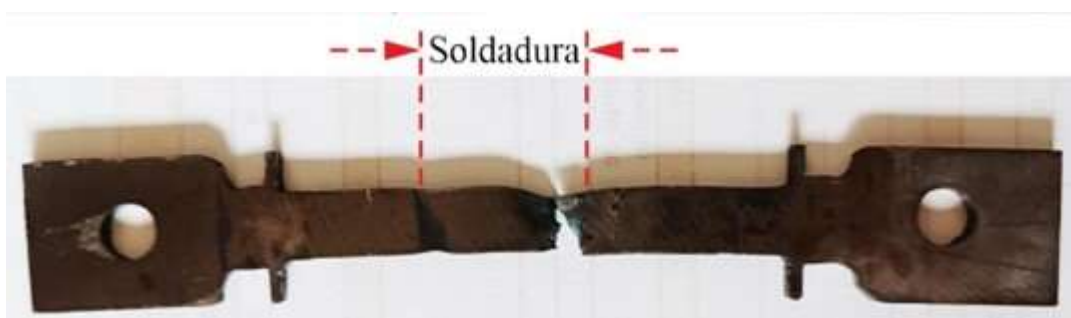
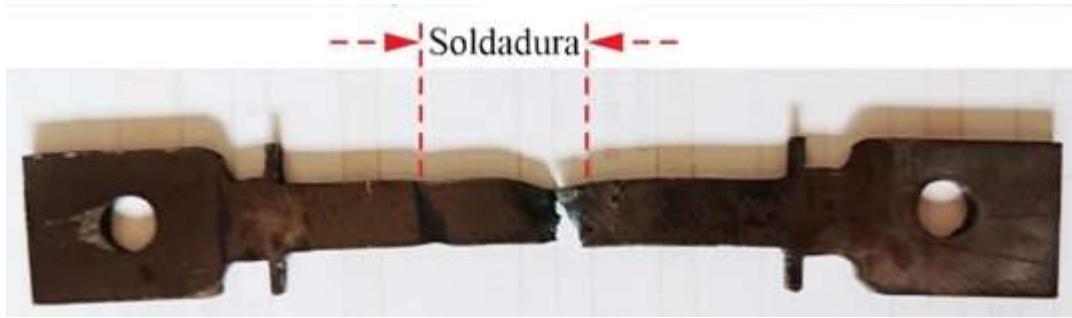


Figura. 29. Tratamiento térmico post soldadura de 8 h a 730°C



## IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 4.1. Conclusiones

- La junta soldada y tratada térmicamente, estuvo compuesta por diferentes regiones. El metal de soldadura (MS) estaba compuesto por martensita revenida con grano columnares. La zona afectada por el calor de grano grueso (ZACGG) presentó una estructura compuesta por listones gruesos de martensita. Una estructura de martensita fina se observó en la zona afectada por el calor de grano fino (ZACGF), mientras que una estructura heterogénea compuesta de martensita revenida y sobre revenida se observó en la zona afectada por el calor intercrítica (ZACIC).
- El tamaño de la ZAC fue de alrededor de los 3 mm con una ZACGG de 0.7 mm, una ZACGF de 1.0 mm y ZACIC de 1.3 mm. El área más pequeña de la zona afectada por el calor fue la de grano grueso.
- El componente soldado presentó valores de dureza y resistencia que cumplen con los requisitos de la Sección IX, del Código ASME para calderas y recipientes a presión. La dureza del MS en las últimas pasada de soldadura fue de  $214.8 \pm 6.8$  HV10, mientras que en el pase de raíz del MS el valor promedio fue de  $206.7 \pm 12.8$  HV10. La resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia de la junta soldada fue de 498 MPa y 340 MP y rompió en el metal base.
- Los ensayos de creep demostraron que la degradación de la ZACGF durante el proceso de soldadura y posterior tratamiento térmicos post soldadura a 730 °C provocaron las fallas tipo IV en los aceros tratados por 2, 3 y 4 horas. En el caso del tiempo de tratamiento térmico posterior a la soldadura de 8 horas, la falla ocurrió en el MS.
- Un tiempo de tratamientos térmicos post soldadura de 2 h a 730 °C permite obtener la más alta resistencia al creep de la junta soldada del acero P5 con una velocidad de creep de  $2.01 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup>. Tiempos mayores a 4 horas deterioran las propiedades a alta temperatura del acero.



#### **4.2. Recomendaciones.**

- Debido a su relevancia en la industria petroquímica, los aceros resistentes a altas temperaturas como el P5 están actualmente siendo investigados en todo el mundo. Basado en esto, se recomienda continuar con los estudios para lograr los parámetros de temperatura y tiempo de tratamiento térmico más óptimos para las uniones de juntas soldadas disimiles como P5/P22, P22/P11 y P5/P11. Los aceros P11, P22 y P5, son los tres tipos de aceros más utilizados en las plantas petroquímica y cuyas juntas soldadas con aceros diferentes son actualmente realizados en los diferentes cambios de componentes fallados. Estos parámetros de tratamiento térmico después de la soldadura optimizados deberían poder producir las juntas soldadas con la propiedad deseada.
- Los aceros resistentes a altas temperaturas como el P5 están actualmente siendo investigados en todo el mundo debido a su relevancia en la industria petroquímica. Basado en esto, se recomienda continuar con la investigación para lograr los parámetros de temperatura y tiempo de tratamiento térmico más óptimos para las uniones de juntas soldadas disimiles como P5/P22, P22/P11 y P5/P11. Los tres tipos de aceros más comunes en las plantas petroquímicas son P11, P22 y P5, y las juntas soldadas con estos aceros diferentes se realizan actualmente en varios cambios de componentes fallados. Después de la soldadura, estos parámetros de tratamiento térmico optimizados deberían producir juntas soldadas con la propiedad deseada.

## V. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] 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.
- [2] *Creep Properties of Heat Resistant Steels and Superalloys*. Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 87–89.
- [3] *ASM HANDBOOK*. 10th edition. Volumen 1 Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys and Low - Alloy Steels". ASM International.
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] American Petroleum Institute. (2019). "API 582 2nd edition - Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries".
- [7] The American Society of Mechanical Engineers. (2016). "Process Piping ASME B31.3-2016". Printed in USA
- [8] The American Society of Mechanical Engineers. (2015). "Process Piping ASME B31.3-2014". Printed in USA
- [9] 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.
- [10] S. P. Hong, S. H. 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.
- [11] 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.

- [12] Giudice F., Grasso A, Guglielmino E. and Sili A. “An experimentally-based procedure for residual life assessment of steel radiant tubes”. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 196, (2022), 104628
- [13] Merda A., Golański G., Wieczorek P., Staszalek K., “The Analysis of the Microstructure of Welded Joints in Steel P5 after Service”, No. 5, 2020, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*.
- [14] P. Aliprandi, E. Guglielmino, A. Sili, “Mechanical characterization of the ASTM A335P5 steel and reliability of radiant tubes after long operating time in a petrochemical industry furnace”. *La Metallurgia Italiana*, *International Journal of the Italian for Metallurgy*, October 2020.
- [15] P. Aliprandi, E. Guglielmino, A. Sili. “Damage assessment of topping furnaces radiant tubes and creep behaviour of ASTM A335 P5 steel”, *Materials at High Temperatures*, 2019, DOI: 10.1080/09603409.2019.1702365.
- [16] J. Liu, H. Yu, T. Zhou, Ch. Song, K. Zhang, “Effect of double quenching and tempering heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a novel 5Cr steel processed by electro-slag casting”, *Materials Science & Engineering A* 619 (2014) 212–220
- [17] V. Kumslytis, A. Vaclovas, O. Cernasejus. “Effect of PWHT on the Mechanical Properties of P5 Steel Welded Joints”, *Solid State Phenomena* Vol 165 (2010) pp 104- 109.
- [18] G. Cai, H. Andrén, L.E. Svensson, Microstructural change of a 5% Cr steel weld metal during tempering, *Materials Science and Engineering A* 242 (1998) 202–209.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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

- [22] G. F. Vander Voort. (1991). "Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels". Printed in USA
- [23] ASTM International. (2015). "A335/A335M - 15a Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service".
- [24] American Welding Society. (1996). "ANSI/AWS D10.8-96 Recommended Practices for Welding of Chromium-Molybdenum Steel Piping and Tubing".
- [25] 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.
- [26] ASM HANDBOOK. (1993). "Volumen 6 Welding Brazing and Soldering".
- [27] Lundin, C. D., Henning, J. A., Menon, R. and Khan, K. K. (1987). Transformation, Metallurgical Response and Behaviour of the Weld Fusion Zone and Heat Affected Zone in Cr-Mo Steels for Fossil Energy Applications, ORNL Report No. ORNL/Sub/81-07685/02&77, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- [28] Saini N., Raghav R., Bist V., Rahul S. Mulik, Manas Mohan Mahapatra C. (2021). Microstructural features and mechanical properties of similar and dissimilar ferritic welded joints for ultra-supercritical power plants, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 194 (2021) 104556. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104556>
- [29] Matsui, M., Tabuchi, M., Watanabe, T., Kubo, K., Kinugawa, J. and Abe, F. (2001). Degradation of Creep Strength in Welded Joint of 9%Cr Steel, *Iron Steel Institute of Japan International*, 41 suppl. S 126-S 130. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.Suppl.S126>

## VI. ANEXOS.

### Anexo 1: Pruebas laboratorio.



*Ilustración 2. Toma de datos mediante el montaje y ensayo al creep.*



*Ilustración 1. Verificación en el sistema sobre el montaje del creep.*



*Ilustración 3. Proceso de ensayo al Creep.*



*Ilustración 4. Herramientas utilizadas para el analisis del Creep.*



**ACTA DE CONTROL DE REVISIÓN DE  
SIMILITUD DE LA INVESTIGACIÓN**

Código: F3.PP2-PR.02

Versión: 02

Fecha: 18/04/2024

Hoja: 1 de 1

Yo, **Silvia Yvone Gastiaturú Morales**, coordinador de investigación del Programa de Estudios de Ingeniería Mecánica Eléctrica, he realizado el control de originalidad de la investigación, el mismo que está dentro de los porcentajes establecidos para el nivel de Pregrado, según la Directiva de similitud vigente en USS; además certifico que la versión que hace entrega es la versión final de la Tesis titulado: **ESTUDIO MICROESTRUCTURAL Y COMPORTAMIENTO AL CREEP DE UNA JUNTA SOLDADA DEL ACERO ASTM A335 P5 A 600 °C**, elaborado por el (los) Bachiller(es):

**EXEBIO CAJO GUILLERMO MANUEL**

**LEON GARCIA CARMEN GUADALUPE DE JESUS**

Se deja constancia que la investigación antes indicada tiene un índice de similitud del **25%**, verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el software de similitud TURNITIN.

Por lo que se concluye que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con lo establecido en la Directiva sobre índice de similitud de los productos académicos y de investigación vigente.

Pimentel, 09 de febrero de 2025

**Dra. Gastiaturú Morales Silvia Yvone**

**Coordinador de Investigación**

**DNI N° 16481433**