UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

Efectos físicos del precalentamiento y soldadura, en los aceros estructurales al carbono ASTM A709 grado 50

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO

AUTOR:

Bach. Pardo Prieto, Jorge Alexiz

ASESOR:

Ing. Msc. Escalante Espinoza, Nelver Javier

NUEVO CHIMBOTE- PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente tesis titulado: **"EFECTOS FÍSICOS DEL PRECALENTAMIENTO Y SOLDADURA, EN LOS ACEROS ESTRUCTURALES AL CARBONO ASTM A790 GRADO 50"** para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico, presentado por el bachiller, PARDO PRIETO JORGE ALEXIZ con código de matricula N° 0201616024, q tiene como asesor al M.Sc. Escalante Espinoza Nelver Javier, R.D. N° 069-2022-UNS-FI.

Ha contado con el asesoramiento de quien deja constancia de su aprobación. Por tal motivo firmo en calidad de asesor.

ASESOR:
M.Sc. Escalante Espinoza Nelver Javier
DNI: 32763819
COD. ORCID: 0000-0001-8586-3021

Escaneado con CamScanner

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO

El presente trabajo tesis titulado: **"EFECTOS FISICOS DEL PRECALENTAMIENTO Y SOLDADURA, EN LOS ACEROS ESTRUCTURALES AL CARBONO ASTM A709 GRADO 50"**, para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico, presentado por el bachiller: **PARDO PRIETO JORGE ALEXIZ con código de matrícula N° 0201616024**, que tiene como asesor al M.Sc. Escalante Espinoza Nelver Javier, R.D. N° 069-2022-UNS-FI.

Ha sido revisado y aprobado el día 24 de julio del 2026 por el siguiente jurado evaluador,designado mediante la resolución N° 585-2025-UNS-CFI.

Revisado y evaluado por el siguiente jurado evaluador.

MSc. Risco Ojeda Rusber Alberto
COD. ORCID 0000-0003-0194-169X
DNI: 32903454
Presidente

Msc. Iparraguirre Lozano, Arquimedes
COD. ORCID 0000-0002-1132-7688
DNI: 32766219
Secretario

Msc. Escalante Espinoza Nelver Javier
COD. ORCID 0000-0001-8586-3021
DNI: 32763819
Integrante

CS Escaneado con CamScanner

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA MECÁNICA
epim@uns.edu.pe

ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

A los veinticuatro días del mes de julio del año dos mil veintiséis, siendo las 08:00 pm. De manera virtual mediante enlace de zoom, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante Resolución Nº 585-2025-UNS- CFI, y de expedito según Resolución Decanal N° 585-2026-UNS-FI integrado por los docentes: **Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda (presidente), Msc. Arquimedes Iparraguirre Lozano (secretario) y el Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza (Integrante)**, para dar inicio a la sustentación de la Tesis titulada: **"EFECTOS FÍSICOS DEL PRECALENTAMIENTO Y SOLDADURA, EN LOS ACEROS ESTRUCTURALES AL CARBONO ASTM A709 GRADO 50",** perteneciente al bachiller: **PARDO PRIETO JORGE ALEXIZ con código de matrícula Nº 0201616024,** quien fue asesorado por el Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza (R.D N° 069-2022-UNS-FI).

El Jurado Evaluador, después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos, vigente, declaran aprobar:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
PARDO PRIETO JORGE ALEXIZ	18	BUENO

Siendo las 08:30 pm del mismo día, se dio por terminado el acto de sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, julio 24 de 2026

Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda
PRESIDENTE

Msc. Arquímedes Iparraguirre Lozano
SECRETARIO

Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza
INTEGRANTE

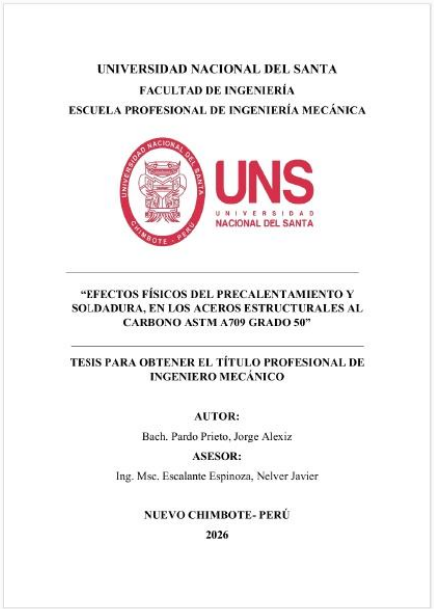
turnitin

Recibo digital

Este recibo confirma quesu trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Jorge Alexiz Pardo Prieto
Título del ejercicio:	Tesis
Título de la entrega:	"EFECTOS FÍSICOS DEL PRECALENTAMIENTO Y SOLDADURA, E...
Nombre del archivo:	Pardo_Prieto_-_Tesis_Rev._14.pdf
Tamaño del archivo:	3.51M
Total páginas:	81
Total de palabras:	12,952
Total de caracteres:	73,772
Fecha de entrega:	22-oct-2026 07:01a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	3067233947



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

"EFECTOS FÍSICOS DEL PRECALENTAMIENTO Y SOLDADURA, EN LOS ACEROS ESTRUCTURALES AL CARBONO ASTM A709 GRADO 50"

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO

AUTOR:
Bach. Pardo Prieto, Jorge Alexiz
ASESOR:
Ing. Msc. Escalante Espinoza, Nelver Javier

NUEVO CHIMBOTE- PERÚ
2026

Derechos de autor 2026 Turnitin. Todos los derechos reservados.

"EFECTOS FÍSICOS DEL PRECALENTAMIENTO Y SOLDADURA, EN LOS ACEROS ESTRUCTURALES AL CARBONO ASTM A709 GRADO 50"

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%	19%	3%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	dspace.espoch.edu.ec Fuente de Internet	2%
4	laccei.org Fuente de Internet	2%
5	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
7	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	1%
8	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria Trabajo del estudiante	1%
9	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
10	mail.polodelconocimiento.com Fuente de Internet	1%
11	la-respuesta.com Fuente de Internet	<1%
12	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
13	vsip.info Fuente de Internet	<1%
14	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1%
	repositorio.espe.edu.ec	

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, y mostrarme con dedicación sobre las maravillas del mundo, por darme la admiración que siento de mi carrera y por siempre cuidarme bajo su bendición en toda meta que me trazo.

A mis padres Jorge Pardo Llaya e Irma Prieto García, por haberme forjado como la persona que soy, son el motivo de mi vida. Me inculcaron una buena crianza, valores y sentido correcto a mis actos, me dieron libertad de elegir y tomar decisiones y sobre todo me dieron admiración de lo que hoy en día son mis metas.

A mis hermanos Jesús y Luis, por ser quienes siempre muestran un apoyo incondicional tanto en mis metas personales como profesionales.

AGRADECIMIENTO

A dios, por brindarme la oportunidad de aprender mucho durante mi tiempo de practicante y darme los medios para conocer y aprender constantemente, así como la sabiduría y cuidado durante las labores y aprendizaje.

A mis padres y familiares, por ser la fuente de mis constantes sueños y metas, por nunca decirme que no se puede sino, como hacerlo posible.

A mi Alma Mater la Universidad Nacional del Santa por darme los conocimientos y habilidades necesarias y útiles para afrontar el mundo profesional.

A los supervisores quienes fueron mis maestros y amigos, en mi solidificación de conocimientos de mi primer año de profesión, Roosvelt Tejada y Cesar Quino, por siempre apoyarme y brindarme los medios necesarios para poder aprender de la mejor manera.

Al asesor Ing. Ms. Nelver Javier Escalante Espinoza, por ayudarme durante todo el trayecto del informe, siendo guía y maestro, brindándome, la ayuda necesaria a través del mismo aprendizaje y sobre todo por el apoyo incondicional desde inicio a fin de mi tesis.

A los integrantes del equipo y proyecto Pte. Comuneros II, Jefe de proyectos Ing. Richard, jefe de producción Tx-40 Ing. Miller Camacho jefe de fabricación Toledo Edgar, a todos los maestros caldereros, Habilitadores y Soldadores y en especial al Maestro Calderero Percy Huamán, por no solo recibirme de manera armoniosa y competitiva, sino por ser mi segunda casa y escuela, por ayudarme a solidificar mis conocimientos en base a su experiencia y brindarme aún más motivos para amar la maravillosa carrera de Ingeniería mecánica.

ÍNDICE

RESUMEN xv

ABSTRAC xvi

ABREVIATURAS xvii

I. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Realidad problemática 1

1.2. Formulación del Problema 2

1.3. Objetivos de Investigación 2

1.3.1. Objetivo General 2

1.3.2. Objetivos Específicos 2

1.4. Formulación de la Hipótesis 2

1.5. Justificación 3

1.5.1. Justificación Económica 3

1.5.2. Justificación Tecnológica 3

1.5.3. Justificación Social 4

1.5.4. Justificación Ambiental 4

1.6. Limitaciones del trabajo 5

II. MARCO TEÓRICO 6

2.1. Antecedentes Internacionales 6

2.2. Antecedentes Nacionales 7

2.1. Aceros estructurales 9

2.2.1. Aceros Estructurales ASTM A709 Gr.50. 10

2.3. Puente 11

2.3.1. Tipos de puentes 11

2.3.2. Tipos de Soldadura 12

2.3.3. Zonas de metalurgia de la soldadura 14

2.4. Proceso de Soldadura 14

2.4.1. Soldadura por arco revestido (SMAW) 14

2.2.2. Soldadura por Arco con Alambre Tubular (FCAW) 16

2.4.2. Soldadura por arco sumergido (SAW) 17

2.4.3. Soldadura MIG/MAG (GMAW) 18

2.5. Precalentamiento en la Soldadura 21

2.6. Efectos Físicos del Precalentamiento en la Soldadura 21

2.7. Factores que afectan los cambios de temperatura durante la soldadura 22

2.8. Pruebas a la soldadura 24

2.9. Normativa 24

2.10. Ecuaciones Principales para la Investigación 26

III. METODOLOGÍA 34

3.1. Material y Equipos 35

3.1.1. Material de Estudio 35

3.1.2. Equipos e Instrumentos 35

3.1.3. Instalaciones 36

3.2. Métodos 37

3.2.1. Identificación de variables 37

3.2.2. Matriz operacional 37

3.2.3. Preparación de las juntas o probetas 39

3.2.4. Selección de electrodo 44

3.2.5. Proceso de soldadura 44

3.2.6. Ensayos no destructivos (END) 44

3.2.7. Ensayos destructivos (DT) 44

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES 46

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 49

VI. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA 50

VII. ANEXOS 53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Modelado 3D del primer vano del puente comuneros II*.....*12*

Figura 2 *Soldeo de vigas*.....*13*

Figura 3 *Empalme de planchas*.....*13*

Figura 4 *Soldeo de fundas*.....*13*

Figura 5 *Regiones de la ZAC en la soldadura* *14*

Figura 6 *Soldadura SMAW ESAB*.....*15*

Figura 7 *Detalle del arco en FCAW* *16*

Figura 8 *Partes del equipo FCAW*.....*17*

Figura 9 *Soldadura por arco sumergido* *18*

Figura 10 *Soldadura GMAW* *18*

Figura 11 *Proceso de soldadura por arco eléctrico con alambre tubular* *19*

Figura 12 *Equipo GMAW* *20*

Figura 13 *Precalentamiento antes del soldeo*.....*23*

Figura 14 *Ensayos no destructivos (END)*.....*25*

Figura 15 *Ensayos no destructivos (END)*.....*25*

Figura 16 *Gráfica de Seferian* *28*

Figura 17 *Cálculo del espesor combinado* *29*

Figura 18 *Escalas A, B, C, D en Función al Hidrogeno del Metal Depositadadura* *29*

Figura 19 *Diagrama Coe.*.....*30*

Figura 20 *Visualización de la zona ZAC para el calculo* *33*

Figura 21 *Plano de fabricación de cupones* *39*

Figura 22 *Trazo y corte de probetas*.....*40*

Figura 23 *Biselado y arenado de probetas*.....*40*

Figura 24 *Armado de probetas* *40*

Figura 25 *Precalentamiento de cupones* *41*

Figura 26 *Soldeo de cupones y toma de datos* *41*

Figura 27 *Trazo de probetas soldadas* *42*

Figura 28 *Trazo para corte de probetas para envío a ensayos de tracción* *42*

Figura 29 *Plano de corte de probetas* *43*

Figura 30 *Ensayo de tracción MAT-ABR-0585-1/2025* *45*

Figura 31 *Ensayo de tracción en laboratorios de la PUCP* *47*

Figura 32 *Curva de Fuerza - Alargamiento* *47*

Figura 33 *Desarrollo de grafica de Seferian* *55*

Figura 34 *Energía aportada a la soldadura en las diferentes velocidades de avance* *56*

Figura 35 *Tipos de juntas soldadas* *57*

Figura 36 *Desarrollo de diagrama de COE* *59*

Figura 37 *Ensayos destructivos de cupones* *66*

Figura 38 *Ensayo de tracción* *67*

Figura 39 *Ensayo de Impacto* *67*

Figura 40 *Ensayo de Doblado* *68*

Figura 41 *Análisis Macrográfico* *68*

Figura 42 *Fotomacrografía aumento:2X* *69*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Composición Química del ASTM A709 Gr. 50* *10*

Tabla 2 *Propiedades Mecánicas del ASTM A709 GR.50* *10*

Tabla 3 *Composición química del electrodo 7018 Supercito* *15*

Tabla 4 *Análisis químico del metal depositado* *20*

Tabla 5 *Propiedades mecánicas del metal depositado* *21*

Tabla 6 *Composición Química del ASTM A709 Gr. 50* *35*

Tabla 7 *Operacionalización de la Variable Independiente* *37*

Tabla 8 *Operacionalización de la Variable Independiente* *38*

Tabla 9 *Cálculos teóricos de las probetas* *46*

Tabla 10 *Composición química del acero ASTM A709 Gr. 50 para el desarrollo del carbono equivalente* *54*

Tabla 11 *Calor neto* *56*

Tabla 12 *Composición química del acero ASTM A709 Gr. 50 para el desarrollo del carbono equivalente* *58*

Tabla 13 *Velocidad de enfriamiento de materiales* *60*

Tabla 14 *Temperatura máxima en cada punto* *60*

Tabla 15 *Velocidad de enfriamiento de materiales* *61*

Tabla 16 *Datos recopilados en campo para Probeta 1* *62*

Tabla 17 *Datos recopilados en campo para Probeta 2* *63*

Tabla 18 *Datos recopilados en campo para Probeta 3* *64*

Tabla 19 *Datos recopilados en campo para Probeta 4* *65*

RESUMEN

El presente trabajo de investigación determinó los efectos del precalentamiento y soldadura en las propiedades mecánicas en los aceros estructurales al carbono ASTM A709 Gr. 50 soldadas por proceso GMAW. Se elaboraron juntas soldables aplicando un precalentamiento a 100.85°C, 130.22°C, 160.5°Cy 192.18°C, de 25.4 x 150 x 400 mm con bisel de 60°, luego se realizaron ensayos de tracción en los laboratorios certificados y se contrastaron con los cálculos numéricos, todos ellos basados en los estándares de normas AWS y ASTM, con ello se concluyó que la temperatura de precalentamiento teórica es de 166.79°C determinado por la composición química del material, y se compararon con las temperaturas de precalentamiento tomadas en las probetas fabricadas, mencionadas anteriormente, debido a que el precalentamiento busca minimizar la velocidad de enfriamiento para evitar fragilidad del material, a su vez, se pudo llevar la probeta con mayor cercanía a la temperatura de precalentamiento ideal a ensayos de tracción en los laboratorios certificados así el comportamiento que el máximo esfuerzo que resisten los cupones es de 578 MPa.

Palabras clave: Precalentamiento, Soldadura, Acero, ASTM A709, Tracción, Dureza

ABSTRAC

This research work determined the effects of preheating and welding on the mechanical properties of ASTM A709 Gr. 50 carbon structural steels welded by the GMAW process. Weldable joints were made by applying preheating at 100.85°C, 130.22°C, 160.5°Cand 192.18°C, measuring 25.4 x 150 x 400 mm with a 60° bevel. Tensile tests were then performed in certified laboratories and compared with numerical calculations, all based on AWS and ASTM standards. It was concluded that the theoretical preheating temperature is 166.79°C, determined by the chemical composition of the material. These were compared with the preheating temperatures taken from the manufactured specimens, mentioned above. This is because preheating seeks to minimize the cooling rate to avoid material fragility. In turn, the specimen was able to be brought closer to the ideal preheating temperature for tensile testing in certified laboratories, thus demonstrating that the maximum stress the coupons withstand is 578 MPa.

Keywords: Preheating, Welding, Steel, ASTM A709, Tensile, Hardness

ABREVIATURAS

ASME - American Society of Mechanical Engineers

ASTM - American Society For Testing and Materials

AW - Arc Welding

AWS - American Welding Society B - Brazing

DT – Destructive Testing

END - Ensayo No Destructivo

FCAW - Soldadura de arco con núcleo de fundente

PT - Líquidos Penetrantes

RM - Resistance a la tracción

SAW - Soldadura de arco sumergido

SMAW - Soldadura manual de metal

VT - Inspección visual

ZAC - Zona afectada por el calor

I. INTRODUCCIÓN

1.1.Realidad problemática

En la manufactura de estructuras metálicas, el uso de aceros estructurales soldados es una práctica común debido a sus propiedades mecánicas, resistencia y versatilidad. Sin embargo, durante los procesos de soldadura, los aceros están expuestos a elevadas temperaturas que inducen transformaciones térmicas y físicas en la zona afectada por el calor (ZAC), lo que puede comprometer su integridad estructural si no se controlan adecuadamente.

El precalentamiento es una técnica utilizada para reducir gradientes térmicos, evitar el agrietamiento en frío y mejorar la tenacidad en la ZAC. A pesar de su uso frecuente, en muchas aplicaciones prácticas no se cuantifican ni se evalúan adecuadamente los efectos físicos del precalentamiento, deformaciones residuales, alteración de las microestructuras o la generación de tensiones internas. Esto ocurre, en parte, por la falta de procedimientos normalizados o el desconocimiento de los mecanismos físicos involucrados en los aceros estructurales sometidos a distintas temperaturas de precalentamiento y condiciones de soldadura.

Además, las variaciones en los parámetros del proceso de soldadura (como velocidad, tipo de electrodo, energía aportada y temperatura de precalentamiento) pueden originar defectos como distorsiones, debilitamiento de las propiedades mecánicas, o incluso fallas prematuras en la estructura. Esta problemática es crítica especialmente en estructuras sometidas a cargas dinámicas, condiciones sísmicas o ambientes corrosivos, donde una falla estructural puede tener consecuencias económicas y humanas severas.

En este contexto, es importante evaluar un precalentamiento óptimo para así poder evitar fallas en el cordón soldadura, las cuales afecten físicamente a los aceros estructurales, tanto a nivel microestructural como macroscópico.

1.2.Formulación del Problema

¿De qué manera la temperatura de precalentamiento y el aporte de calor por soldadura GMAW, afectará a las propiedades mecánicas de los aceros estructurales ASTM A709 Gr. 50?

1.3.Objetivos de Investigación

1.3.1. Objetivo General

Analizar los efectos físicos del precalentamiento en la soldadura para determinar la temperatura óptima de precalentamiento y afectación física microestructural de los cupones (juntas) de acero al carbono ASTM A709 Gr. 50.

1.3.2. Objetivos Específicos

a) Determinar la temperatura teórica óptima de precalentamiento para la soldadura de aceros de 25.4 mm ASTM A709 Gr. 50, comparándola con la temperatura real tomada en campo.

b) Fabricar 4 juntas soldables (cupones) según norma AWS D1.5 Structural Welding Code – Test Plate B.

c) Analizar los efectos térmicos producidos por el precalentamiento a los cupones soldados.

d) Realizar análisis de las propiedades mecánicas de tracción de los cupones mediante ensayos destructivos de análisis macrográficos.

1.4.Formulación de la Hipótesis

El aumento controlado de la temperatura de precalentamiento y el aporte de calor durante el proceso de soldadura GMAW mejoran la resistencia a la tracción (Rm) de las uniones de juntas soldables de acero estructural al carbono ASTM A709 Grado 50, lo que a su vez incrementa el factor de seguridad en la fabricación de puentes metálicos.

1.5.Justificación

1.5.1. Justificación Económica

La investigación sobre el impacto de la temperatura de precalentamiento y el proceso de soldadura en los aceros estructurales al carbono ASTM A709 Grado 50 es esencial para la industria de la construcción y la fabricación de estructuras metálicas. Su justificación económica se fundamenta en que un control adecuado de las condiciones de soldadura puede disminuir notablemente los riesgos de fisuración y otros defectos en las uniones. Las fallas en el proceso de fabricación pueden resultar en reprocesos costosos y tiempos de inactividad, lo que a su vez genera pérdidas económicas inesperadas para las empresas. Optimizar las condiciones de soldadura y precalentamiento no solo mejorará la calidad de las uniones, sino que también incrementará la eficiencia en la producción, reduciendo así los costos de materiales y mano de obra. Este enfoque permitirá a las empresas cumplir con plazos de entrega más ajustados y aumentar su competitividad en un mercado exigente. Al minimizar el desperdicio de material y las necesidades de reprocesamiento, se promoverán prácticas más sostenibles, en línea con la creciente demanda de responsabilidad social y ambiental en el sector.

1.5.2. Justificación Tecnológica

La justificación tecnológica de esta investigación se centra en la implementación de nuevos procesos para la aplicación de temperatura de precalentamiento y técnicas de soldadura, beneficiando a cualquier entidad que utilice el acero estructural ASTM A709 Grado 50. Al investigar y optimizar estos procesos, se proporcionarán soluciones innovadoras que mejorarán la calidad y durabilidad de las uniones soldadas. La adopción de metodologías

avanzadas permitirá a los fabricantes incrementar su eficiencia operativa y reducir el riesgo de fallas en estructuras críticas. Además, el desarrollo de directrices basadas en los hallazgos de esta investigación facilitará la capacitación de operadores y soldadores, garantizando la aplicación de las mejores prácticas en la industria. En conjunto, estos avances no solo impulsarán la competitividad de las empresas, sino que también contribuirán a una mayor seguridad y fiabilidad en las estructuras construidas con este material.

1.5.3. **Justificación Social**

La mejora en la calidad de las uniones soldadas contribuye a la seguridad de las estructuras, lo que es fundamental para proteger a las comunidades que dependen de estas construcciones. Al minimizar el riesgo de fallas estructurales, se salvaguarda la vida y el bienestar de las personas, promoviendo una mayor confianza en la infraestructura pública y privada.

1.5.4. **Justificación Ambiental**

Desde una perspectiva ambiental, el proyecto busca promover prácticas de fabricación más sostenibles. Al optimizar las condiciones de soldadura y reducir el desperdicio de material, se minimiza el impacto ambiental asociado con la producción y la reprocesamiento de acero. Esto es especialmente relevante en un contexto donde la industria busca alinearse con los objetivos de desarrollo sostenible y reducir su huella de carbono. Además, al fomentar la utilización de técnicas más eficientes, se pueden disminuir las emisiones generadas durante el proceso de fabricación, contribuyendo a un entorno más limpio y saludable.

Asimismo, esta investigación puede generar empleo y capacitación en la comunidad local, al requerir personal capacitado para implementar las nuevas

metodologías. Esto no solo mejora las competencias laborales, sino que también impulsa el desarrollo económico de la región.

1.6.Limitaciones del trabajo

- El efecto de la temperatura de precalentamiento fue estudiado solamente en planchas de acero al carbono ASTM A709 Grado 50.
- El proceso de soldadura que se realizó en las juntas fue ejecutado con el proceso GMAW, usando el SOLDAMIG ER70S-6, como material de aporte.
- Todos los soldadores fueron homologados, sin embargo, los certificados de homologación no se nos pudieron brindar debido a que son propiedad intelectual de la empresa.
- Todos los instrumentos de medición fueron debidamente calibrados, sin embargo, los certificados de calibración no se nos pudieron brindar debido a que son propiedad intelectual de la empresa.

II. MARCO TEÓRICO

2.1.Antecedentes Internacionales

(Almendariz et al., 2021), investigaron los efectos del precalentamiento en juntas de acero ASTM A36 y ASTM A572 Gr. 50 soldadas por el proceso SMAW. Para ello, elaboraron juntas a tope sin bisel aplicando temperaturas de 115 °C, 300 °C y 500 °C, comparándolas con probetas sin precalentamiento, y evaluaron los cambios microestructurales y propiedades mecánicas mediante ensayos de microdureza, tracción e impacto bajo normas AWS y ASTM. Los resultados mostraron que en la zona afectada térmicamente (ZAC) se formaron ferrita acicular, Widmanstätten y bainita, registrándose una disminución de la microdureza en el cordón y la ZAC al aumentar el precalentamiento, mientras que la resistencia al impacto Charpy decayó significativamente con temperaturas elevadas.

En un estudio ecuatoriano realizado (Tene, 2013), investigó la influencia de la temperatura de precalentamiento en la soldadura de juntas de hierro fundido gris clase 30 (ASTM A 48-03). Para llevarlo a cabo, aplicó temperaturas desde 21 °C hasta 600 °C mediante un método predictivo basado en componentes químicos y carbono equivalente, y ejecutó ensayos de tracción, dureza, impacto Charpy y análisis metalográfico en probetas soldadas con electrodos ENi-CI. Los resultados indicaron que una temperatura de precalentamiento de 370 °C ofreció las óptimas propiedades mecánicas en comparación con los demás rangos evaluados.

En su investigación, Gomez F. (2016) en Colombia analizó las características mecánicas y metalúrgicas de siete conjuntos soldados sometidos a diferentes aportes de calor y condiciones operativas. Esto lo realizó a través de evaluaciones de composición química, pruebas de dureza y microdureza, microscopía óptica (OM), microscopía electrónica de barrido (SEM) y ensayos de tensión, flexión y salud. Los hallazgos

revelaron que la resistencia a la tensión disminuyó a medida que se incrementó el aporte de calor, identificándose además una zona de ablandamiento en la región de transición entre el metal base y la zona afectada por el calor (ZAC).

En su tesis, Blanco O. (2015) en Bogotá, determinó el efecto de la temperatura entre pases en la resistencia mecánica de uniones soldadas. El estudio se ejecutó mediante ensayos de tracción en cupones de prueba soldados a temperatura ambiente y a temperaturas mínimas controladas de 100 °C, 200 °C y 300 °C. Los resultados demostraron que la resistencia máxima a la tracción disminuyó progresivamente de 546 MPa a 454 MPa a medida que aumentó la temperatura entre pases de soldadura.

En su tesis Shen, S., Oguocha, I. N. y Yannacopoulos, S. (2012) estudiaron el comportamiento del acero ASTM A709 Grado 50 unido mediante el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW). La investigación se realizó analizando diversos niveles de aporte térmico y su incidencia directa sobre parámetros geométricos. Los resultados permitieron determinar el efecto cuantitativo del aporte de calor sobre la geometría del cordón, la penetración, el ancho del cordón, el tamaño de la zona afectada por el calor (ZAC), así como las áreas de deposición y penetración.

2.2.Antecedentes Nacionales

Asimismo, (Escalante-Espinoza et al., 2021) estudiaron el efecto del precalentamiento en el área afectada por el calor de aceros al carbono ASTM A36 de 12 mm de espesor. Para ello, utilizaron el proceso de soldadura SMAW aplicando rangos de precalentamiento de 100 °C, 120 °C, 145 °C y 160 °C, y evaluaron las propiedades mediante ensayos de tracción y dureza. La investigación concluyó que la temperatura óptima fue de 145 °C, alcanzando una resistencia a la tracción de 515.82 MPa y una dureza de 232 HV, lo que evitó la fisuración en frío al desacelerar el enfriamiento y minimizar la formación de martensita.

Aspilcueta (2014), en su tesis titulada "Determinación de la temperatura de precalentamiento utilizando el método Tekken a fin de prevenir la fisuración en frío en la unión de planchas CHRONIT T-1" (Perú), analizó diversas metodologías para determinar la temperatura de precalentamiento y su influencia en la velocidad de enfriamiento para prevenir la fisuración en frío en la unión de planchas de acero CHRONIT T-1. Lo realizó implementando el método Tekken, complementado con mediciones de dureza y análisis metalográficos. Los resultados establecieron la temperatura óptima de precalentamiento, resaltando este parámetro como un factor crítico y determinante en la prevención de fisuras durante el proceso de soldadura.

Por su parte (Oruna Cruz & Fernandez Urbano, 2021), investigaron el área afectada por el calor y las propiedades mecánicas en aceros al carbono ASTM A36 de 12 mm de espesor. El estudio se efectuó mediante el proceso SMAW bajo temperaturas de precalentamiento de 100 °C, 120 °C, 145 °C y 160 °C, apoyándose en ensayos de tracción, dureza, metalografía y cálculos numéricos. Los resultados determinaron que 145 °C es la temperatura óptima, obteniendo 515.82 MPa de tracción y 232 HV de dureza, comprobando que el precalentamiento disminuye la velocidad de enfriamiento y frena la formación de martensita.

En su tesis Francisco Falero, F. F. (2021) analizó la influencia de los tratamientos térmicos y el ciclo térmico generado sobre uniones soldadas de acero al carbono. Metodológicamente, evaluó diferentes temperaturas aplicadas a las juntas y midió su efecto directo sobre la dureza del material. El estudio reportó como hallazgo principal una temperatura de tratamiento térmico de 625 °C, con la cual se obtuvieron valores de dureza comprendidos entre 157 y 171 HB bajo las condiciones analizadas.

En la investigación de Tineo L. (2018) Analizó el impacto del precalentamiento y la temperatura sostenida en la mitigación de la formación de grietas en uniones de acero

A709 50W de gran espesor y alta restricción. Lo llevó a cabo utilizando el proceso de soldadura FCAW en muestras de 1” y 3/4” divididas en métodos con y sin precalentamiento, evaluándolas mediante inspección por partículas magnéticas, ultrasonido, UTPA y macroataques. Los resultados evidenciaron que las uniones sin precalentamiento presentaban una propensión crítica con hasta un 80% de descalificación por fisuras, demostrando la necesidad de controlar adecuadamente el ciclo térmico.

Estos antecedentes proporcionan una base sólida para la presente investigación, porque al analizar cómo la temperatura de precalentamiento y el proceso de soldadura afectan las propiedades mecánicas y microestructurales de distintos tipos de acero, se resalta la importancia de estos factores en la prevención de fisuraciones y en la optimización del rendimiento del material. La comprensión de estos estudios previos permitirá abordar de manera más efectiva los desafíos asociados con la soldadura de aceros estructurales, contribuyendo así al avance del conocimiento en este ámbito

2.1.Aceros estructurales

El acero es uno de los materiales estructurales con mayor importancia a lo largo de los años. Entre sus principales propiedades para los usos estructurales, tenemos su alta resistencia y ductilidad.

Estos aceros se fabrican por medio de un proceso de laminado en caliente y se emplea en todo tipo de estructuras

Para el presente informe de tesis, usaremos el acero estructural ASTM A709 Gr.50

2.2.1. **Aceros Estructurales ASTM A709 Gr.50.**

Según Gelson L. en su página "Blog materials" (2020), nos comenta que: "ASTM A709 es una especificación para planchas de acero estructural de baja aleación de carbono y alta resistencia".

Tabla 1

Composición Química del ASTM A709 Gr. 50

% C Máx.	% Mn Máx.	% P Máx.	% S Máx.	% Si Máx.	% Nb Máx.
0.23	1.35	0.04	0.05	0.04	0.005-0.05

Nota. Tomado de: https://www.materiales.gelsonluz.com/2020/09/astm-a709-propiedades- mecanicas.html

Tabla 2

Propiedades Mecánicas del ASTM A709 GR.50

Límite elástico	Resistencia a la tracción	Alargamiento (min.) 500mm	Densidad	Módulo de elasticidad	Coeficiente de Poisson
50Ksi (345MPa) min.	65Ksi (450MPa) min.	0.21	7800 – 8000 Kg/m3	190 GPa (27557 ksi) – 210 GPa (30458 ksi)	0.27 – 0.30

Nota. Recuperado de https://www.materiales.gelsonluz.com/2020/09/astm-a709-propiedades- mecanicas.html

2.3.Puente

De acuerdo a Manterola (1998) nos comenta: “El puente es un elemento del camino. Una carretera, un ferrocarril se sirven de puentes para salvar determinados obstáculos que se encuentran en su camino. Atravesar un río, cruzar una carretera, o una estación de ferrocarril, son obstáculos frecuentes.” (p. 17).

Un puente está constituido por sus partes principales estas son: Superestructura, subestructura y obras complementarias.

2.3.1. **Tipos de puentes**

Existen diferentes tipos de puentes, para los cuales es importante definir cuál es el tipo de puente que estaremos trabajando.

2.3.1.1. Puentes de carretera

Son fabricados para unir tramos largos, y su fin es el paso de vehículos particulares o de carga pesada, por sus fines, deben estar muy rigurosos en el diseño para los esfuerzos y fuerzas aplicadas.

2.3.1.2.Puentes para uso peatonal

Como su nombre lo indica solo es para el tránsito peatonal y de vehículos menores (bicicletas) sus esfuerzos serán uniformes durante todo el tramo.

2.3.1.3.Puentes de acero estructural

En este segmento abordaremos los dos tipos de puentes, que de acuerdo al material que usen pueden ser de acero o de hormigón.

- Puentes de hormigón: Tal como su nombre lo indica son hechos del material de hormigón, estos pueden ser pretensado o armado y podemos encontrarnos con ellos en pequeños ríos siendo estas las que más se fabrican en carreteras de nuestro país

- Puentes de acero: Se caracterizan por combinar planchas y estribos de los puentes de placas con las vigas y estribos de los de viga y tienen propósito de resistir el tránsito de vehículos particulares y pesados.

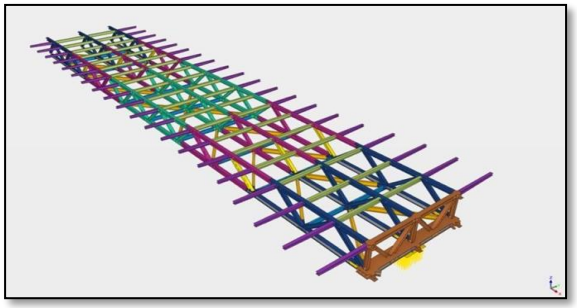
2.3.1.4.Puentes de Alma Llena o Sección Compuesta y Atirantados

Se caracterizan por estar compuestos de 2 o más vigas longitudinales, estas soportaran la superestructura o losa de concreto y actualmente son aceptadas por la relación costo beneficio que lleva hacerlas.

Para el presente trabajo de tesis, el puente "COMUNEROS II" entra la categoría de alma llena y atirantado.

Figura 1

Modelado 3D del primer vano del puente comuneros II



Nota: Modelado 3D. Fuente: Sima Metalmecánica Chimbote

2.3.2. **Tipos de Soldadura**

Existen diferentes tipos de soldaduras sin embargo las que implican la fabricación del puente son especificadas en la norma AWS D1.5 Structural Welding Code y aplicadas por SIMA estas son:

- 2F, para las vigas en general.
- 1G para empalme de planchas en construcción de diafragmas y vigas de >12m de luz

- 1G para las virolas del puente

Figura 2

Soldeo de vigas



Nota*:* Imagen tomada en campo en instalaciones SIMA

Figura 3

Empalme de planchas



Nota: Imagen tomada en campo en instalaciones SIMA

Figura 4

Soldeo de fundas



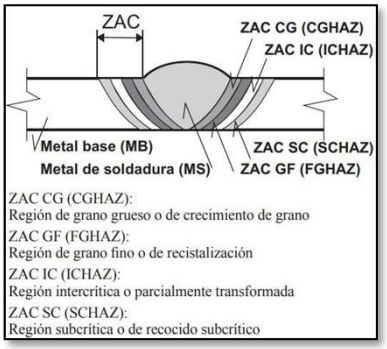
Nota: Imagen tomada en campo en instalaciones SIMA

2.3.3. **Zonas de metalurgia de la soldadura**

- **Metal base (MB).** Es la región donde no ocurre cambio microestructural.
- **Metal de Soldadura o Zona De Fusión (ZF).** Es la zona donde se alcanza la fusión completa. Además, el metal de soldadura es el resultado de un proceso de dilución.
- **Zona Afectada por el Calor (ZAC).** Escuna región del metal base adyacente a la línea de fusión cuyo tamaño dependerá del aporte térmico de la soldadura" (ESAB, 2007)

Figura 5

Regiones de la ZAC en la soldadura



Nota. Tomado de la Publicación Periódica de ESAB-CONARCO (2007)

2.4.Proceso de Soldadura

Existen diferentes tipos de soldadura, para los cuales es importante definir cuál es el tipo que se empleará en el trabajo.

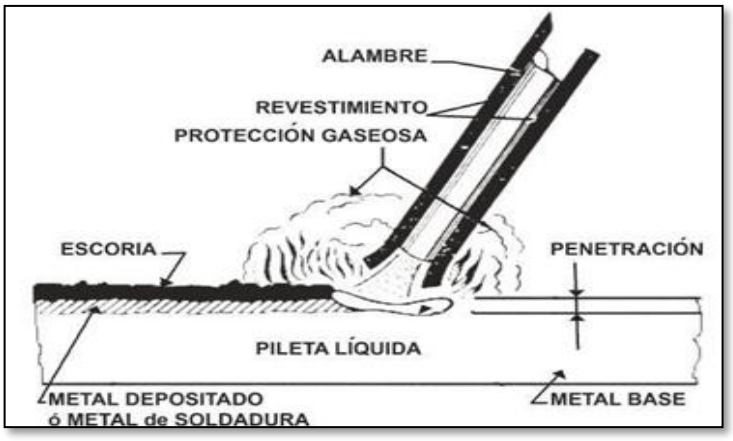
2.4.1. **Soldadura por arco revestido (SMAW)**

El proceso de electrodo revestido (Manual), identificado por la AWS como SMAW (Shield Metal Arc Welding), es un proceso de soldadura por arco eléctrico entre un electrodo revestido y un metal base. El arco produce una temperatura aproximadamente de 3500°C en lapunta del electrodo, superior

a la necesaria para fundir la mayoría de los metales. El calor funde el metal base y el electrodo revestido, de esta manera se genera una pileta líquida o baño de fusión, que va solidificando a medida que el electrodo se mueve a lo largo de la junta. (Rodríguez, 2021).

Figura 6

Soldadura SMAW ESAB



Nota. https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura- smaw.cfm

Actualmente en SIMA CHIMBOTE se utiliza el electrodo 7018 o másconocido como supecito, para reparar irregularidades producto de acoples o mal corte. Se presenta su composición química en la Tabla 3.

Tabla 3

Composición química del electrodo 7018 Supercito

C (%)	**Mn (%)**	**Si (%)**	**P (%)**	**Mo (%)**	Ni (%)	**Cr (%)**	**Cu (%)**	**Otros (%)**
0.05	1.00	0.60	Max 0.02	Max 0.02				

Nota. Tomado del Estudio del área afectada por el calor en los aceros al carbono, por efecto de precalentamiento y soldadura. Oruna & Fernández, (2020).

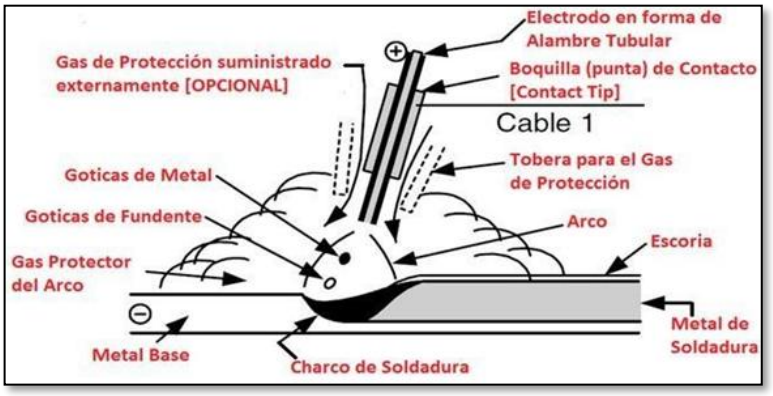
2.2.2. Soldadura por Arco con Alambre Tubular (FCAW)

"FCAW es un proceso de soldadura de arco eléctrico (AW) que utiliza el arco formado entre un electrodo alimentado continuamente, que es el metal de aporte, y el charco de soldadura" (ESAB, 2007).

Para la fabricación de las vigas del vano 01 del puente comuneros II se usa la soldadura FCAW, este proceso emplea gas para proteger el metal liquido cuando el arco este encendido, con o sin protección adicional proveniente de un gas suministrado extremamente y sin la aplicación de presión. Este proceso es elegido porque presenta características similares al GMAW en propiedades, pero no importa el detalle o acabado de estas, evitando el costo innecesario de ello.

Figura 7

Detalle del arco en FCAW



Nota. Descripción de partes de la soldadura FCAW brindado por ESAB, recuperado de: https://esab.com/co/sam_es/

Los principales componentes de un equipo de soldadura por arco con alambre tubular son:

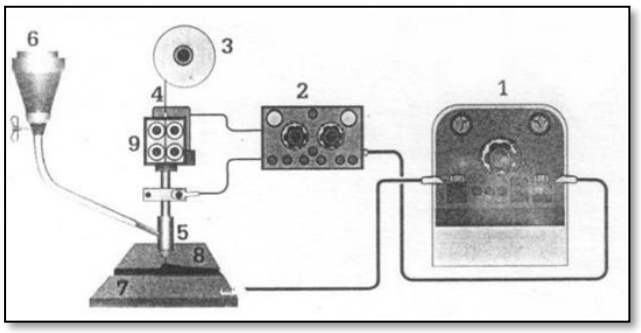
1. Fuente de poder CC o CA
2. Sistema de control
3. Porta carrete de alambre

4. Alambre – electrodo
5. Tobera para boquilla
6. Recipiente porta-fundente
7. Metal base
8. Fundente
9. Alimentador de alambre

La figura 16 contempla las partes del equipo FCAW, con la numeración anterior respectiva.

Figura 8

Partes del equipo FCAW



Nota: Se muestra la primera máquina de soldar.

2.4.2. **Soldadura por arco sumergido (SAW)**

La soldadura por arco sumergido (SAW) es un proceso en el que la fusión de metales se produce por el calentamiento de un electrodo continuo, protegido por uno o más arcos cuyos variados casos de aplicación van desde la construcción naval a la fabricación de depósitos y la construcción de puentes y acero. (Kisgal, 2013)

Ciertamente la soldadura SAW es uno de los procesos de muy alto rendimiento, siendo su principal característica el soldeo si necesidad de utilizar protector visual (FRONIUS, 2019).

Figura 9

Soldadura por arco sumergido



Nota. Descripción del proceso de soldadura SAW en campo SIMA

2.4.3. **Soldadura MIG/MAG (GMAW)**

La soldadura MIG/MAG se conoce también como GMAW o soldadura de hilo. Es un soldeo por fusión por arco que utiliza un alambre electrodo macizo, en el cual el arco y el baño de soldadura se protegen de la atmósfera por medio de gas suministrado por una fuente externa. Está dividido en dos tipos: MIG (el gas protector es inerte) y MAG (el gas protector es activo). Actualmente, es el proceso más utilizado debido a su alta productividad, permitiendo obtener una velocidad de soldadura muy alta (FRONIUS, 2019).

Figura 10

Soldadura GMAW

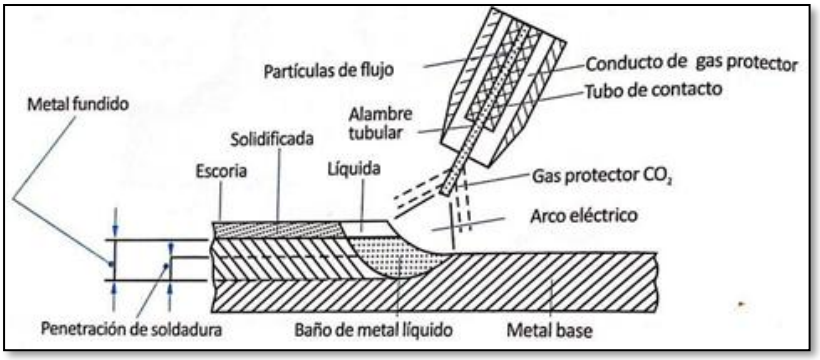


Nota. Recuperado de https://www.fronius.com/es-es/spain/tecnologia-de-soldadura/el-mundo-de-la-soldadura/soldadura-mig-mag

El proceso de soldadura GMAW puede ser semi automático o automático, para casos de la fabricación del puente Comuneros II, es semiautomático, en la figura 19 podemos observar la estructura del proceso de soldeo.

Figura 11

Proceso de soldadura por arco eléctrico con alambre tubular



Nota. Tomado de Soldexa. Manual de soldadura y catálogo de productos (2013)

Los principales componentes para el proceso de soldadura GMAW de un equipo de soldadura MIG son:

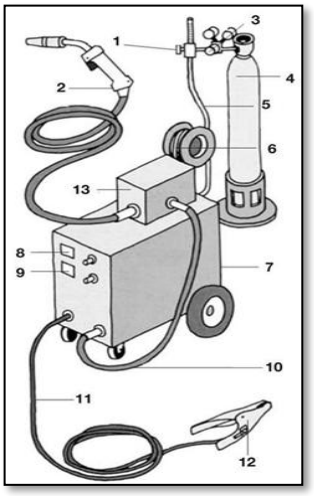
1. Caudalímetro
2. Antorcha o pistola de soldadura
3. Regulador de presión
4. Cilindro de gas protector
5. Manguera de suministro de gas
6. Electrodo
7. Fuente de energía
8. Amperímetro
9. Voltímetro
10. Cable de potencia
11. Cable de retorno

12. Pinza de maza

La figura 20 contempla las partes del equipo MIG, con la numeración anterior respectiva

Figura 12

Equipo GMAW



Nota: Primera máquina de Soldar en el tiempo.

Para fines de la fabricación del proyecto Puente comuneros II se usa, el SOLDAMIG ER70S-6, como material de aporte, dicho material será fuente del estudio principal del proyecto de tesis y su composición química está distribuida en la tabla 4:

Tabla 4

Análisis químico del metal depositado

C	**Mn**	**Si**	**P**	**Mo**	Ni	**Cr**	**Cu**
(%)	**(%)**	**(%)**	**(%)**	**(%)**	**(%)**	**(%)**	**(%)**
0.06	1.40	0.8	Max	Max			
0.15	1.85	1.15	0.010	0.011			

Nota. Tomado de Soldexa. Manual de soldadura y catálogo de productos (2013)

Al hacer la evaluación de las propiedades mecánicas tendremos la tabla 5:

Tabla 5

Propiedades mecánicas del metal depositado

Tratamiento térmico	**Resistencia a la tracción [Mpa (Psi)]**	**Límite de fluencia [Mpa (Psi)]**	**Elongación en 2" (%)**	**Energía absorbida ISO-V (20°C)[J]**
Sin tratamiento	497 – 552	Min. 410	Min.	Min.

Nota. Fuente Soldexa. Manual de soldadura y catálogo de productos (2013)

Gases de protección: el SIMA METALMECÁNICA maneja sus especificaciones técnicas de fabricación y este define los siguientes gases de protección para el proceso GMAW:

- CO2
- Argón, helio o argón + helio
- Argón + CO2 O HELIO + CO2
- Argón + oxigeno (1-10% de oxígeno, siendo muy utilizada la mezcla con 5% de oxígeno)
- Argón + oxigeno + CO2
- Argón + helio + CO2

2.5.Precalentamiento en la Soldadura

El precalentamiento, es calentar el material base antes y durante la soldadura, en dicho proceso se debe mantener la temperatura del mismo con un valor mínimo lo que representa la temperatura de precalentamiento y con un valor máximo, que refiere a una temperatura entre pases.

2.6.Efectos Físicos del Precalentamiento en la Soldadura

Entre algunos físicos que produce el precalentamiento en la soldadura tenemos:

- Apoyo contra la fisuración inducida por Hidrogeno (HIC) ya que el precalentamiento permite difundirlo fuera del metal de soldadura
- Vuelve a la estructura más dúctil y resistente a las fisuras, en donde se disminuye la velocidad de enfriamiento de la zona ZAC y el metal base de soldadura.
- Al disminuir la diferencia de temperatura entre el metal de soldadura y el material base se logra reducir las tensiones residuales.
- Compensa la pérdida de calor en aleaciones altamente conductoras como el cobre y el aluminio, evita fallas causadas por una fusión insuficiente entre el material base y secciones de acero gruesas.

Reduce la porosidad debido a la presencia de humedad

2.7.Factores que afectan los cambios de temperatura durante la soldadura

2.7.1. **Aporte de calor neto:** Es el calor que se libera durante el proceso de soldeo. Además, es importante para el informe puesto que es necesario para el hallazgo de la temperatura de precalentamiento mediante el método del Monograma de Coe.

2.7.2. **Temperatura de precalentamiento:** El Instituto Asteco en su foro web "Precalentamiento, aportes en la actividad de la soldadura" (2020) nos menciona que: "Es la aplicación de calor por varios métodos (llama, resistencia, etc.) de una forma controlada a los materiales base." La temperatura de pre calentamiento es importante porque el proceso de soldadura trae consigo efectos negativos a los materiales base que se van a unir, tales como defectos lineales, alteraciones micro estructurales etc.

Por ello es que bajo ese contexto es que el precalentar el material base antes de soldar, cumplirá un rol importante para reducir en gran medida los efectos de la soldadura controlando la zona ZAC mediante la velocidad de enfriamiento

Figura 13

Precalentamiento antes del soldeo



Nota. Recuperado de https://doctorwelding.com/que-metodos-existen-para-calcular-el-precalentamiento-en-una-union-soldada/

2.7.3. **Geometría de la soldadura:** P. Oruna y J. Fernández (2020) en su tesis mencionan que la geometría de la soldadura "Comprende el espesor, la forma y dimensiones de la soldadura, así como el ángulo empleado entre las juntas a unir." (Oruna & Fernández, pág. 8).

2.7.4. **Conductividad Térmica:** Esta es básicamente la capacidad que tomaran cualquier tipo de acero en conducir el calor, esto determina que tanto dependiendo del proceso de soldadura el metal base pueda calentarse.

2.7.5. **Fisuración en Frio:** La fisuración en frio es de suma importancia ya que está estrechamente relacionada con la ZAC, ESAB (2007) afirma que "Es de tal importancia practica que se han desarrollado numerosos ensayos para estudiar la susceptibilidad de un material a la misma". (ESAB, CONARCO, pág. 9). Si bien la fisuración en frio se define como aquella que se produce cuando el metal el cual fue expuesto al soldeo se enfrió o está en enfriamiento, es algo que tiene una buena relación de prevención con la temperatura de precalentamiento.

2.8. Pruebas a la soldadura

2.8.1. Ensayos no destructivos (END)

Los ensayos no destructivos son inspecciones que sirven para evaluar la calidad de las soldaduras sin dañarlas, permitiendo la detección de defectos, anomalías, control de calidad, detección de corrosión y evaluación de integridad estructural en diversos sectores industriales. Existen diferentes métodos para este tipo de ensayos y entre los mas comunes tenemos:

- ✓ Inspección visual (VT): Examen visual de la superficie.
- ✓ Líquidos penetrantes (PT): Detección de grietas superficiales.
- ✓ Partículas magnéticas (MT): Detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- ✓ Radiografía industrial (RT): Uso de rayos X o gamma para detectar defectos internos.
- ✓ Ultrasonido (UT): Uso de ondas ultrasónicas para detectar defectos internos.
- ✓ Corrientes de Eddy (ET): Detección de defectos en materiales conductores.

2.9. Normativa

La presente investigación se regirá a las normas de diseño estructural:

- ASME Sección IX.
- AASHTO – AWS D.15M: 2015 Bridge Welding Code.
- ASTM A370
- Especificaciones Técnicas SIMA Metalmecánica Chimbote.
- ISO 9001:2015.
- ISO 14001:2015.

- ISO 45001:2015.

Figura 14

Ensayos no destructivos (END)



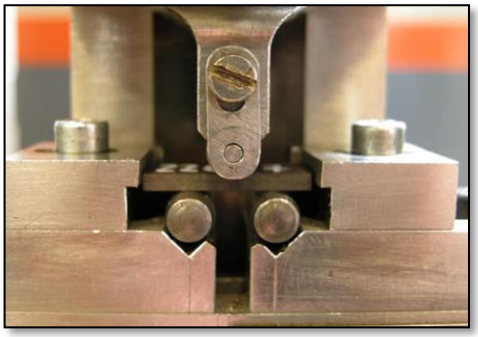
Nota. Recuperado de https://www.testekndt.net/inspeccion-de-soldaduras-con-ensayos-no-destructivos/

2.9.1. Ensayos destructivos (DT)

Los ensayos destructivos tienen el propósito de determinar las propiedades mecánicas de un material hasta su fallo, por lo cual destruye por completo la muestra a analizar, por lo que solo se puede realizar en un número limitado de piezas, es comúnmente utilizado para pruebas de control de calidad en la fabricación, investigación y desarrollo, los métodos utilizados son: Pruebas de tensión, compresión, flexión, impacto, dureza, etc.

Figura 15

Ensayos destructivos (DT)



Nota. *Recuperado de https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayos-destructivos-y-cuando-aplicarlos/*

2.10. Ecuaciones Principales para la Investigación

2.10.1. **Aporte de calor neto**

El aporte de calor neto estará dado por la siguiente fórmula

$$Q_{neto} = \frac{V * I}{v} * \eta \quad (1)$$

Donde:

Q_{neto} = Calor neto; [J/mm]

V = voltaje [V].

I: Intensidad de corriente; [A].

v: Velocidad de avance en la soldadura; [mm/s].

η: Eficiencia de la transferencia de calor.

La eficiencia de transferencia de calor en soldadura se refiere al porcentaje del calor generado que se usa realmente para fundir y unir los materiales, en lugar de disiparse en el entorno, para estos casos, se aplica una eficiencia del 70%.

2.10.2. **Temperatura de precalentamiento mínima (T_0)**

Para fines del informe se tomarán dos métodos para definir la temperatura de pre calentamiento, el primero será por el Método Seferian y el segundo será por el método del Monograma de Coe.

2.10.3. **Método de Seferian**

En este método se propone el cálculo de la temperatura de precalentamiento sin el uso de la energía neta aportada durante el soldeo, por lo que las temperaturas sufrirán un incremento de temperatura, sin embargo, para fines prácticos y de este informe se tomarán el punto de partida. Primero

se halla el carbono equivalente del acero (C_q), a través de la ecuación 2 (se consideran los valores porcentuales de cada elemento químico)

$$C_q(\%) = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \quad (2)$$

Una vez calculado vamos a la ecuación 3, donde se hará uso de la ecuación 2 para hallar el carbono equivalente total (C_T).

$$C_T(\%) = C_q + C_e = C_q * (1 + 0.005e) \quad (3)$$

Donde:

e = Espesor del material (mm)

Finalmente se usará la ecuación 4, para hallar la temperatura de precalentamiento (T_0).

Ecuación 4: Temperatura de precalentamiento

$$T0(°C) = 350\sqrt{(CT - 0.25)} \quad (4)$$

Donde:

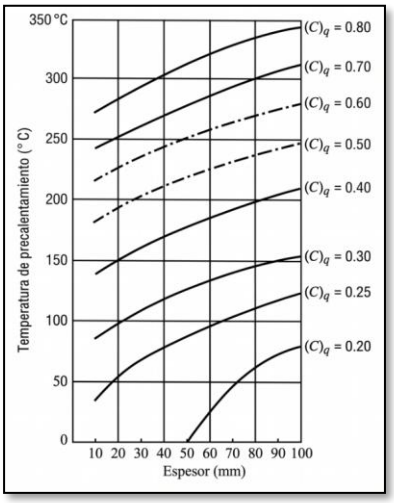
Cq = Carbono equivalente químico en base a las propiedades del material

CT: Carbono equivalente total.

Seferian también propone la siguiente grafica relacionando el carbono equivalente y el espesor.

Figura 16

Gráfica de Seferian



Nota. Métodos para calcular el precalentamiento en uniones soldadas. Tomado de Quesada & Salazar (2020)

2.10.4. **Método del Monograma de Coe:**

Quesada & Fernández (2020) mencionaron: "Surgió a partir de trabajos basados en el ensayo de severidad térmica controlada (CTS)".

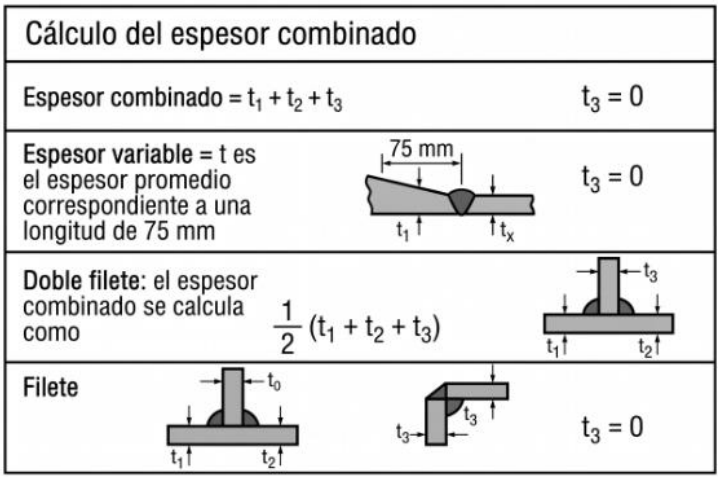
Este método es práctico y meticuloso, porque involucra más factores que hacen un cálculo más detallado de la temperatura de precalentamiento uno de ellos es la descrita en la ecuación 1. Además, también se trabajará con el Carbono Equivalente, propuesto por el Instituto Internacional de Soldadura (CE_{IIW}), el cual está dado por la siguiente formula (se consideran los valores porcentuales de cada elemento químico)

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

Luego se hará uso del cálculo del espesor combinado este se rige por la siguiente imagen.

Figura 17

Cálculo del espesor combinado

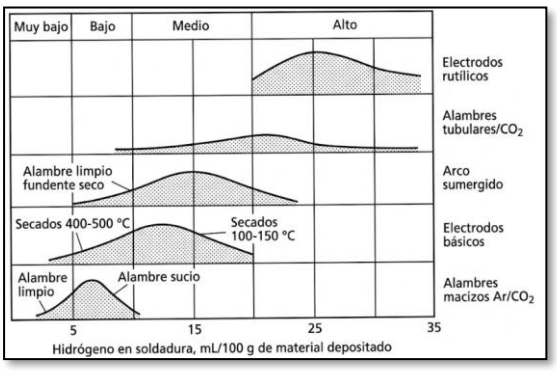


Nota. Fuente: H. Quesada – M. Salazar. Métodos para calcular el precalentamiento en uniones soldadas (2020).

Será necesario el análisis de la escala en la que se encuentra nuestro proceso de soldadura, esta es establecida por las Normas Británicas BS 5135-74 y 5135-84.

Figura 18

Escalas A, B, C, D en función al hidrogeno del metal depositado por los distintos tipos de soldadura.

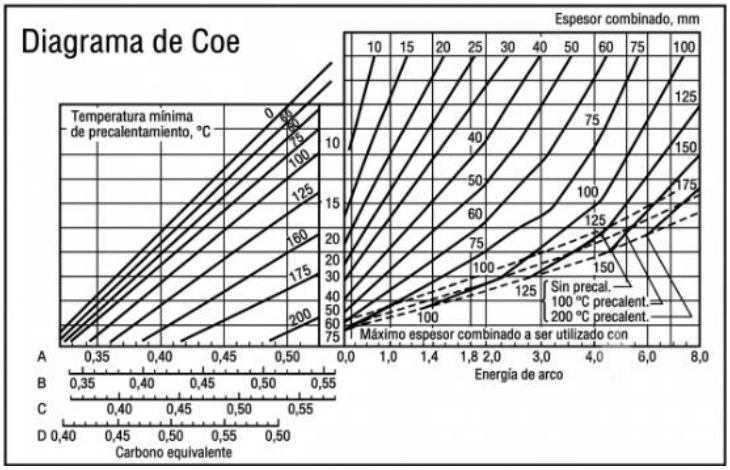


Nota. Tomado de British Standar 5135-1974

Finalmente se utilizará el diagrama de Coe para juntar todos los cálculos y relacionarlos mediante las gráficas.

Figura 19

Diagrama Coe.



Nota. Tomado de Quesada & Salazar. Métodos para calcular el precalentamiento en uniones soldadas. (2020)

El proceso del cálculo de la temperatura de precalentamiento mediante el Monograma de Coe es el siguiente:

1) Se hallan las ecuaciones 1 y 5 independientemente.
2) Luego se halla el espesor combinado mediante la fig. 17.
3) Se clasifica el proceso de soldeo en alguna escala A, B, C, D.
4) Finalmente se va al diagrama de Coe y se interceptan Aporte de calor Neto vs Espesor Combinado dicha intercepción se prolongará hacia la izquierda y luego se interceptarán el $CEIIW$ (con el análisis de escala) con la prolongación de Aporte calor Neto vs Espesor Combinado.

Para fines de entendimiento, se recomienda ver en ANEXOS, el cálculo de la temperatura de precalentamiento mediante el método del Monograma de Coe.

2.10.5. **Velocidad de enfriamiento**

La velocidad de enfriamiento es la básicamente la que la temperatura de precalentamiento busca atacar, a menor razón de enfriamiento por tiempo tenga, menos probabilidades que el metal base sufra variaciones en su composición química, a su vez, la velocidad de enfriamiento depende del espesor del metal base y su flujo, esta última se define mediante el cálculo del espesor relativo r.

El espesor relativo r estará dado por la siguiente fórmula.

$$r = \sqrt{\frac{\rho C + (Tc - To)}{H_{net}}} \tag{6}$$

Donde:

r: espesor relativo

$T0$: Temperatura de precalentamiento [°C].

TC: Temperatura a la cual se calcula la velocidad de enfriamiento; [°C].

ρ: Densidad del metal base; [g/mm3].

C: Calor especifico; [J/g°C].

Luego de hallar el espesor relativo, se define si el metal base es delgado o grueso. Entonces la ecuación 7 nos define el cálculo para la velocidad de enfriamiento en materiales delgados:

$$Ve = \frac{-2\,\pi\,k\,\rho\,C\,(e)^2(T_C - T_O)^2}{Q_{neto}}(T_C - T_O)^2 \tag{7}$$

Donde:

$T0$: Temperatura de precalentamiento [°C].

k: conductividad térmica; [J/mm s°C].

TC: Temperatura a la cual se calcula la velocidad de enfriamiento; [°C].

Ve: Velocidad de enfriamiento durante el proceso; [°C/s].

e: Espesor del material ensayado; [mm].

ρ: Densidad del metal base; [g/mm3].

C: Calor especifico; [J/g°C].

Q_{neto}: Calor aportado neto en el proceso; [J/mm].

Y la ecuación 8 nos define el cálculo. de la velocidad de enfriamiento para materiales gruesos:

$$Ve = \frac{-2\,\pi\,k\,\rho\,C\,(e)^2(T_C - T_O)^2}{Q_{neto}} \quad (8)$$

Donde:

$T0$: Temperatura de precalentamiento [°C].

k: conductividad térmica [J/mm s °C].

TC: Temperatura a la cual se calcula la velocidad de enfriamiento; [°C].

Ve: Velocidad de enfriamiento durante el proceso; [°C/s].

$Qneto$: Calor aportado neto en el proceso; [J/mm].

2.10.6. **Temperatura máxima en cada punto y ancho de la zona afectada por el calor.**

Este cálculo nos permitirá predecir e interpretar como van ocurriendo las transformaciones había el material base a través de su distribución, se utilizará la ecuación 9 teniendo en cuenta que el cálculo es solo en la zona ZAC. Fue recomendación propia de SIMA, del Ingeniero. Julio Bacilio Nivel III y jefe de Control de Calidad de SIMA Metalmecánica.

La temperatura máxima en cada punto estará dada por la siguiente fórmula

$$\frac{1}{T_P - T_O} = \frac{\sqrt{2\pi \in} \rho CeY}{Q_{neto}} + \frac{1}{T_f - T_O} \quad (9)$$

Donde:

Tp: Temperatura máxima obtenida; [°C].

ϵ: constante adimensional referida al número de Euler 2.71828.

Y: Distancia desde el borde de fusión de la soldadura; [mm].

Tf: temperatura de fusión alcanzada; [°C].

e: Espesor del material base; [mm].

C: Calor especifico del material base; [J/g°C].

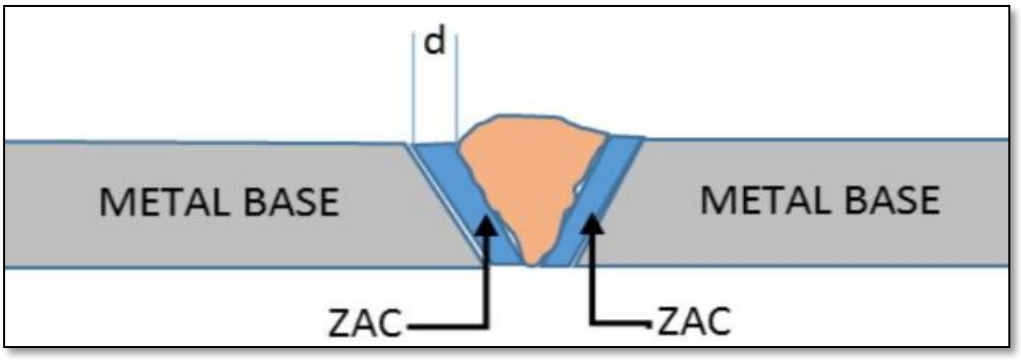
$Qneto$: Calor aportado neto en el proceso; [J/mm].

$T0$: Temperatura de precalentamiento; [°C].

ρ: Densidad del metal base empleado; [g/mm^3].

Figura 20

Visualización de la zona ZAC para el calculo



Nota. Fuente: P. Oruna y J. Fernández. (2020) Estudio del área afectada por el calor en los aceros al carbono, por efecto de precalentamiento y soldadura. (Oruna & Fernandez, pág. 10)

2.10.7. **Tiempo de solidificación de la zona afectada por el calor.**

El tiempo de solidificación de la zona afectada por el calor estará dado por la siguiente fórmula

$$Ts = \frac{LQ_{neto}}{2\pi k\rho C(T_C - T_O)^2} \qquad (10)$$

Donde:

L: Calor de fusión (L = 2 J/mm^3).

$Qneto$: Calor aportado neto en el proceso; [J/mm].

$T0$: Temperatura de precalentamiento; [°C].

2.10.8. **Dureza en el acero y en el área afectada por el calor.**

Para ello se debe hallar el carbono equivalente según el Instituto Internacional de soldadura, usando la ecuación 5 del presente informe. Luego la Dureza máxima en el acero se puede hallar por:

Ecuación 11: Dureza máxima en el acero (HV)

$$HV = 939C + 284 \qquad (11)$$

Donde:

HV: Dureza máxima del acero.

Ecuación12: Dureza máxima en el área afectada por el calor (ZAC) (HV)

$$(ZAC)(HV) = 1200CE - 200 \qquad (12)$$

Donde:

(ZAC) (HV): Dureza máxima en el área afectada por el calor.

III. METODOLOGÍA

Esta tesis tiene una metodología experimental, debido a que busca evaluar el impacto del precalentamiento del material base antes de proceso de soldadura para determinar propiedades físicas medibles, con grupos tratados como probetas, para poder llevar controles, lo cual permite atribuir cambios los observados al precalentamiento y no a factores externos.

3.1. Material y Equipos

3.1.1. Material de Estudio

El material de estudio fue la unión soldada del acero ASTM A709, proporcionado por la empresa Servicios Industriales de la Marina S.A. suministrados en planchas de 25.4 mm de espesor, usados en las construcciones metálicas, su composición química brinda en la tabla 6.

Tabla 6

Composición Química del ASTM A709 Gr. 50

% C Máx.	% Mn Máx.	% P Máx.	% S Máx.	% Si Máx.	% Nb Máx.
0.23	1.35	0.04	0.05	0.04	0.005-0.05

Nota: Tomado de https://www.leecosteel.com/es/a709-steel-plate/

3.1.2. Equipos e Instrumentos

- Cámara Fotográfica: Sony Alpha Cámara Compacta Digital ZV-1F
- Laptop: Laptop Asus TUF Gaming F16 Rtx3050 Intel Core 5 210h 8gb 512gbssd Fx607vj-rl011w 16" Fhd
- Pirómetros: Pirómetro Termómetro Infrarrojo Profesional – BENETECH- GM2200
- Flexómetro de 3 metros: Wincha Stanley de 5 mt STANLEY GLOBAL PLUS

- Cupones (probetas) para ensayo
- Equipo de oxicorte: Medalist 350 Classic Victor
- Máquina de soldar GMAW: SOLDADORA GMAW GMF 255MP HEAVY DUTY DAF

3.1.3. Instalaciones

- Instalaciones de Servicios Industriales de la Marina Metalmecánica (SIMA)
- Laboratorio de materiales – Pontificia Universidad Católica del Perú

3.2. Métodos

3.2.1. Identificación de variables

- Variable dependiente: Efectos físicos del precalentamiento y soldadura en acero ASTM A709 Gr.50.
- Variable independiente: Temperatura de precalentamiento de los cupones.

3.2.2. Matriz operacional

Tabla 7

Operacionalización de la Variable Dependiente

Conceptualización	Dimensiones	Unidad de medida	Indicadores	Ítems	Fuentes	Instrumentos	Escala de medición
Efectos físicos del precalentamiento y soldadura en aceros ASTM A709 Gr.50	Mejora de las propiedades mecánicas en la soldadura	Kg-f/mm^2	Resistencia a la tracción	¿Cuál será la resistencia a la tracción final que tendrán los aceros ASTM A709 Gr.50?	Los Cupones (probetas) para ensayo	Ensayos destructivos de las probetas	De razón o proporción

Nota: Elaboración Propia

Tabla 8

Operacionalización de la Variable Independiente

Conceptualización	Dimensiones	Unidad de medida	Indicadores	Ítems	Fuentes	Instrumentos	Escala de medición
Temperatura de precalentamiento de los cupones (probetas)	Temperatura óptima de calentamiento de los cupones (probetas)	Grados Celsius [°C]	Temperatura	¿Cuál será la temperatura óptima de precalentamiento de los cupones (probetas) en la cual el cordón de soldadura obtenga las mejores propiedades mecánicas?	Los cupones (probetas)	Pirómetro	Escala nominal

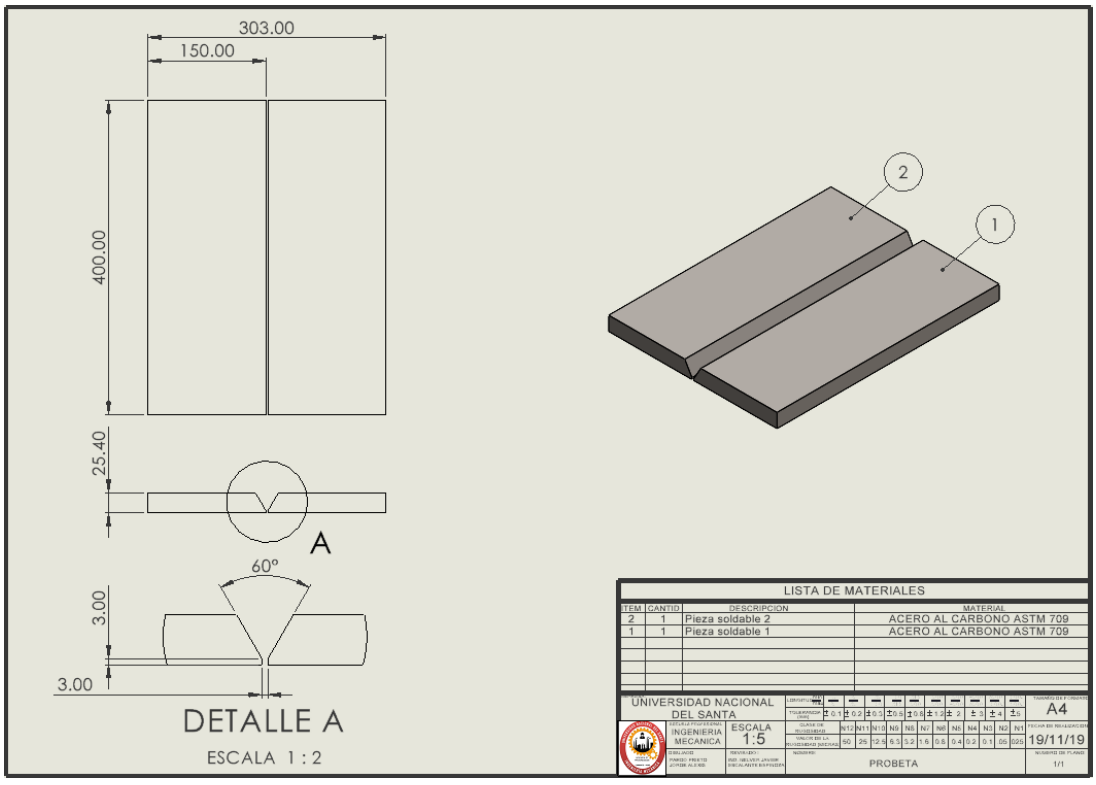
Nota: Elaboración Propia

3.2.3. Preparación de las juntas o probetas

Las probetas son de acero estructural ASTM A709 Gr.50 de 25.4 x 150 x 400 mm con bisel de 60°, como se muestra en la figura 21, se prepararon 4 probetas para cada nivel de temperatura, siendo las temperaturas de ensayo de 100.85°C, 130.22°C, 160.5°Cy 192.18 °C. Las probetas fueron fabricadas de manera uniforme, procediendo primero con trazo, corte y biselado de probetas, luego se arenaron para remover escorias, posteriormente se realizó el precalentamiento y soldeo, para finalmente hacer la toma de temperaturas y elaboración de cuadro de datos.

Figura 21

Plano de fabricación de cupones



Nota. Elaboración propia

Figura 22

Trazo y corte de probetas



Nota. Elaboración propia

Figura 23

Biselado y arenado de probetas.



Nota. Elaboración propia

Figura 24

Armado de probetas



Nota. Elaboración propia

Figura 25

Precalentamiento de cupones



Nota. Elaboración propia

Figura 26

Soldeo de cupones y toma de datos



Nota. Elaboración propia

Figura 27

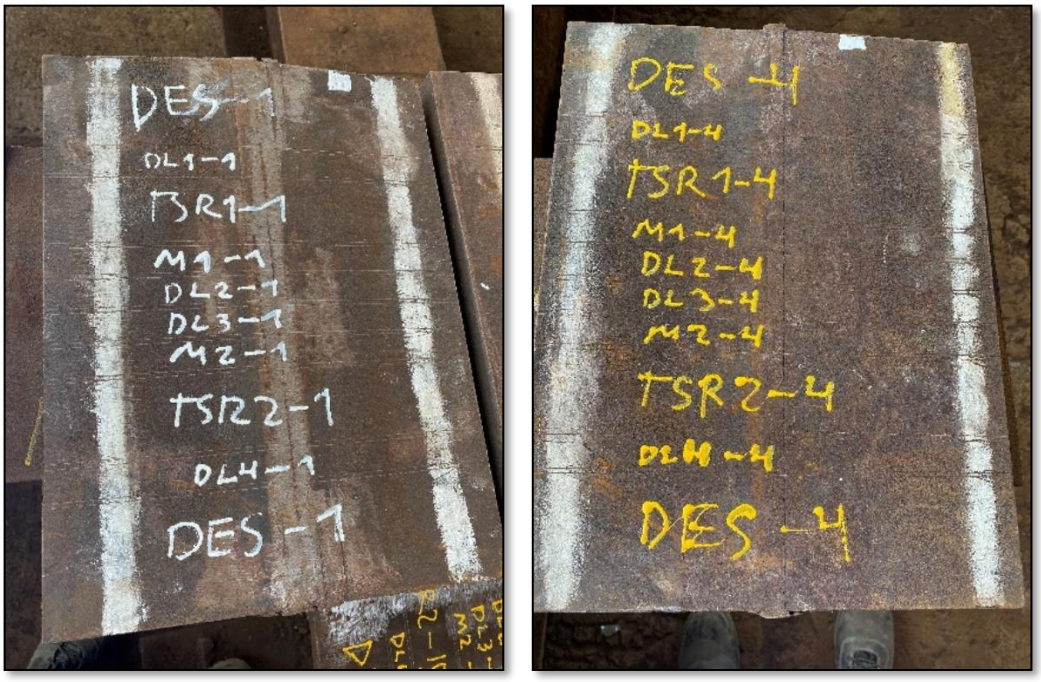
Trazo de probetas soldadas.



Nota. Elaboración propia

Figura 28

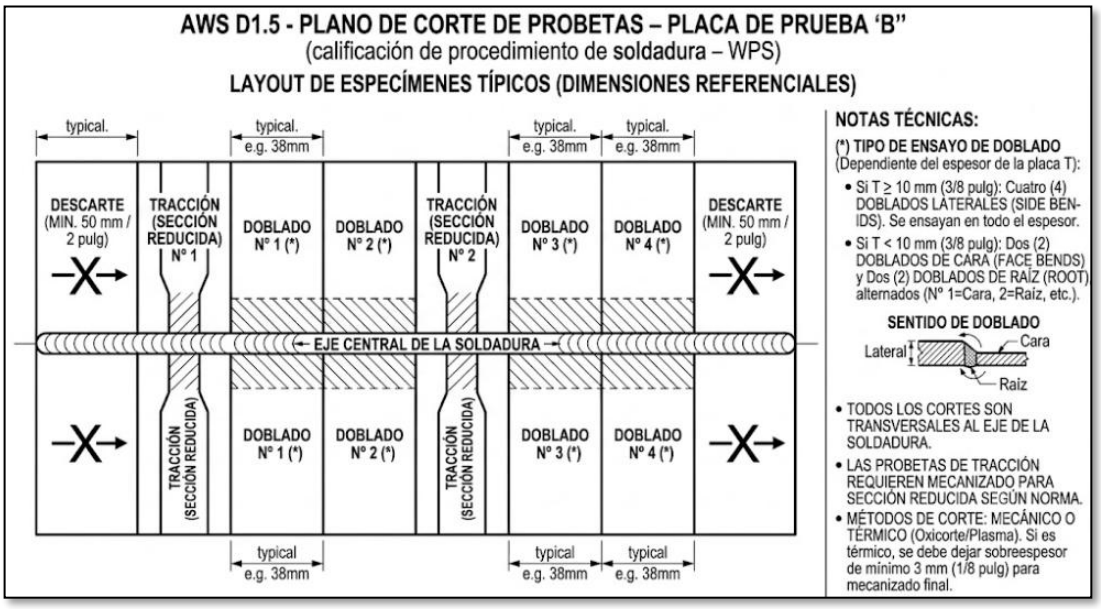
Trazo para corte de probetas para envío a ensayo de tracción.



Nota. Elaboración propia

Figura 29

Plano de corte de probetas



Nota. Norma AWS D1.5 Structural Welding Code – Test Plate B

3.2.4. Selección de electrodo

Para fines de la fabricación del proyecto Puente comuneros II se usa, el SOLDAMIG ER70S-6, como material de aporte, las propiedades químicas del material y las propiedades mecánicas del metal depositado se encuentran en la tabla 4 y 5 respectivamente.

3.2.5. Proceso de soldadura

La soldadura se realizó de acuerdo a los parámetros de soldeo preestablecidos por las áreas de producción y control de calidad del SIMA Metalmecánica.

Para el proceso de soldadura, se utilizó una corriente entre 292.06 - 312.4 A, y fue ejecutada por un soldador calificado.

También se realizaron las mediciones mediante la toma de datos con el medidor de temperatura al inicio y fin de la soldadura, tiempo de soldeo (seg), voltaje (V) y amperaje (A).

3.2.6. Ensayos no destructivos (END)

El ensayo no destructivo fue realizado mediante líquidos penetrantes, brindándonos de resultados por inspección visual (VT) un cordón de soldadura libre de porosidad, rajaduras o defectos en la soldadura.

3.2.7. Ensayos destructivos (DT)

El ensayo destructivo utilizado fue un ensayo a tracción para productos de acero, realizado y certificado mediante el Laboratorio de materiales de la PUCP. Para este ensayo se utilizó el método de “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products” para aceros ASTM A370-24. Este procedimiento implica cortar el

material y someterlo a esfuerzos para hallar su cargas y esfuerzos máximos que puede soportar el cordón de soldadura.

Figura 30

Ensayo de tracción MAT-ABR-0585-1/2025



Nota. Elaboración propia

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados

4.1.1. Se determinó, mediante cálculos teóricos y la contrastación con los datos obtenidos en campo, que la temperatura de precalentamiento requerida para la soldadura de planchas de acero ASTM A709 Grado 50, con un espesor de 25,4 mm, es de 166,79 °C. Asimismo, de las cuatro probetas evaluadas experimentalmente, la probeta N.° 2 presentó la temperatura de precalentamiento más cercana al valor teórico, alcanzando los 160,50 °C, lo que evidencia una diferencia de 6,29 °C respecto al valor calculado.

4.1.2. Se fabricaron 4 probetas de acuerdo a las dimensiones normadas especificadas en el apartado de AWS D1.5 Structural Welding Code – Test Plate B, las cuales fueron de 150 de lado y 400 lo longitud por pobreta, con una separación de 3 mm para soldeo de probetas y un ángulo de 60°.

4.1.3. Se analizaron los efectos térmicos de las probetas mediante cálculos teóricos, teniendo como resultados la tabla 9

Tabla 9

Cálculos teóricos de las probetas

RESUMEN						
	TEORICO	**PROBETA 1**	**PROBETA 2**	**PROBETA 3**	**PROBETA 4**	**UNIDADES**
Qneto	**1218.00**	**1321.53**	**1156.24**	**1138.85**	**1042.03**	**J/mm**
CQ(%)	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	-
CT(%)	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	-
T0	**166.79**	**130.22**	**160.50**	**192.18**	**100.85**	**°C**
CE IIW	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	-
R	**0.51**	**0.56**	**0.56**	**0.51**	**0.66**	**-**
Ve	**-27.31**	**-41.64**	**-40.79**	**-27.09**	**-72.51**	**°C/s**
TS	**0.60**	**0.57**	**0.59**	**0.62**	**0.51**	**s**
HV	462.41	462.41	462.41	462.41	462.41	HV
(ZAC)(HV)	424.00	424.00	424.00	424.00	424.00	HV

Nota. Elaboración propia

4.1.4. Se determinó mediante análisis macrograficos que la probeta con el valor más cercano al valor de calor suministrado teórico, siendo esta la probeta #2, para el análisis de tracción se envió la probeta a los laboratorios de materiales de la PUCP, el resultado se evidencia en la imagen 28.y se muestra también el diagrama esfuerzo-deformación real en la figura 32

Figura 31

Ensayo de tracción en laboratorios de la PUCP

MUESTRA		TSR1-4	TSR2-4
SECCIÓN TRANSVERSAL	ANCHO (mm)	25.07	25.08
	ESPESOR (mm)	24.88	24.94
	ÁREA (mm^2)	623.7	625.5
CARGAS (kN)	MÁXIMA	358.5	361.5
ESFUERZOS (MPa)	MÁXIMA	**575**	**578**

Incertidumbres (factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza de 95%)

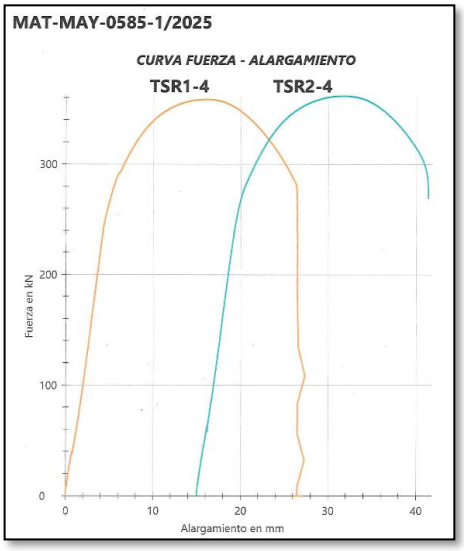
• Esfuerzo máximo (MPa)	**± 5.0**	**± 5.0**

OBSERVACIONES:
. Condición de la muestra: Zona de ensayo normalizada.
. Las probetas ensayadas fueron extraídas de la muestra como fue recibida del solicitante.
. Norma de Soldadura: AWS D1.5M/D1.5: 2020.
. Las muestras rompieron en el metal de base.

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales CITEmateriales

Figura 32

Curva de Fuerza - Alargamiento



Nota. Fuente: Laboratorio de materiales CITEmateriales

4.2. Discusiones

4.2.1. Al comparar el método de fabricación de probetas para el desarrollo de la tesis, nos pudimos dar cuenta que en la tesis de Tineo L. (2018), se prepararon 4 probetas en plancha ASTM A709 50W, con dimensiones de 700mm x 300mm x 25mm con bisel de 60°, y para la presente tesis se siguieron los mismos criterios de diseño para las probetas, teniendo 4 probetas en plancha ASTM A709 Gr. 50, con dimensiones de 25.4mm x 150mm x 300mm con bisel de 60°.

4.2.2. Al analizar los efectos térmicos producidos por el precalentamiento a los cupones de soldadura, pudimos ver que en la tesis de Tineo L. (2018) aplicada para el acero ASTM A709 50W de espesor de 25 mm, se aplicó un precalentamiento con rango de temperatura entre 250°F a 300°F (121°C a 148°C), mientras que para el presente estudio con un acero de ASTM A709 Gr.50 de espesor de 25.4 mm se tomaron probetas soldadas con temperaturas de precalentamiento de 100.85°C, 130.22°C, 160.5°Cy 192.18°C, para las cuales el amperaje varía entre 292.06 - 312.4 A, y un voltaje entre 29.5 – 29.91 V.

4.2.3. Al realizar los análisis de las propiedades mecánicas de tracción mediante ensayos destructivos, los resultados del laboratorio de materiales de la PUCP evidencian la curva de Fuerza vs Alargamiento dándonos el resultado de esfuerzos máximos de 578MPa, sin embargo, tiene la observación que al hacer una Fotomacrografía aumetos: 2X, se pudo encontrar solo 1 porosidad a lo largo del cordón.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Al determinar la temperatura ideal de precalentamiento para soldadura de aceros de 25.4 mm ASTM A709 Gr.50, se consiguió un resultado de 166.79°C.

5.1.2. Se fabricaron 4 probetas mediante las normas bridadas por el AWS D1.5 Structural Welding Code – Test Plate B, las cuales fueron de 150 de lado y 400 lo longitud por pobreta, con una separación de 3 mm para soldeo de probetas y un ángulo de 60°.

5.1.3. Al analizar los efectos térmicos producidos por el precalentamiento de los cupones, se determinó que la probeta #2 presentaba mejores resultados, cercanos a los valores teóricos esperados para una soldadura en plancha ASTM A709 Gr.50 de 25.4 mm de espesor.

5.1.4. Se realizó el análisis de las propiedades mecánicas de la probeta #2 mediante ensayos destructivos de análisis macrográfico, brindándonos una resistencia de a esfuerzos de 578MPa, lo cual es un resultado aceptable para el cordón de soldadura de acuerdo con el laboratorio de materiales de la PUCP.

5.2. Recomendaciones

5.2.1. Es muy importante la limpieza de escoria de soldadura entre cada pase de soldadura.

5.2.2. Es recomendable realizar un tratamiento térmico adecuado para evitar fisuraciones en la soldadura lo cual permite la libración de esfuerzos residuales.

VI. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Almendariz, M., Vaca, R., & Medina, E. (2021). Estudio de los Efectos de la Temperatura de Precalentamiento sobre la Microestructura y Propiedades Mecánicas de Aceros ASTM A36 y A572 GR. 50. Polo Del Conocimiento, 6(1), 1313–1337. https://doi.org/10.23857/pc.v6i1.2227 Ecuador

Francisco Falero, F. F. (2021). "Influencia de los tratamientos térmicos en las uniones soldadas de acero al carbono – Empresa Técnicas Metálicas Ingenieros 2017". Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.

Aspilcueta, A. (2014). Determinación de la temperatura de precalentamiento utilizando el método Tekken afin de prevenir la fisuración en frio en la unión de planchas CHRONIT T-1. Arequipa - Perú: Universidad Nacional de San Agustín.

Blanco, O. (2015). Efecto de la variación de temperatura entre pases en el acero al carbono ASTM A106 Grado B (tesis de pregrado). Universidad Libre, Bogotá, Colombia

Escalante-Espinoza, N. J., Fernández-Urbano, J. F., Quillos-Ruiz, S. A., Figueroa-León, R. A., & Nahui-Ortiz, J. (2021). Study of the affected area by heat in carbon steels, due to the effect of preheating and welding. Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July(January), 0–6. https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.238

ESAB. (2007). CONARCO. Obtenido de https://esab.com/cl/sam_es/brands/esab-family-brands/conarco/

ESAB. (2007). Proceso de Soldadura FCAW - Alambre Tubular Relleno de Fundente. Obtenido de https://es.scribd.com/document/487280531/DOC-1

FRONIUS. (2019). ¿QUE ES LA SOLDADURA MIG/MAG? Recuperado de:

https://www.fronius.com/es-es/spain/tecnologia-de-soldadura/el-mundo-de-la-soldadura/soldadura-mig-mag

Gelson, L. (2020). Blog materials. Obtenido de https://www.materiales.gelsonluz.com/2020/09/astm-a709-propiedades-mecanicas.html

Gomez F. (2016). Influencia de la entrada de calor en las características mecánicas y microestructurales finales de la zona afectada por el calor (ZAC) en uniones soldadas en tubería para transporte de hidrocarburos. (Tesis Posgrado), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Kisgal. (2013). KISMETAL S.A.C. Obtenido de https://www.kisgal-kismetal.com/soldadura-arco-sumergido/

Manterola, J. (1998). Puentes, Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Panplona - España.

Oruna Cruz, P. A., & Fernandez Urbano, J. F. (2021). Estudio Del Área Afectada Por El Calor En Los Aceros Al Carbono, Por Efecto De Precalentamiento Y Soldadura [Universidad Nacional del Santa]. https://doi.org/10.18687/laccei2021.1.1.238

Rodríguez, M. (2021). Centro de Conocimiento ESAB. Obtenido de http://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm

Tineo, L. (2018). *EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL PRECALENTAMIENTO Y LA TEMPERATURA SOSTENIDA EN EL AGRIETAMIENTO DE JUNTAS SOLDADAS CON FLUX CORE (FCAW) EN UN ACERO A709 50W*. LEDYS TINEO.

Tene, O. (2013). E*studio de la temperatura de precalentamiento en el procedimiento de* soldadura *SMAW en el hierro fundido gris y su incidencia en las propiedades*

mecánicas (Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato). Repositorio UTA.

Shen, S., Oguocha, I. N. y Yannacopoulos, S. (2012) “Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints”**.** *Journal of Materials Processing Technology.*

VII. ANEXOS

7.1. Fabricación de 04 cupones

- Se fabricaron 04 probetas de acero estructural en plancha de ASTM A709 Gr.50.
- Las probetas fueron fabricadas con medidas de 25.4 x 150 x 400 mm con bisel de 60°
- Se realizó primero el trazo, corte y biselado de probetas.
- Se arenaron las probetas para remover escorias y óxido.
- Se realizó el precalentamiento y soldeo siendo las temperaturas de ensayo de 100.85°C, 130.22°C, 160.5°Cy 192.18°C.
- Se realizó la toma de temperaturas y elaboración de cuadro de datos.

7.2. Análisis de los efectos térmicos del precalentamiento de cupones mediante cálculos teóricos obtenidos de una base de datos tomadas de campo.

De acuerdo con el "Método de Seferian", basados en su composición química del material y el espesor a soldar, la temperatura óptima de precalentamiento para la probeta es de 166.79°C, para estos cálculos se emplearon las ecuaciones 2, 3 y 4.

De la ecuación 2 hallamos el carbono equivalente.

$$C_q(\%) = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \qquad (2)$$

Los datos de la composición química se muestran en la tabla 10.

Tabla 10

Composición química del acero ASTM A709 Gr. 50 para el desarrollo del carbono equivalente

Componente químico	Porcentaje
C	0.19
Mn	1.25
Cr	0.65
Ni	0.4
Mo	0
C_Q (%)	**0.42**

Nota. Fuente elaboración propia

De la ecuación 3 hallamos el carbono total.

$$C_T(\%) = C_q + C_e = C_q * (1 + 0.005e) \quad (3)$$

Al aplicar la ecuación 3, y teniendo en cuenta q tenemos un espesor de 25.4 mm, hallamos el carbono total (C_T) el cual nos da un resultado de 0.48.

Por último, usamos la ecuación 4, para poder hallar la temperatura de precalentamiento.

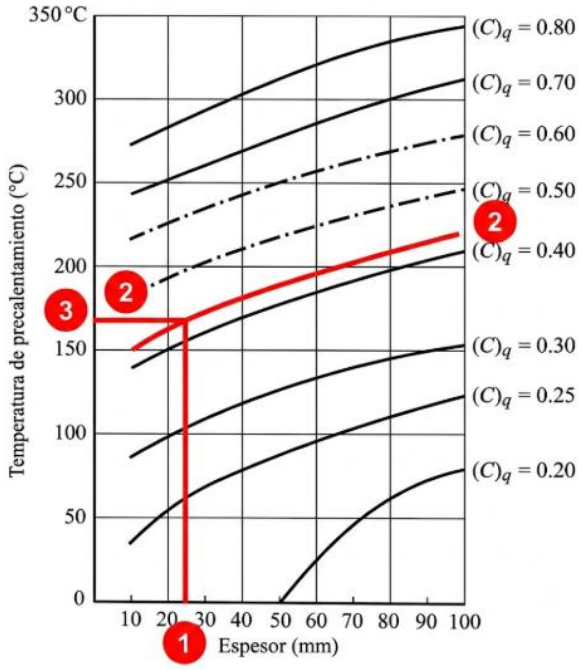
$$T0(°C) = 350\sqrt{(CT - 0.25)} \quad (4)$$

Dándonos una temperatura de precalentamiento teórica de 166.79 °C.

Al aplicar la gráfica brindada por Seferian, se intersecan validando el cálculo teórico realizado.

Figura 33

Desarrollo de grafica de Seferian



Nota. Elaboración propia

Para el desarrollo de la gráfica, primero se toma el espesor del material y se traza una línea vertical, luego se traza una línea curva correspondiente al calor del C_q hasta intersecarla con la primera línea, en ese punto se traza una línea horizontal hallando la temperatura de precalentamiento.

Desarrollaremos las fórmulas teóricas comparándolas con la temperatura hallada anteriormente.

Primero hallaremos el aporte de calor neto mediante la fórmula 1.

$$Q_{neto} = \frac{V * I}{v} * \eta \qquad (1)$$

Los datos para hallar el calor neto teórico se muestran en la tabla 11.

Tabla 11

Calor neto

Descripción	Medida	Unidad
V	29	V
I	310	A
v	300	mm/min
	5.00	mm/s
η	0.7	-
Qneto	**1218.00**	**J/mm**

Nota. Elaboración propia

Para hallar la velocidad de avance de soldadura verificamos la figura 30, se aplicó una velocidad de avance de 300 mm/min para asegurar una buena soldadura.

Figura 34

Energía aportada a la soldadura en las diferentes velocidades de avance

Velocidad de Avance (mm/min)	Energía Aportada a la Soldadura (J/mm)
300	592,00
400	443,78
500	355,34
600	296,00
700	253,64

Nota. Recuperado de https://www.redalyc.org/journal/5722/572261762004/html/#:~:text=Resumen%3A%20Para%20la%20construcci%C3%B3n%20de,energ%C3%ADa%20aportada%20a%20la% 20uni%C3%B3n.

Para hallar la eficiencia de aplicamos verificamos la figura 31, correspondiente al manual de recipientes a presión.

Figura 35

Tipos de juntas soldadas

TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS

TIPOS NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA JUNTA, E Cuando la junta es: a. Radiografiada totalmente	b. Examinada por zonas	c. No Examinada
1 	Juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.	1.00	0.85	0.70
2  En juntas circunferenciales únicamente	Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar	0.90	0.80	0.65
3 	Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo	–	–	0.60

Nota. Recuperado de Manual de recipientes a presión

Aplicaremos el "Método de Monograma de COE", basados en su composición química del material para hallar la temperatura óptima de precalentamiento para la probeta y corroborar el método hallado anteriormente, dándonos un valor aproximado de 170°C, para estos cálculos se empleó la ecuación 5 y las figuras 23, 24 y 25.

De la ecuación 5 hallamos el carbono equivalente (CE_{IIW}).

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

Los datos de la composición química se muestran en la tabla 12.

Tabla 12

Composición química del acero ASTM A709 Gr. 50 para el desarrollo del carbono equivalente

Composición	Porcentaje
Mn	1.25
Si	0.65
Cr	0.65
Mo	0
V	0.1
Ni	0.4
Cu	0.4
CE_{IIW}	**0.520**

Nota. Elaboración propia

De la figura 17, hallamos el espesor combinado, el espesor combinado para planchas de 1" (25.4 mm), siendo ambas planchas del mismo espesor tendremos que el cálculo del espesor combinado es:

e = t1 + t2

e = 25.4 + 25.4

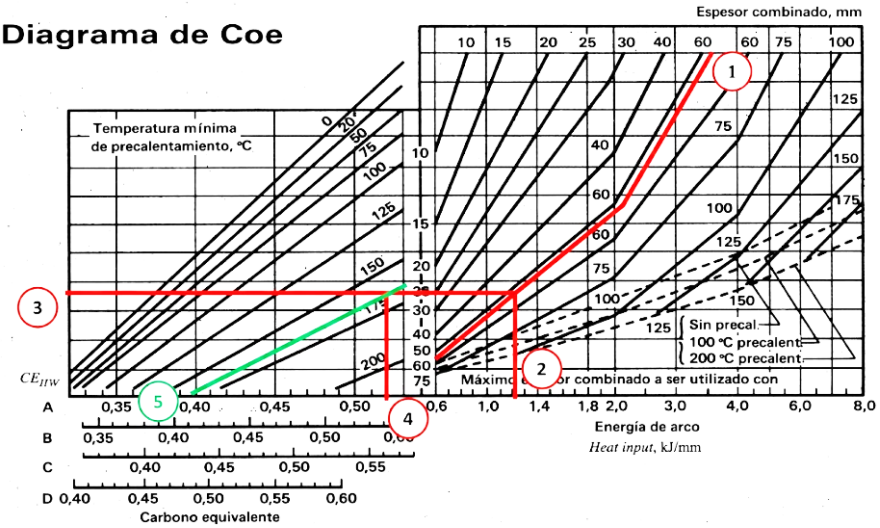
e = 50.8 mm

De la figura 18, identificamos la escala B para soldadura de alambre tubular para el desarrollo de las fórmulas.

Por último, interceptamos las curvas en el diagrama de COE y hallamos la temperatura de precalentamiento, en la figura 32.

Figura 36

Desarrollo de diagrama de COE



Nota. Elaboración propia

Para el desarrollo del diagrama de COE se seguirá la siguiente secuencia:

1. Se ingresa por el espesor combinado en el punto 1, siendo este de 50.8 mm, y se traza una curvatura paralela a las demás.
2. Se halla el Qneto en el punto 2, siendo este de 1.22 KJ/mm, y se traza una línea vertical hasta interceptar con la línea 1.
3. En la intercepción de las líneas 1 con la 2, se traza una horizontal siendo esta la línea 3.
4. Luego habiendo identificado la escala B de la figura 24, y habiendo hallado el CE_{IIW}, hallamos el punto 4, luego trazamos una vertical hasta interceptarla con la línea 3.
5. Finalmente, hallado el punto 5, trazamos una diagonal, paralela a las diagonales de temperatura la cual se aproxima a 170°C.

Luego también aplicaremos la ecuación 8 para hallar la velocidad de enfriamiento de materiales gruesos.

$$Ve = \frac{-2\,\pi\,k\,\rho\,C\,(e)^2(T_C - T_O)^2}{Q_{neto}} \tag{8}$$

Los datos de velocidad de enfriamiento se muestran en la tabla 13.

Tabla 13

Velocidad de enfriamiento de materiales

Dimensión	Medidas	Unidad
k	46.6	W/m°K
	0.0466	J/mms°C
ρ	0.008	g/mm3
C	0.46	J/g °C
E	25.4	mm
Tc	319.29	°C
To	166.79	°C
Qnet	592.00	J/mm
Ve	**-27.31**	**°C/s**

Nota. Elaboración propia

Se determinó la temperatura máxima en cada punto de la zona afectada por el calor para los 5 milímetros más cercanos al cordón de soldadura, estos resultados se evidencian en la tabla 14.

Para ello aplicamos la ecuación 9.

$$\frac{1}{T_P - T_O} = \frac{\sqrt{2\pi \in}\,\rho C e Y}{Q_{neto}} + \frac{1}{T_f - T_O} \tag{9}$$

Tabla 14

Temperatura máxima en cada punto

TEMPERATURA MÁXIMA EN CADA PUNTO					
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
PROBETA 1	861.85	626.72	505.97	432.46	383.01
PROBETA 2	870.17	637.56	518.01	445.20	396.20
PROBETA 3	903.60	678.05	561.09	489.51	441.20

PROBETA 4	815.61	578.52	459.54	388.01	340.27
TEORICO	885.43	656.02	537.63	465.38	416.69

Nota. Elaboración propia

Después aplicaremos la ecuación 10 para el tiempo de solidificación en la zona afectada por el calor.

$$Ts = \frac{LQ_{neto}}{2\pi k\rho C(T_C - T_O)^2} \quad (10)$$

Los datos para el tiempo de solidificación en la zona afectada por el calor se muestran en la tabla 15.

Donde L viene siendo el calor latente de fusión de la soldadura

Tabla 15

Velocidad de enfriamiento de materiales

Dimensión	**Medidas**	**Unidad**
K	46.6	W/m°K
	0.0466	J/mms°C
ρ	0.008	g/mm3
C	0.46	J/g °C
L	2	J/mm3
Qnet	592.00	J/mm
Tf	1520	°C
To	166.79	°C
TS	**0.60**	**s**

Nota. Elaboración propia

Por último, hallamos la dureza máxima del hacer en base a sus propiedades químicas, para ellos usaremos las ecuaciones 11 y 12.

$$HV = 939 * C + 284 \quad (11)$$

$$HV = 939 * 0.19 + 289$$

$$HV = 462.4$$

La dureza máxima en el acero en Vickers es de 462.4 HV.

Para la zona afectada por el calor aplicaremos la siguiente fórmula

$$(ZAC)(HV) = 1200 * Ce - 200 \quad (12)$$

$$(ZAC)(HV) = 1200 * 0.52 - 200$$

$$(ZAC)(HV) = 424$$

La zona afectada por el calor tiene una dureza en Vickers es de 424 HV

Los datos analizados fueron realizados a partir de la siguiente data tomada en campo:

Tabla 16

Datos recopilados en campo para Probeta 1

PROBETA 1

N° DE INTERPASES	N° DE CAPAS	TEMPERATURA AL INICIAR LA SOLDADURA(°C)	TEMPERATURA AL FINALIZAR LA SOLDADURA(°C)		TIEMPO DE SOLDEO (seg)	TIEMPO DE ENFRIAMIENTO (seg)	VOLTAJE (V)	AMPERAJE (A)	TEMP MAXIMA OBTENIDA TP(°C)	TEMP EN ZONA ZAC TF(°C)
			T1	T2						
1	1	130	243	303	90	1024	28.3	312	94	130
2	2	131.25	251	378	109	1089	28.3	312	120	105
3	3	130	260	400	78	1226	28.6	312	163	115
4	4	130.73	242	375	70	1105	28.6	312	150	123
5		131	230	285	90	1119	31	312	149	115
6	5	130	236	338	80	1156	28.6	314	190	135
7		130	227	293	78	1196	28.6	314	180	120
8	6	130	245	290	79	1205	29.4	314	205	145
9		130	257	354	75	1219	29.4	314	215	160
10		129.52	227	303	78	1235	30.2	311	221	125
11	7	130	227	307	79	1336	30.2	311	230	143
12		129.86	200	305	78	1389	30.2	312	196	196
13		131	238	310	91	1476	30.2	312	245	139
14	8	130	235	323	78	1492	30.2	312	177	245
15		130	239	315	70	1595	30	312	140	162
16		130.31	208	283	84	1628	30	312	160	117
17		130	207	266	86	1664	30	312	190	103
DISTANCIA DESDE EL BORDE DE FUSION DE LA SOLDADURA "d" (mm)							22			

Nota. Elaboración propia

Tabla 17

Datos recopilados en campo para Probeta 2

PROBETA 2

N° DE INTERPASES	N° DE CAPAS	TEMPERATURA AL INICIAR LA SOLDADURA(°C)	TEMPERATURA AL FINALIZAR LA SOLDADURA(°C)		TIEMPO DE SOLDEO (seg)	TIEMPO DE ENFRIAMIENTO (seg)	VOLTAJE (V)	AMPERAJE (A)	TEMP MAXIMA OBTENIDA TP(°C)	TEMP EN ZONA ZAC TF(°C)
			T1	T2						
1	1	146.3	288	371	97	1102	29.7	205	184	127
2	2	145.9	373	371	95	1132	30	293	203	170
3	3	154	245	303	105	491	29.7	293	184	130
4	4	130	230	294	63	500	30	289	188	134
5		133	237	320	90	951	30	277	180	130
6	5	145	284	360	99	725	30.5	281	214	142
7		138	232	354	56	680	30.2	292	178	124
8		120	221	334	72	1112	30.5	296	185	147
9	6	116	224	380	67	396	30.5	283	207	145
10		144	231	353	68	481	30.5	280	235	149
11		115	291	377	73	378	30.2	287	225	156
12	7	112	262	296	59	550	29	283	215	144
13		136	260	383	84	615	29.7	282	240	152
14		130	237	386	83	1020	30	280	276	179
15	8	145	242	356	74	244	29	292	213	188
16		182	265	288	80	275	29.3	280	260	204
17		188	286	338	73	236	29	292	280	207
18		206	280	300	74	334	30	289	260	212
19		180	267	329	78	1081	30.5	285	250	185
DISTANCIA DESDE EL BORDE DE FUSION DE LA SOLDADURA "d" (mm)								20		

Nota. Elaboración propia

Tabla 18

Datos recopilados en campo para Probeta 3

PROBETA 3

N° DE INTERPASES	N° DE CAPAS	TEMPERATURA AL INICIAR LA SOLDADURA(°C)	TEMPERATURA AL FINALIZAR LA SOLDADURA(°C)		TIEMPO DE SOLDEO (seg)	TIEMPO DE ENFRIAMIENTO (seg)	VOLTAJE (V)	AMPERAJE (A)	TEMP MAXIMA OBTENIDA TP(°C)	TEMP EN ZONA ZAC TF(°C)
			T1	T2						
1	1	175	243	320	93	167	30	285	247	161
2	2	165	291	397	98	299	30	284	277	180
3	3	150	300	423	120	380	30	292	290	201
4	4	134	230	378	69	152	30	298	274	163
5		177	276	415	73	220	30	305	325	208
6	5	178	294	198	79	219	30	295	304	197
7		174	286	361	59	120	30	304	268	193
8		206	308	391	89	314	30	308	327	215
9	6	168	283	392	74	60	30	298	320	199
10		213	313	400	75	70	30	295	318	194
11		230	313	373	58	75	30	282	287	202
12		250	340	409	55	60	30	310	280	215
13	7	143	326	383	68	65	30	295	298	208
14		220	328	380	67	80	29	290	312	212
15		256	340	390	60	120	29	280	253	193
16		253	329	311	54	68	29.2	260	262	197
17		175	333	386	81	810	29	284	361	204
DISTANCIA DESDE EL BORDE DE FUSION DE LA SOLDADURA "d" (mm)						30				

Nota. Elaboración propia

Tabla 19

Datos recopilados en campo para Probeta 4

PROBETA 4

N° DE INTERPASES	N° DE CAPAS	TEMPERATURA AL INICIAR LA SOLDADURA(°C)	TEMPERATURA AL FINALIZAR LA SOLDADURA(°C)		TIEMPO DE SOLDEO (seg)	TIEMPO DE ENFRIAMIENTO (seg)	VOLTAJE (V)	AMPERAJE (A)	TEMP MAXIMA OBTENIDA TP(°C)	TEMP EN ZONA ZAC TF(°C)
			T1	T2						
1	1	115	266	302	87	590	30.5	295	159	103
2	2	115	221	353	72	323	30	283	142	120
3	3	109	230	398	96	1277	30	292	192	127
4	4	77	181	292	64	577	30	293	195	221
5		82	179	329	74	751	30	292	169	124
6	5	77	182	321	58	630	29.7	300	137	122
7		59	175	224	74	270	30	304	148	101
8		88	197	251	85	700	30	287	170	119
9	6	68	180	347	64	507	29.7	285	250	137
10		91	215	335	55	738	30	300	190	138
11		115	212	363	63	390	30	278	226	161
12		115	205	313	60	718	30	306	212	145
13	7	80	205	326	73	254	30	292	216	131
14		115	277	321	72	130	30	287	212	133
15		126	170	249	57	991	29	302	235	153
16	8	63	198	189	63	144	29	292	143	114
17		105	219	355	66	60	29	296	225	144
18		134	232	279	64	69	30	301	317	134
19		163	238	366	50	59	30	293	314	154
20		120	254	333	63	1560	30	289	229	164
DISTANCIA DESDE EL BORDE DE FUSION DE LA SOLDADURA "d" (mm)								13		

Nota. Elaboración propia

7.3. Analizar las propiedades mecánicas de tracción de los cupones mediante ensayos destructivos

La temperatura óptima teórica fue de 166.79°C, para lo cual se envió el cupón con el valor de precalentamiento más cercano de 160.50°C, dándonos resultados aceptables de resistencia de acuerdo con el laboratorio de materiales de la PUCP.

El análisis de cupones comprende cortar el material base y someterlo a cargas para hallar esfuerzos máximos que puede soportar el cordón de soldadura.

Figura 37

Ensayos destructivos de cupones



Nota. Fuente elaboración propia

Figura 38

Ensayo de tracción

ENSAYO DE TRACCIÓN

MAT-Lab-4.04 Rev.7

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 3

REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales - Analista 02.
MUESTRA : Probetas soldadas.
FECHA DE EJECUCIÓN : 2025.05.22

RESULTADOS:

MUESTRA		TSR1-4	TSR2-4
SECCIÓN TRANSVERSAL	ANCHO (mm)	25.07	25.08
	ESPESOR (mm)	24.88	24.94
	ÁREA (mm^2)	623.7	625.5
CARGAS (kN)	MÁXIMA	358.5	361.5
ESFUERZOS (MPa)	MÁXIMA	**575**	**578**

Incertidumbres (factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza de 95%)

• Esfuerzo máximo (MPa)	**± 5.0**	**± 5.0**

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales CITEmateriales

Figura 39

Ensayo de Impacto

ENSAYO DE IMPACTO

MAT-Lab-4.04 Rev.7

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 2

REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales – Analista 02.
TIPO DE ENSAYO : Charpy V.
MUESTRA : **Probeta soldada de acero.**
FECHA DE EJECUCIÓN : 2025.05.23

RESULTADOS:

MUESTRA	TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	ENERGÍA ABSORBIDA (JOULES)	ENERGÍA PROMEDIO (JOULES)	OBSERVACIONES
1	23	195	**194**	---
2	23	178		---
3	23	209		---

Incertidumbre (factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza de 95%):
- Incertidumbre para energía absorbida menor o igual a 64 J **= ± 2,2 J.**
- Incertidumbre para energía absorbida mayor a 64 J **= ± 3,2 J.**

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales CITEmateriales

Figura 40

Ensayo de Doblado



ENSAYO DE DOBLADO

MAT-Lab-4.04 Rev.7

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 1

SOLICITADO POR : JORGE ALEXIZ PARDO PRIETO
DIRECCIÓN : J Lt. 16 Mz, Av. Argentina, Nuevo Chimbote - Perú
REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales – Analista 02.
MUESTRA : **Probetas soldadas.**
FECHA DE EMISIÓN : 2025.05.28.

RESULTADOS:

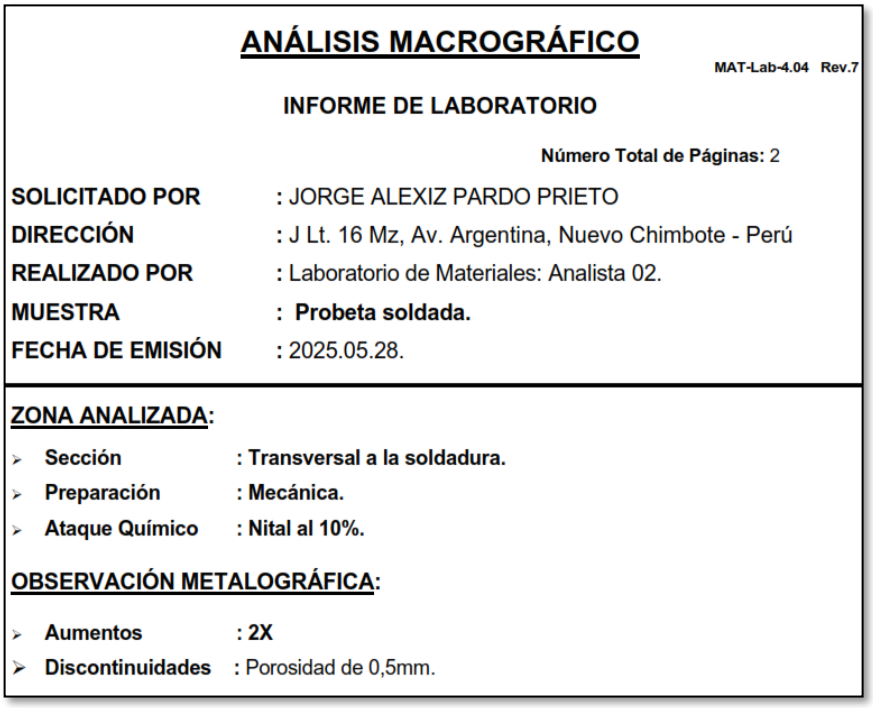
MUESTRA	ÁNGULO DE DOBLADO	PRESENCIA DE DISCONTINUIDADES	OBSERVACIONES
DOBL-4	180°	---	**CONFORME**
DOBL-1	180°	---	**CONFORME**
DOBL-12	180°	---	**CONFORME**
DOBL-10	180°	---	**CONFORME**

Fecha de Ejecución: 2025.05.09.

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales CITEmateriales

Figura 41

Análisis Macrográfico



ANÁLISIS MACROGRÁFICO

MAT-Lab-4.04 Rev.7

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 2

SOLICITADO POR : JORGE ALEXIZ PARDO PRIETO
DIRECCIÓN : J Lt. 16 Mz, Av. Argentina, Nuevo Chimbote - Perú
REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales: Analista 02.
MUESTRA : **Probeta soldada.**
FECHA DE EMISIÓN : 2025.05.28.

ZONA ANALIZADA:

- **Sección** : **Transversal a la soldadura.**
- **Preparación** : **Mecánica.**
- **Ataque Químico** : **Nital al 10%.**

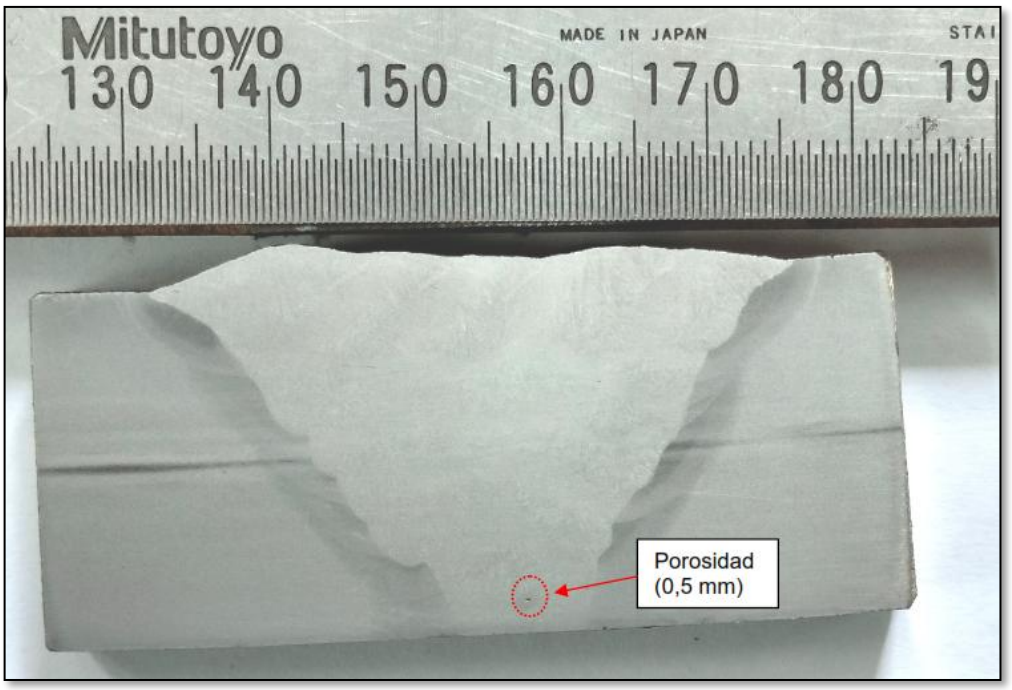
OBSERVACIÓN METALOGRÁFICA:

- **Aumentos** : **2X**
- **Discontinuidades** : Porosidad de 0,5mm.

Nota. Fuente: Laboratorio de materiales CITEmateriales

Figura 42

Fotomacrografía aumento:2X



Nota. Fuente: Laboratorio de materiales CITEmateriales