UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

TESIS

DETERMINACIÓN DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO ESFEROIDAL UTILIZANDO LOS PROCESOS SMAW Y GMAW (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

PRESENTADO POR:

Br. FRANSZUA AYTE ALVAREZ

Br. TITO CCONOJHUILLCA HUANCCOLLUCHO

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALURGICO

ASESOR:

Mgt. EDUARDO FABIAN ORTIZ SARAVIA

CUSCO – PERÚ

2026

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** Mgt. EDUARDO FABIAN ORTIZ SARAVIA quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesistitulada: DETERMINACIÓN DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO ESFEROIDAL UTILIZANDO LOS PROCESOS SMAW Y GMAW (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

Presentado por: FRANSZUA AYTE ALVAREZ DNI N° 48307242;
presentado por: TITO CCONOJHUILLCA HUANCCOLLUCHO DNI N°: 46678226
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 09 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 24 de Septiembre de 2026

Firma

Post firma Eduardo Fabian ORTIZ SARAVIA.

Nro. de DNI 23932525

ORCID del Asesor 0000-0002-6142-3459

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:629508125

Franszua_AYTE_ALVAREZ Tito CCONOJHUILLCA_...

DETERMINACIÓN DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO ESFEROIDAL UTILIZANDO L...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:629508125

Fecha de entrega
24 sep 2026, 10:39 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
24 sep 2026, 10:53 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS AYTE TTITO OKOK.pdf

Tamaño del archivo
2.7 MB

175 páginas

32.739 palabras

191.958 caracteres

9% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 18 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

9% Fuentes de Internet
0% Publicaciones
5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas e Ingeniería Metalúrgica.

Señores Docentes, Miembros del Jurado:

Cumpliendo con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, pongo a vuestra disposición la tesis colectiva intitulada: **DETERMINACIÓN DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO ESFEROIDAL UTILIZANDO LOS PROCESOS SMAW Y GMAW.**

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la soldadura del hierro esferoidal mediante los procesos SMAW y GMAW, con el fin de comparar su comportamiento metalúrgico y determinar el proceso más adecuado para lograr uniones de mejor calidad. La investigación busca aportar soluciones a los problemas de soldabilidad del hierro fundido nodular, proponiendo técnicas y parámetros de soldadura que reduzcan la formación de estructuras frágiles y defectos, contribuyendo así al desarrollo de procedimientos más eficientes y confiables en la soldadura de materiales ferrosos.

DEDICATORIA I

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría para no rendirme en los momentos difíciles.

A mis padres, Walter y Pilar, quienes han sido el pilar fundamental de mi formación. Gracias por su amor incondicional, sus sacrificios y su apoyo constante.

Mamá, gracias por ser mi refugio, mi fuerza silenciosa y el corazón que siempre creyó en mí incluso cuando yo dudaba; este logro es tan tuyo como mío.

A mis hermanos: Alvin y Francy, por su compañía y apoyo; y a ti, Joseph, que ahora estás en el cielo, pero sigues viviendo en mi corazón y siendo mi inspiración para seguir adelante.

A mi padre de la universidad, Julio Danilo, por su guía y apoyo durante esta etapa tan importante.

Al Ing. Franco y al Ing. Lenin, maestros y guías en el trabajo, gracias por sus enseñanzas, paciencia y orientación profesional y finalmente gracias a todos ustedes, gracias por ser parte de este sueño hecho realidad.

Franszua Ayte Alvarez

DEDICATORIA II

A mis padres Valentina y Teófilo, quienes han sido mi mayor fuente de apoyo, inspiración y fortaleza a lo largo de este camino. Gracias por su amor incondicional, por sus enseñanzas y por cada sacrificio. Este logro es el fruto de su esfuerzo tanto como el mío.

A mis hijos, Lois Eunise y Levi Eithan, quienes son el corazón de mi vida. Gracias por ser mi mayor inspiración, por sus abrazos en los días difíciles y por enseñarme que con amor y perseverancia todo es posible. Este logro es tan suyo como mío.

A mis hermanos, por la motivación constante y por su apoyo inquebrantable en los momentos de estrés. Gracias por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía.

A mis amigos y compañeros, quienes hicieron de este largo camino una experiencia inolvidable gracias, por el apoyo incondicional y por ser mi refugio en los momentos de mayor estrés. Este logro también es de ustedes.

Tito Cconojhuillca Huanccollucho

AGRADECIMIENTO

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por la sólida formación académica y humana que me brindaron a lo largo de mi carrera.

Agradezco de manera especial a las empresas donde tuve la oportunidad de desarrollarme profesionalmente: G y R Máquinas, Raptor Mining, Prodise Ingeniería y Servicios, Shougang Hierro Perú, Makyl Engineering Consulting and Services y SKF Group, instituciones que me permitieron asumir nuevos retos y consolidar mi experiencia en el sector industrial y minero.

Asimismo, extiendo mi reconocimiento a las importantes compañías mineras que fueron clientes estratégicos en los diversos proyectos y servicios ejecutados, tales como Antamina, Chinalco, Las Bambas, Hudbay, Antapaccay, Southern, Minsur, Volcan, Quellaveco, Shougang Hierro Perú y Marcobre en el Perú; así como Mansfield en Argentina y Sierra Gorda en Chile. La participación en proyectos desarrollados para estas operaciones mineras representó una valiosa oportunidad de aprendizaje, crecimiento profesional y fortalecimiento técnico en el ámbito de la ingeniería aplicada al sector minero.

Un agradecimiento especial a Chang Xiangjun, gran líder y maestro, por su guía y ejemplo profesional; así como a Lenin, Franco y Javier, por su orientación, confianza y respaldo en cada desafío asumido y a todos ustedes, gracias por contribuir de manera significativa a mi crecimiento personal y profesional.

Br. Franszua Ayte Alvarez

Br. Tito Cconojhuillca Huanccollucho

ÍNDICE

PRESENTACIÓN ..... **I**

DEDICATORIA I ..... **II**

DEDICATORIA II ..... **III**

AGRADECIMIENTO ..... **IV**

ÍNDICE ..... **V**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **XII**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XIV**

SIMBOLOGÍA ..... **XVII**

RESUMEN ..... **XIX**

ABSTRACT ..... **XX**

INTRODUCCIÓN **1**

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 4

1.2.1. Problema General 4

1.2.2. Problemas Específicos 5

1.3. JUSTIFICACIÓN 5

1.3.1. Tecnológica 5

1.3.2. Económica 6

1.3.3. Social 6

1.3.4. Ambiental 6

1.4. IMPORTANCIA DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN 7

1.5. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN 8

1.5.1. Objetivo General 8

1.5.2. Objetivos Específicos 8

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES 9

2.1.1. Antecedentes Internacionales 9

2.1.2. Antecedentes Nacionales 11

2.2. BASES TEÓRICAS 13

2.2.1. Hierro fundido 13

2.2.1.1. Características principales 14

2.2.1.2. Diagrama Hierro - Grafito 15

2.2.1.3. Clasificación de Hierro Fundido 16

2.2.1.4. Microconstituyentes del Hierro Fundido 21

2.2.1.5. Principales Usos del Hierro Fundido 22

2.2.2. Proceso de Soldadura GMAW 23

2.2.2.1. Principios Básicos de Operación 23

2.2.2.2. Variables del Proceso 24

2.2.2.3. Equipo 25

2.2.2.4. Mecanismos de transferencia de metal 26

2.2.3. Electrodos para GMAW 30

2.2.4. Gases protectores 31

2.2.5. Soldabilidad del Hierro Fundido Nodular..... 38

2.2.5.1. Clasificación de la soldabilidad..... 39

2.2.5.2. Problemas en la soldabilidad de las fundiciones 40

2.2.6. Ensayo de soldabilidad 41

2.2.7. Carbono equivalente 42

2.2.7.1. Cálculo del carbono equivalente..... 42

2.2.8. Proceso de Soldadura SMAW 43

2.2.8.1. Definición 44

2.2.8.2. Variables principales 44

2.2.8.3. Capacidades y limitaciones del proceso 47

2.2.8.4. Tipos de Electrodos para SMAW 48

2.2.9. Metalurgia de la Soldadura 49

2.2.9.1. Zonas Metalúrgicas de la Soldadura..... 50

2.2.10. Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura durante la Soldadura por Arco ……..51

2.2.10.1. Aporte de Calor (heat input)..... 51

2.2.10.2. Temperatura Inicial de la Chapa (o Temperatura de Precalentamiento)..... 52

2.2.10.3. Geometría de la soldadura 52

2.2.10.4. Características Térmicas del Material 52

2.2.10.5. Diámetro del electrodo. 53

2.2.11. Cálculo del Ancho de la ZAC 53

2.2.12. Temperatura de precalentamiento (método de Seferian) 54
2.2.13. Carbono Equivalente 56
2.2.13.1. Formulas del carbono equivalente (Ce) 57
2.2.14. Ensayos Destructivos y no Destructivos 59
2.2.14.1. Ensayos no Destructivos 59
2.2.14.2. Ensayos Destructivos 62
2.2.15. Las Discontinuidades en Soldadura 63
2.2.15.1. Discontinuidades Superficiales 63
2.2.15.2. Discontinuidades Internas 68
2.2.15.3. Discontinuidades Como Inclusiones 72
2.2.16. Calificación del Procedimiento 77
2.2.16.1. Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) 77
2.2.16.2. Registro de Calificación del Procedimiento (PQR) 77
2.2.16.3. Calificación de Soldadores (WPQ) 77

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. HIPÓTESIS 78
3.1.1. Hipótesis general 78
3.1.2. Hipótesis especificas 78
3.2. VARIABLES 78
3.2.1. Variables independientes 78
3.2.2. Variables dependientes 79
3.2.3. Variables intervinientes 79

3.3. MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES 80

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. ÁMBITO DE ESTUDIO: LOCALIZACIÓN POLÍTICA Y GEOGRÁFICA 81
4.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 82
4.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN 82
4.4. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN 83
4.5. TIPO DE LA INVESTIGACIÓN 83
4.6. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN 83
4.7. POBLACIÓN Y MUESTRA 84
4.7.1. Población 84
4.7.2. Muestra 84
4.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS 85
4.8.1. Técnicas 85
4.8.2. Instrumentos 86
4.9. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN 86
4.10. VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS 87
4.11. EQUIPOS Y MATERIALES 87
4.11.1. Maquinaria y Equipos 87
4.11.2. Material Base 92
4.11.3. Material de Aporte 93
4.12. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 97
4.12.1. Preparación de las Probetas 97

4.12.2. Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) 100

4.12.3. Cálculo del Calor Neto Aportado 110

4.12.4. Cálculo del Ancho de la ZAC 111

4.13. CONTROL DE CALIDAD DE LAS PROBETAS 113

4.13.1. Inspección Visual 113

4.13.2. Ensayo por Partículas Magnéticas 113

4.13.3. Ensayo de Dureza 114

4.13.4. Análisis Metalográfico 115

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN VISUAL 116

5.2. RESULTADOS DEL ENSAYO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS 117

5.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA 120

5.4. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL CALOR APORTADO 121

5.5. RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA ZAC 122

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. ANÁLISIS DEL CALOR APORTADO Y SU RELACIÓN CON EL ANCHO DE LA ZAC 123

6.2. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE DUREZA 124

6.3. ANÁLISIS DE LAS DISCONTINUIDADES DETECTADAS 126

6.4. COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS SMAW Y GMAW 128

6.5. LIMITACIONES DEL ESTUDIO 128

CONCLUSIONES 132

RECOMENDACIONES 134

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 137

ANEXOS 141

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA 142

ANEXO 2: REGISTROS DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR) 144

ANEXO 3: CERTIFICADOS DE MATERIALES 152

ANEXO 4: REGISTROS FOTOGRÁFICOS 153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de características de varios hierros fundidos respecto a la fundición de acero de 0.3% C 14

Tabla 2 Propiedades mecánicas y típicas aplicaciones de fundición de hierro nodular 20

Tabla 3 Composición química de los diferentes grados de hierro nodular 20

Tabla 4 Corriente de transición globular-rociado para diferentes tipos de electrodos 29

Tabla 5 Principales gases del proceso GMAW, transferencia rociada 36

Tabla 6 Gases que se emplean en el GMAW con transferencia por corto circuito 38

Tabla 7 Especificación de la AWS para electrodos recubiertos 48

Tabla 8 Eficiencia térmica de los procesos de arco 52

Tabla 9 Criterios de aceptación para ensayo visual 60

Tabla 10 Matriz de operacionalización de variables 80

Tabla 11 Características técnicas de la máquina de soldar RH 400 87

Tabla 12 Composición química del ASTM A536, grado 60-40-18 92

Tabla 13 Propiedades mecánicas del ASTM A536, grado 60-40-18 93

Tabla 14 Composición química del electrodo ENi-CI 95

Tabla 15 Propiedades mecánicas del electrodo ENi-CI 95

Tabla 16 Composición química del electrodo ERNi-1 96

Tabla 17 Características de la junta a soldar 98

Tabla 18 Parámetros de soldadura del proceso SMAW 109

Tabla 19 Parámetros de soldadura del proceso GMAW 109

Tabla 20 Resumen del aporte de calor en los procesos SMAW y GMAW 111

Tabla 21 Resumen del ancho de la ZAC en los procesos SMAW y GMAW 113

Tabla 22 Resultados de la inspección visual..... 116

Tabla 23 Resultados del ensayo por partículas magnéticas 117

Tabla 24 Resultados del ensayo de dureza - Proceso SMAW 120

Tabla 25 Resultados del ensayo de dureza - Proceso GMAW 120

Tabla 26 Aporte de calor en los procesos SMAW y GMAW..... 121

Tabla 27 Ancho de la ZAC en los procesos SMAW y GMAW 122

Tabla 28 Comparación de los procesos SMAW y GMAW 128

Tabla 29 Matriz de consistencia..... 142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama Hierro-grafito 16

Figura 2 Hierro fundido gris con aumento 100x 17

Figura 3 Hierro fundido blanco. 18

Figura 4 Hierro fundido maleable con aumento de 100x. 19

Figura 5 Proceso de soldadura GMAW 24

Figura 6 Equipo del proceso GMAW 26

Figura 7 Transferencia por corto circuito 27

Figura 8 Transferencia globular 28

Figura 9 Transferencia por rociado axial 29

Figura 10 Contorno del cordón y patrón de penetración para diferentes gases de protección. .. 33

Figura 11 Efecto de la adición de oxígeno vs. CO2 al argón de protección. 34

Figura 12 Elementos típicos de un circuito del proceso SMAW 44

Figura 13 Calidad de soldadura versus influencia de las variables 47

Figura 14 Zonas metalúrgicas producidas en una junta soldada 51

Figura 15 Gráfico de Seferian 56

Figura 16 Exceso de penetración 64

Figura 17 Falta de penetración 64

Figura 18 Concavidad externa 65

Figura 19 Concavidad interna 65

Figura 20 Socavaduras o mordeduras de borde 66

Figura 21 Quemado 67

Figura 22 Salpicaduras de metal 67

Figura 23 Falta de continuidad del cordón 68

Figura 24 Fisuras longitudinales 69

Figura 25 Fisuras transversales 69

Figura 26 Fisura de interrupción 70

Figura 27 Fisuras en la zona afectada por el calor 70

Figura 28 Falta de penetración 71

Figura 29 Falta de fusión 71

Figura 30 Falta de fusión 72

Figura 31 Inclusiones gaseosas 73

Figura 32 Porosidad agrupada. 73

Figura 33 Porosidad alineada 74

Figura 34 Inclusiones no metálicas 74

Figura 35 Inclusión de escoria aisladas 75

Figura 36 Escorias alineadas 76

Figura 37 Desalineado 76

Figura 38 Ubicación geográfica del taller de soldadura UNSAAC 81

Figura 39 Máquina de soldar RH 400 88

Figura 40 Máquina de soldar HOBART Beta-Mig 89

Figura 41 Pirómetro óptico 90

Figura 42 Equipo de ensayo de doblez 91

Figura 43 Yugo de CA 91

Figura 44 Preparación de las probetas 99

Figura 45 Bisel de las probetas 99

Figura 46 Probetas soldadas 100

Figura 47 Relación entre el aporte de calor y el ancho de la ZAC 123

Figura 48 Perfil de dureza en los procesos SMAW y GMAW 125

Figura 49 Comparación de discontinuidades entre procesos 126

SIMBOLOGÍA

SAE = Sociedad de ingenieros automotores (Society of automotive engineers).

AISI = Instituto Americano del hierro y acero (American Iron and Steel Institute)

SMAW = Sield metal arc welding (soldadura por arco electrodo revestido)

GMAW = Gas metal arc welding (Soldadura por arco con protección gaseosa)

AWS= Sociedad americana de soldadura (American Welding Society)

mm = Milímetro.

CC = Corriente continua.

CA= Corriente alterna.

ANSI= Instituto americano de normas nacionales (American national standards institute)

ZF = Zona de fusión.

ZAC = Zona afectada por el calor.

MB = Metal base.

H= Energía de soldeo, en J/mm

V = voltios.

A = Amperios

v = velocidad de soldeo.

Tmax = Temperatura máxima

To = Temperatura inicial de la chapa.

Tf = Temperatura de fusión o Temperatura del líquido del metal a soldar.

C =Calor especifico del metal sólido.

Hnet = energía aportada neta.

t= Espesor de la chapa a soldar.

ρ = Densidad del material (g/mm3)

ρC = Calor especifico volumétrico.

Y=Ancho de la zona afectada térmicamente.

k= Conductividad térmica del metal

r = Espesor relativo de la chapa.

Ce: carbono equivalente químico.

Tp = Temperatura de precalentamiento.

CE = Carbono equivalente.

% = Porcentaje.

CDEN = Corriente directa electrodo al polo negativo.

CDEP = Corriente directa electrodo al polo positivo.

HB = Dureza Brinell

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como propósito determinar y comparar las características de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la soldadura del hierro dúctil, empleando los procesos SMAW (Shielded Metal Arc Welding) y GMAW (Gas Metal Arc Welding). El estudio se orienta a optimizar las condiciones de soldadura y contribuir a la mejora de las propiedades mecánicas y la fiabilidad de las uniones soldadas. Para ello, se realizaron soldaduras bajo condiciones controladas, evaluando el ancho de la ZAC, el aporte de calor y la distribución de dureza transversal en las zonas del depósito, la ZAC y el metal base. Los resultados obtenidos permitieron establecer comparaciones directas entre ambos procesos, considerando sus diferencias en estabilidad del arco, transferencia térmica y eficiencia del proceso. Los ensayos evidenciaron que el proceso GMAW genera una ZAC más estrecha y homogénea, con menor variación de dureza y menor alteración microestructural del metal base, debido a su menor aporte térmico y mayor control del arco eléctrico. En contraste, el proceso SMAW presentó un mayor aporte de calor, lo que incrementó la extensión de la ZAC y produjo gradientes de dureza más pronunciados entre las distintas zonas analizadas. En conclusión, se determinó que el proceso GMAW ofrece mejores condiciones de soldabilidad para el hierro dúctil, preservando la integridad microestructural y mejorando la uniformidad de las propiedades mecánicas de la unión. Por tanto, se recomienda su aplicación en componentes donde se requiera alta fiabilidad y control térmico en las uniones soldadas.

Palabras clave: Hierro dúctil, Proceso SMAW, Proceso GMAW, Zona Afectada por el Calor (ZAC).

ABSTRACT

This research aims to determine and compare the characteristics of the Heat-Affected Zone (HAZ) in ductile iron welding using the SMAW (Shielded Metal Arc Welding) and GMAW (Gas Metal Arc Welding) processes. The study focuses on optimizing welding conditions and contributing to the improvement of the mechanical properties and reliability of the welded joints. To this end, welds were performed under controlled conditions, evaluating the HAZ width, heat input, and transverse hardness distribution in the weld deposit, HAZ, and base metal. The results obtained allowed for direct comparisons between the two processes, considering their differences in arc stability, heat transfer, and process efficiency. Tests showed that the GMAW process generates a narrower and more homogeneous heat-affected zone (HAZ), with less hardness variation and less microstructural alteration of the base metal, due to its lower heat input and greater control of the electric arc. In contrast, the SMAW process exhibited a higher heat input, which increased the extent of the HAZ and produced more pronounced hardness gradients between the different zones analyzed. In conclusion, it was determined that the GMAW process offers better weldability conditions for ductile iron, preserving microstructural integrity and improving the uniformity of the joint's mechanical properties. Therefore, its application is recommended for components where high reliability and thermal control are required in the welded joints.

Keywords: Ductile iron, SMAW process, GMAW process, Heat-affected zone (HAZ).

INTRODUCCIÓN

El hierro fundido nodular, también conocido como hierro dúctil o esferoidal, es un material de gran importancia en la industria moderna debido a su excelente combinación de resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad, propiedades que lo hacen particularmente adecuado para aplicaciones en los sectores automotriz, de maquinaria pesada, minería y construcción. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la soldabilidad de este material presenta desafíos significativos, principalmente relacionados con la formación de la Zona Afectada por el Calor (ZAC), donde los ciclos térmicos impuestos por el proceso de soldadura pueden inducir transformaciones microestructurales no deseadas que afectan negativamente las propiedades mecánicas de la unión.

Los procesos de soldadura por arco metálico protegido (SMAW) y por arco metálico con gas (GMAW) son dos de los métodos más utilizados para la unión de hierro fundido nodular. Cada uno de estos procesos presenta características particulares en términos de estabilidad del arco, eficiencia térmica, modo de transferencia de metal y control del aporte de calor, factores que determinan en gran medida la extensión y las características de la ZAC. La comprensión de cómo estos procesos afectan la ZAC es fundamental para establecer procedimientos de soldadura que minimicen los efectos adversos y garanticen la integridad de las uniones.

La presente investigación se enfoca en la determinación y comparación de las características de la ZAC generada por los procesos SMAW y GMAW en la soldadura del hierro dúctil. Para ello, se desarrolló un diseño experimental que incluyó la preparación de probetas de hierro fundido nodular ASTM A536 grado 60-40-18, la soldadura bajo condiciones controladas con parámetros definidos, y la caracterización de las uniones mediante inspección visual, ensayos por partículas magnéticas y mediciones de dureza Rockwell B (HRB).

El documento se estructura en seis capítulos. El Capítulo I presenta los fundamentos del problema de investigación, incluyendo el planteamiento, justificación, objetivos e hipótesis. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, abordando los fundamentos metalúrgicos del hierro fundido, los procesos de soldadura SMAW y GMAW, y los conceptos relacionados con la ZAC. El Capítulo III describe las hipótesis y variables de investigación. El Capítulo IV detalla la metodología experimental empleada. El Capítulo V presenta los resultados obtenidos, y el Capítulo VI ofrece la discusión de los mismos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

El hierro fundido nodular, también conocido como hierro dúctil o esferoidal, constituye uno de los materiales ferrosos de mayor relevancia en la industria moderna debido a su excepcional combinación de propiedades mecánicas. Según la norma ASTM A536, este material presenta una resistencia a la tracción que oscila entre 414 y 890 MPa, una elongación del 3% al 40% y una tenacidad de aproximadamente 120 $MPa \cdot m^{1/2}$, dependiendo del grado específico (ASTM International, 2021). Estas características lo hacen particularmente adecuado para aplicaciones críticas en los sectores automotriz (bloques de motor, cigüeñales, cabezas de cilindro), minero (carcasas de bombas, componentes de chancadoras) y de construcción (bridas, accesorios para tuberías) (Agüera, 2008; Kalpakjian & Schmind, 2008).

A pesar de sus ventajas, la soldabilidad del hierro dúctil presenta desafíos técnicos significativos que han sido ampliamente documentados en la literatura especializada. El principal problema radica en la formación de la Zona Afectada por el Calor (ZAC), región del material base que experimenta ciclos térmicos sin alcanzar la fusión, pero que sufre transformaciones microestructurales irreversibles. Durante el proceso de soldadura, la ZAC del hierro fundido nodular puede experimentar la formación de estructuras martensíticas y la precipitación de carburos (Fe_3C), fenómenos que incrementan drásticamente la dureza (hasta 1000 HV) y reducen la ductilidad, favoreciendo la fisuración en frío y la falla prematura de los componentes (Rodríguez, 2013; Fosca, 2005).

Los procesos de soldadura por arco metálico protegido (SMAW) y por arco metálico con gas (GMAW) son dos de los métodos más utilizados para la unión y reparación de componentes

de hierro dúctil. El proceso SMAW, ampliamente difundido por su versatilidad y bajo costo de equipo, utiliza electrodos revestidos que proporcionan protección del arco y metal de aporte. Por su parte, el proceso GMAW, más tecnificado, emplea un electrodo continúo alimentado mecánicamente y un gas de protección externo, lo que permite un mayor control del aporte de calor y una mayor productividad (American Welding Society, 1996; Jeffus, 2009).

Sin embargo, cada uno de estos procesos genera diferentes niveles de entrada de calor y produce variaciones en la ZAC, lo que resulta en comportamientos distintos en términos de formación de grietas, deformaciones y otras imperfecciones. La comprensión de cómo estos procesos afectan la ZAC del hierro dúctil es fundamental para establecer procedimientos de soldadura que minimicen los efectos adversos y garanticen la integridad de las uniones. La falta de un conocimiento profundo en esta área puede llevar a fallas en componentes críticos, costosos tiempos de inactividad y riesgos para la seguridad operacional (Loachamín, 2018; Zúñiga, 2015).

Por lo tanto, el presente estudio se centra en la determinación y comparación de las características de la ZAC generada por los procesos SMAW y GMAW en la soldadura del hierro dúctil, buscando identificar las condiciones óptimas de soldadura que minimicen los efectos adversos en la ZAC, mejorando así la calidad y fiabilidad de las uniones soldadas.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cuáles son las características de la Zona Afectada por el Calor en la soldadura del hierro dúctil realizadas mediante los procesos SMAW y GMAW, y cómo su comparación permite optimizar las condiciones de soldadura para mejorar las propiedades mecánicas y la fiabilidad de las uniones soldadas?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el ancho de la Zona Afectada por el Calor producido por los procesos de soldadura SMAW y GMAW en probetas de hierro dúctil bajo condiciones de soldabilidad controladas?
- ¿De qué manera influye el aporte de calor en la extensión y las características de la ZAC en ambos procesos de soldadura?
- ¿Cómo varía la dureza transversal desde el depósito hacia el metal base en las zonas afectadas por el calor generadas por los procesos SMAW y GMAW, y qué relación existe entre esta variación y las condiciones térmicas de cada proceso?

1.3. Justificación

1.3.1. Tecnológica

La soldadura del hierro dúctil constituye un proceso crítico en numerosas industrias, incluyendo la automotriz, la minería, la construcción y la manufactura de maquinaria pesada. La determinación y comparación de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) al utilizar los procesos SMAW y GMAW proporcionará conocimientos técnicos valiosos sobre las mejores prácticas y parámetros de soldadura. Este conocimiento permitirá a los ingenieros y técnicos optimizar los procedimientos de soldadura para mejorar la integridad estructural y la durabilidad de los componentes fabricados. Específicamente, se busca establecer criterios cuantitativos para la selección del proceso más adecuado según la aplicación, considerando variables como el ancho de ZAC (medido en mm), la dureza (en HRB) y la presencia de discontinuidades (fisuras, poros, inclusiones). Estos criterios contribuirán al avance tecnológico en la fabricación y mantenimiento de estructuras de hierro dúctil en el contexto industrial peruano.

1.3.2. Económica

Optimizar los procesos de soldadura SMAW y GMAW para el hierro dúctil tiene un impacto económico significativo. La mejora en la calidad de las uniones soldadas reduce los costos asociados con reparaciones, reemplazos y mantenimiento de estructuras. Además, una mayor fiabilidad de las soldaduras minimiza el riesgo de fallos en el servicio, lo que puede resultar en ahorros sustanciales. Al identificar los parámetros óptimos de soldadura, las industrias pueden reducir el consumo de materiales y energía, aumentando así la eficiencia y reduciendo los costos operativos.

1.3.3. Social

La mejora en los procesos de soldadura del hierro dúctil tiene importantes implicaciones sociales. La fiabilidad y seguridad de las estructuras soldadas son cruciales para la protección de vidas humanas y bienes. Mejorar la calidad de las soldaduras reduce el riesgo de accidentes laborales y fallos catastróficos en infraestructuras críticas, como puentes, edificios y vehículos. En el contexto peruano, donde la minería y la construcción son sectores económicos fundamentales, la formación de soldadores calificados en tecnologías avanzadas (como GMAW) contribuye al desarrollo profesional y la estabilidad laboral. Además, la estandarización de procedimientos de soldadura para el hierro dúctil permite la transferencia de tecnología y conocimientos a las pequeñas y medianas empresas, fortaleciendo el tejido industrial nacional.

1.3.4. Ambiental

Desde una perspectiva ambiental, la optimización de los procesos de soldadura SMAW y GMAW para el hierro dúctil puede contribuir a una mayor sostenibilidad. La reducción del consumo de energía y materiales durante el proceso de soldadura disminuye la huella de carbono asociada con la fabricación y reparación de componentes de hierro dúctil. Específicamente, el

proceso GMAW, al operar con mayor eficiencia térmica (70-85%) en comparación con el SMAW (70-80%), permite una reducción aproximada del 5-10% en el consumo energético por unidad de longitud soldada (García, 2010). Además, la minimización de defectos en las soldaduras reduce la necesidad de retrabajos y desechos de materiales, promoviendo un uso más eficiente de los recursos. Al mejorar la durabilidad y longevidad de las estructuras soldadas, se reduce también la necesidad de nuevas construcciones, lo que contribuye a la conservación del medio ambiente y a la reducción de emisiones de CO_2 asociadas a la producción de nuevos componentes.

1.4. Importancia de Trabajo de Investigación

El trabajo de investigación sobre la Zona Afectada por el Calor en la soldabilidad del hierro dúctil utilizando los procesos SMAW y GMAW es fundamental para avanzar en la calidad, eficiencia y conocimiento técnico en el campo de la soldadura. Sus hallazgos tienen el potencial de impactar significativamente en diversas industrias y aplicaciones, promoviendo mejores prácticas y fomentando la innovación.

En el contexto académico, esta investigación contribuye al conocimiento de la metalurgia de la soldadura del hierro fundido nodular, un área con relativamente poca documentación en comparación con los aceros al carbono. Los resultados obtenidos permitirán establecer correlaciones entre parámetros de soldadura (corriente, voltaje, velocidad) y características de la ZAC (ancho, dureza, microestructura), proporcionando una base científica para la optimización de procedimientos.

En el contexto industrial, la investigación proporciona criterios técnicos objetivos para la selección del proceso de soldadura más adecuado según la aplicación, contribuyendo directamente a la competitividad y sostenibilidad del sector industrial nacional. La implementación de los

hallazgos permitirá reducir costos de mantenimiento, aumentar la vida útil de los componentes y mejorar la seguridad operacional.

1.5. Objetivos de Investigación

1.5.1. Objetivo General

Determinar y comparar las características de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la soldadura del hierro dúctil utilizando los procesos SMAW y GMAW, con el propósito de optimizar las condiciones de soldadura y contribuir a la mejora de las propiedades mecánicas y la fiabilidad de las uniones soldadas.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar y comparar el ancho de la Zona Afectada por el Calor generada por los procesos de soldadura SMAW y GMAW en probetas de hierro dúctil, bajo condiciones de soldabilidad controladas.
- Evaluar la influencia del aporte de calor sobre la extensión y características de la Zona Afectada por el Calor en ambos procesos de soldadura.
- Cuantificar la variación de dureza transversal a lo largo del depósito, la ZAC y el metal base, con el fin de establecer la relación entre la distribución de dureza y las condiciones térmicas generadas por los procesos SMAW y GMAW.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Hariprasath et al. (2022) analizaron la influencia de los procesos de soldadura SMAW y GMAW en las propiedades mecánicas y las características metalúrgicas del acero de grado DMR249A soldado por fusión. Los autores evaluaron la resistencia a la tracción, resistencia al impacto y microdureza, correlacionándolas con las microestructuras resultantes. Los valores máximos registrados de resistencia a la tracción transversal en las uniones SMAW y GMAW fueron de 558 MPa y 578 MPa, respectivamente. La microdureza fue menor en la zona subcrítica afectada por el calor que en otras regiones. La microestructura de la zona de soldadura presentó estructuras de grano fino, alargado y columnar. Los autores concluyeron que las uniones GMAW presentaban propiedades ligeramente mejores que las uniones SMAW, aunque la mayoría de los fallos de soldadura se observaron en la zona subcrítica afectada por el calor, debido a la deformación del grano y al consiguiente ablandamiento de la pieza soldada.

Omiogbemi et al. (2025) evaluaron el impacto de la soldadura SMAW y GMAW en acero de alto contenido en carbono (HCS) de tipo AISI 1080, con un contenido de carbono del 1.33%. Los autores encontraron que el SMAW demostró un rendimiento superior, alcanzando la mayor resistencia a la tracción (495 MPa) y el mayor alargamiento (15%) a 140 A, mientras que el GMAW a 120 A mostró una menor resistencia (424 MPa) y un menor alargamiento (10.5%). El aumento de la intensidad en el GMAW (140 A) dio lugar a un grano más grueso, una resistencia reducida (317 MPa) y una elongación menor (7.5%). La dureza en todas las zonas de soldadura aumentó debido a la formación de martensita. El análisis microestructural reveló martensita

laminar en las muestras de SMAW y ferrita bainítica en las de GMAW. El SMAW mostró una excelente resistencia a la corrosión (0.008 mm/año) en comparación con el GMAW (8.24 mm/año), lo que lo hace más adecuado para aplicaciones industriales que requieren alta resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

Rahman (2026) analizó de forma sistemática la evolución microestructural y el comportamiento mecánico del acero de bajo carbono AISI 1010 soldado mediante GMAW. Utilizando un enfoque de caracterización integrado y multitécnico, el autor cuantificó el refinamiento del grano en las zonas de soldadura mediante microscopía óptica y análisis de imágenes. El mapeo de dureza estableció una relación de Hall-Petch entre la microestructura y la resistencia, mientras que los ensayos de tracción, flexión e impacto Charpy correlacionaron el comportamiento mecánico con las características metalúrgicas locales. La microscopía electrónica de barrido (SEM) proporcionó una validación fractográfica de los mecanismos de rotura. Cuantitativamente, la zona de soldadura (WZ) presentó el tamaño medio de grano más fino (0.58 μm^2) y la mayor dureza (65.7 HRB), mientras que el metal base (BM) y la ZAC mostraron granos más gruesos (1.39 μm^2 y 0.78 μm^2, respectivamente) con valores de dureza ligeramente inferiores (≈65 HRB). El equivalente de carbono calculado (CE = 0.371) confirmó una buena soldabilidad inherente. El autor concluyó que la combinación de microscopía cuantitativa, ensayos mecánicos y análisis fractográfico proporciona una evaluación más fiable de la calidad y el rendimiento de la soldadura.

Zuñiga (2015), en su trabajo de tesis realizado en la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, analizó la temperatura de precalentamiento adecuada para realizar uniones soldadas en tuberías de agua de hierro nodular mediante soldadura SMAW con electrodo revestido AWS ENi-CI. Utilizando probetas de tubería de hierro nodular grado 60-42-10 (ASTM A536), precalentadas

a 200°C, 250°C, 300°C y 350°C con dos tipos de juntas (en V de 60° y en V de 30°), el autor sometió las juntas soldadas a ensayos de tracción, flexión, impacto, dureza y análisis metalográfico. Los resultados mostraron que, a la temperatura de 300°C, con el tipo de junta en V de 60°, se obtuvieron las mejores propiedades mecánicas. Con los datos experimentales, el autor procedió a realizar un manual de soldadura SMAW para tuberías de hierro fundido nodular.

Loachamin (2018) en su trabajo de investigación en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, comparó la soldabilidad del hierro nodular con el consumible AWS E 312-16 y AWS E NiFe-Cl mediante el proceso SMAW. Utilizando la norma AWS D.11.2 para determinar la temperatura de precalentamiento, el autor realizó ensayos destructivos y no destructivos para analizar y comparar las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las juntas soldadas. Los resultados de los ensayos no destructivos determinaron que la probeta soldada con electrodo AWS E 312-16 presentaba una fisura transversal en la raíz del cordón de soldadura, mientras que la junta unida con electrodo AWS E NiFe-Cl no presentó defecto alguno. El análisis metalográfico reveló la presencia de fases no deseadas en la junta soldada con material de aporte para acero inoxidable, como la fase sigma presente en la zona de la soldadura y fundición blanca de manera parcial en la ZAC. El autor concluyó que el electrodo AWS E 312-16 no es una buena alternativa para soldar hierro fundido nodular debido a la presencia de defectos lineales.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Zegarra Ramírez (2023) realizó una investigación con el propósito de comparar los valores de las propiedades mecánicas de los cordones de soldadura obtenidos al soldar utilizando combinaciones de materiales de aporte (electrodos), frente a los valores con los que se diseña o califica los WPS. La experiencia se realizó bajo un enfoque cuantitativo de nivel explicativo con un diseño experimental basado en ensayo de laboratorio y alcance correlacional. Para los ensayos,

se prepararon 8 cupones elaborados utilizando electrodos determinados antes de la fabricación, teniendo como variable independiente los cordones y juntas soldadas de cada cupón, y como variables dependientes las propiedades mecánicas y químicas. Luego de la tabulación de datos obtenidos de las normas AWS D 1.1 y AWS A 5.1 y AWS 5.5, y de ser analizados estadísticamente con la prueba de Pearson, el autor concluyó que los valores de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente no son iguales a los usados generalmente en los cálculos de diseño.

Delgado Collantes y Vargas Julon (2025) investigaron cómo la velocidad de enfriamiento influye sobre el procedimiento de unión por "Arco con Electrodo Revestido" (SMAW), afectando la calidad y la integridad de las soldaduras de acero AISI 4140. La investigación fue exploratoria, descriptiva, correlacional y explicativa. Se emplearon cuatro probetas del acero especificado, cada una sometida a soldadura con parámetros o variables de corriente eléctrica y nivel de voltaje, manteniéndose el mismo ritmo de soldeo. Se calcularon los aportes de calor suministrado a cada probeta para luego realizar la verificación de calidad mediante revisión visual, tintes y prueba de doblado. Los autores concluyeron que un aumento en la rapidez de solidificación durante el proceso de unión SMAW sobre el AISI 4140 aumenta la probabilidad de grietas en las juntas soldadas. Este comportamiento se reflejó en las probetas 1 y 2, con velocidades de enfriamiento de 6.4°C/s y 5.75°C/s, respectivamente. La causa de esta tendencia está asociada a la composición del AISI 4140, un acero aleado con un nivel intermedio de carbono vulnerable a la formación de martensita al enfriarse rápidamente.

Vera (2019) en su trabajo de investigación, se planteó mejorar el efecto de la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido para optimizar las propiedades mecánicas de las zapatas de una máquina Bulldozer CAT D6T. Usando una metodología bibliográfico-experimental, el autor realizó un análisis de composición química para determinar el porcentaje de cada elemento,

ensayos no destructivos para inspeccionar la calidad del cordón de soldadura y, por último, ensayo destructivo observando el comportamiento y la resistencia que ofrece el material hasta la ruptura. El trabajo mejoró la seguridad y productividad de la pieza, teniendo un registro de calificación en cada procedimiento obtenido.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Hierro fundido

El hierro fundido es una aleación de hierro, carbono y silicio, clasificándose históricamente por el color de la superficie de rotura. Por un lado, el hierro blanco presenta una superficie de fractura blanca y cristalina, la cual se produce a lo largo de las placas de carburo de hierro, siendo este el resultado de una solidificación metaestable (Fe_3C eutéctica). Por otro lado, el hierro gris presenta una superficie de fractura gris, pues la fractura ocurre a lo largo de las láminas de grafito, como resultado de una solidificación estable (ASTM International, 1993).

Otro método de clasificación del hierro se enfoca en la metalografía basada en la microestructura de la disposición del carbono y la matriz. Para la disposición del grafito se tiene una distribución laminar, nodular o de grafito compactado; mientras que, para la matriz de la microestructura, la distribución puede ser ferrítica, perlítica, austenítica, martensítica o bainítica.

Existen gran variedad de hierros fundidos con diferentes propiedades de fluidez, resistencia mecánica, maquinabilidad, dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, conductividad térmica y capacidad de amortiguamiento. En la Tabla 1, se muestra un cuadro de comparación de varios hierros fundidos y una fundición de acero de 0.3% C (Jesper, 2004).

Tabla 1

Comparación de características de varios hierros fundidos respecto a la fundición de acero de 0.3% C

Característica	Hierro Fundido	Acero
Contenido de carbono	2% a 4%	Menos de 2%
Punto de fusión	2200 °F	2500 - 2800 °F
Fortaleza	Más fuerza compresiva	Más resistencia a la tracción
Colabilidad	Fácil de colar debido a la baja contracción y buena fluidez	Menos fácil de moldear que el hierro fundido ya que tiene baja fluidez y más contracción
Resistencia a la corrosión	De moderada a baja	Mayor resistencia a la corrosión
Resistencia al impacto	Baja	Alta
Costo	Más barato debido al menor costo de material, mano de obra y energía	Más caro que el hierro fundido
Aplicaciones	Accesorios para tuberías, arandelas, equipos agrícolas, piezas de máquinas, hardware para minería, herramientas manuales y accesorios eléctricos	Infraestructura, vehículos, electrodomésticos, cohetes, herramientas y armas

Nota. Elaboración propia a partir de Kalpakjian y Schmind (2008).

2.2.1.1. Características principales

Según Shackelford (2005), el hierro fundido presentas las siguientes propiedades:

- Debido al alto contenido de carbono (2.5-4%), este material es muy frágil y con baja ductilidad, por lo que no se puede laminar, estirar ni trabajar a temperatura ambiente.
- Son excelentes para ser moldeados debido a que las temperaturas de fusión y viscosidad de la fase líquida son relativamente bajas, presentando una contracción moderada en la solidificación y el enfriamiento, lo que permite obtener piezas con formas complejas.
- De manera general, las propiedades mecánicas del hierro fundido son inferiores en comparación con los aceros, y su costo es relativamente económico.
- Si se controla de forma adecuada la fundición y se aplica un tratamiento térmico adecuado, las propiedades del hierro fundido pueden mejorarse de forma satisfactoria.

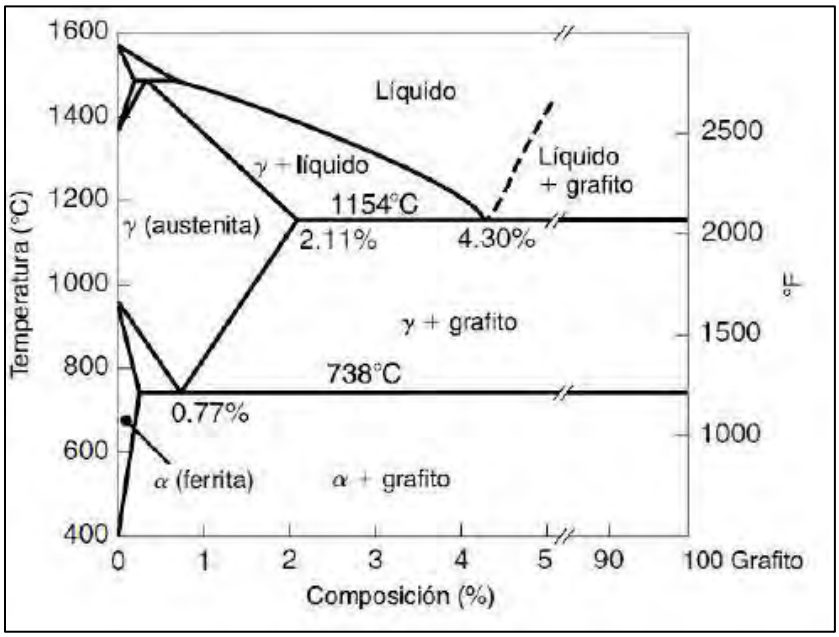
2.2.1.2. Diagrama Hierro - Grafito

En la Figura 1 se muestra el diagrama de equilibrio de fases hierro-grafito, el cual es usado para determinar la composición de los elementos del hierro fundido en función de la temperatura. El extremo derecho del diagrama representa el 100% de carbono (grafito puro). La temperatura eutéctica es alrededor de 1154 °C, por lo que estas fundiciones son totalmente líquidas a temperaturas menores que las requeridas para los aceros líquidos.

Por tanto, el hierro con un alto contenido de carbono se puede fundir a temperaturas menores que la de los aceros (Kalpakjian y Schmind, 2008). La característica más importante de este diagrama estable es que su principal constituyente es el grafito, a diferencia del diagrama metaestable hierro-carbono que presenta cementita (Barreiro, 2009).

Figura 1

Diagrama Hierro-grafito



Fuente. Kalpakjian y Schmind (2008)

2.2.1.3. Clasificación de Hierro Fundido

A. Hierro fundido gris

En el hierro fundido gris, el grafito se presenta en forma de hojuelas. Cuando esta fundición se rompe, la trayectoria de la fractura se da a lo largo de las hojuelas de grafito, y la superficie de fractura presenta una apariencia color gris. Estas fundiciones tienen una ductilidad despreciable, baja resistencia a la tensión, alta resistencia a la compresión y alta resistencia al desgaste. La presencia de las hojuelas de grafito confiere a este material la capacidad para amortiguar vibraciones y, por tanto, la capacidad para disipar energía. Esta capacidad hace que el hierro fundido gris sea un material adecuado para la construcción de bases para máquinas herramientas y estructuras para maquinaria (Kalpakjian y Schmind, 2008). Los contenidos de carbono varían entre 2.5 y 4%, mientras que el silicio se encuentra entre 1 y 3% (Callister, 2005).

Figura 2

Hierro fundido gris con aumento



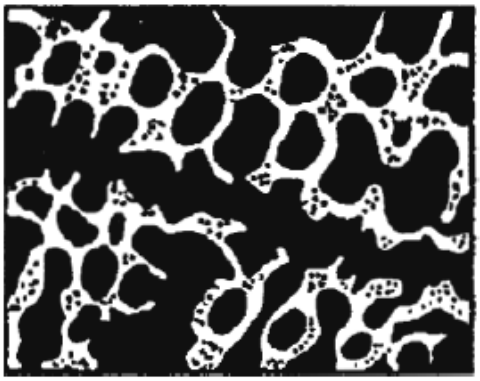
Fuente. Kalpakjian y Schmind, (2008).

B. Hierro fundido blanco

Son fundiciones bajas en carbono y silicio, generalmente este último contiene menos del 1%; la mayor parte del carbono se encuentra como cementita en lugar de grafito. La superficie de la fractura de esta aleación tiene una tonalidad cristalina blanca. Estas fundiciones, debido a la presencia de grandes cantidades de cementita, poseen gran dureza, son extremadamente frágiles, difíciles de maquinar, tienen alta resistencia al desgaste y ductilidad nula (Callister, 2005). Según Kalpakjian y Schmind (2008), el hierro fundido blanco se obtiene mediante el enfriamiento rápido de hierro gris o ajustando la composición al mantener bajo el contenido de carbono y silicio.

Figura 3

Hierro fundido blanco.



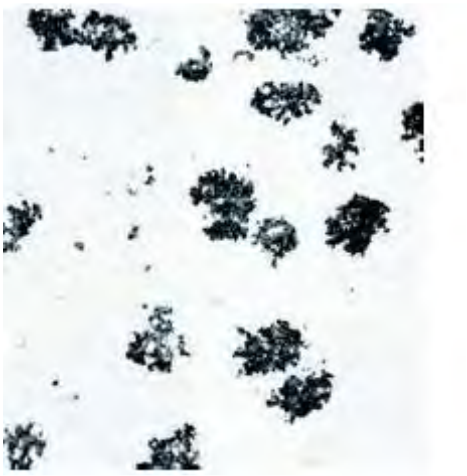
Fuente. Askeland (2004).

C. Hierro fundido maleable

El hierro fundido maleable se obtiene a partir de un tratamiento térmico de recocido del hierro fundido blanco en una atmósfera de monóxido y dióxido de carbono, entre 800 °C y 900 °C, por varias horas dependiendo el tamaño de la pieza. Durante este proceso, la cementita se descompone en hierro y grafito. El grafito se presenta como racimos o rosetas en una matriz ferrítica o perlítica, por lo que su estructura es similar al hierro nodular; esta estructura promueve la ductilidad y resistencia al impacto, de ahí se deriva el término "maleable" (Kalpakjian y Schmind, 2008). Los productos comunes hechos de hierro fundido maleable incluyen ajustes y bisagras para tubos, ciertos componentes de máquina y piezas de equipo ferroviario (Groover, 2007).

Figura 4

Hierro fundido maleable con aumento de 100x.



Fuente. Kalpakjian y Schmind, 2008

D. Hierro fundido nodular

El hierro fundido dúctil se diferencia del hierro fundido laminar por presentar una morfología de grafito en forma de nódulos esferoidales. De este modo, el hierro fundido dúctil presenta una mayor resistencia mecánica y una buena ductilidad; asimismo, se pueden mejorar sus propiedades mecánicas con un tratamiento térmico.

La resistencia a la tracción del hierro fundido dúctil, según la norma ASTM A536 (ASTM International, 2021), se encuentra entre 414 MPa y 890 MPa. Las aplicaciones para este hierro se muestran en la Tabla 2, donde se detallan en diversas normas y aplicaciones típicas, y en la Tabla 3 se muestra la composición química de los diferentes grados.

Tabla 2

Propiedades mecánicas y típicas aplicaciones de fundición de hierro nodular

Grado	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HB)	Aplicaciones típicas
60-40-18	414	276	18	170-220	Piezas con alta ductilidad
65-45-12	448	310	12	180-230	Componentes estructurales
80-55-06	552	379	6	200-260	Piezas de maquinaria
100-70-03	689	483	3	240-300	Componentes de alta resistencia

Fuente. ASTM International (2021).

Tabla 3

Composición química de los diferentes grados de hierro nodular

Elemento (% en peso)	ASTM A536 60-40-18	ASTM A536 65-45-12	ASTM A536 80-55-06	ASTM A536 100-70-03
Carbono (C)	3.2 – 3.9	3.2 – 3.8	3.2 – 3.6	3.2 – 3.6
Silicio (Si)	2.2 – 2.8	2.2 – 2.8	2.3 – 2.9	2.3 – 2.9
Manganeso (Mn)	0.1 – 0.3	0.1 – 0.3	0.1 – 0.3	0.1 – 0.3
Fósforo (P)	≤ 0.08	≤ 0.08	≤ 0.08	≤ 0.08
Azufre (S)	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.02
Magnesio (Mg)	0.03 – 0.06	0.03 – 0.06	0.03 – 0.06	0.03 – 0.06
Hierro (Fe)	Balance	Balance	Balance	Balance
Aleantes opcionales	–	–	Cu (0.3–1.0), Ni (0.5–2.0)	Ni (1–3), Mo (0.1–0.3)

Fuente. ASTM International (2021).

Relación microestructura–propiedades, se detalla como sigue:

- 60-40-18 → matriz ferrítica (alta ductilidad, menor resistencia).
- 65-45-12 → matriz ferrítico–perlítica.
- 80-55-06 → mayor proporción perlítica, más resistencia, pero menos ductilidad.

- 100-70-03 → matriz casi totalmente perlítica, alta resistencia, pero baja elongación.

Los hierros fundidos dúctiles son producidos con un porcentaje de carbono de 3,0% a 4,0% y un rango de 1,8%-2,8% de silicio. Asimismo, presenta otros aleantes que ayudan a generar los nódulos, tales como magnesio (Mg), calcio (Ca), lantano (La), tierras raras y cerio (Ce).

La microestructura de los hierros fundidos dúctiles presenta una distribución de grafito en forma de esferas (nódulos), clasificándose en base a su nodularidad (porcentaje de nódulos en la microestructura) (C5.10/C5.10M:2003). En los hierros fundidos dúctiles, se requiere una nodularidad del 80 % a 100% (figura 4) y la no nodularidad afecta a la resistencia mecánica del hierro fundido. Asimismo, se puede realizar un conteo de los nódulos por milímetro cuadrado (ver figura 5).

2.2.1.4. Microconstituyentes del Hierro Fundido

Según Barreiro (2009), los principales constituyentes que se presentan en la microestructura del hierro fundido son la ferrita, el cementita, la perlita, el grafito y la steadita. Suele presentarse también la sorbita y en ocasiones, aunque menos frecuentes, también aparecen la bainita y la martensita (Agüera, 2008).

Ferrita. La ferrita es hierro alfa, dicho de otra manera, es hierro casi puro, que puede contener en solución pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas, es el más blando de todos los constituyentes, muy dúctil, magnética y de pequeña fuerza coercitiva. La ferrita de los aceros se diferencia de las fundiciones en que ésta suele contener en disolución cantidades muy importantes de silicio que elevan su dureza y resistencia (Agüera, 2008).

Cementita. La cementita es carburo de hierro (Fe_3C), contiene 6.67% de carbono y 93.33% de hierro. Es el constituyente más duro y frágil, de baja resistencia a la tracción, pero de alta resistencia compresiva; su estructura cristalina es ortorrómbica (Agüera, 2008).

Perlita. Es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita, es decir, es una mezcla muy fina en donde ambos elementos que la componen aparecen formando láminas paralelas y alternadas. Debido a la presencia de silicio, el contenido en carbono de la perlita de las fundiciones es inferior al de los aceros (Agüera, 2008).

Grafito. El grafito es una forma elemental del carbono, es blando, untuoso y de color gris oscuro. Se presenta en estado libre en algunas clases de fundiciones, ejerciendo una influencia muy importante en sus propiedades y características, que dependen principalmente de la forma del grafito, de su tamaño, cantidad y de su distribución. El grafito mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión, pero a la vez reduce la dureza, la resistencia y el módulo de elasticidad (Agüera, 2008).

Steadita. Es un compuesto de naturaleza eutéctica, duro, frágil y de bajo punto de fusión que aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo. La steadita tiene un 10% de fósforo y su peso específico es próximo al del hierro (Agüera, 2008).

Sorbita. Es un agregado fino de cementita y ferrita. Se obtiene por enfriamiento de la austenita a velocidad inferior a la crítica de temple (Agüera, 2008).

Ledeburita. Es el constituyente eutéctico que se forma en el enfriamiento de las fundiciones, en el momento en que termina la solidificación. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita saturada. Este constituyente no existe a temperatura ambiente en las fundiciones, debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita (Agüera, 2008).

2.2.1.5. Principales Usos del Hierro Fundido

El hierro fundido es usado para la fabricación de varios elementos, entre los principales tenemos:

- Tapas de alcantarillado

- Válvulas de aire y válvulas de compuerta.
- Hidrantes
- Rejillas para sumideros.
- Piezas para tractores y herramientas agrícolas.
- Blocks de motores, cigüeñales, pistones y cabezas de cilindros para automóviles (Agüera, 2008).

2.2.2. Proceso de Soldadura GMAW

El proceso de soldadura de arco con protección de gas (GMAW por sus siglas en inglés) es un proceso cuyo principio de operación se basa en la alimentación automática de un electrodo continuo, consumible, el cual genera un arco eléctrico con la pieza de trabajo protegido mediante un gas de procedencia externa. Los únicos controles manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad y dirección del desplazamiento, así como también el posicionamiento de la pistola (American Welding Society, 2016).

Los componentes básicos del equipo son la unidad de pistola para soldar, cables, la unidad de alimentación del electrodo o alambre, la fuente de potencia y el sistema de suministro del gas protector. Este proceso puede ser usado para soldar la mayoría de los metales comerciales, incluyendo aceros al carbono, inoxidables, aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, hierro, titanio y zirconio (American Welding Society, 2016).

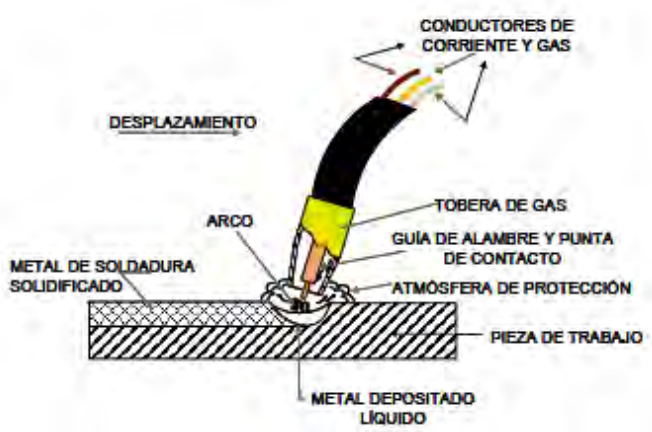
2.2.2.1. Principios Básicos de Operación

En el proceso GMAW, el calor del arco generado entre el electrodo consumible y la pieza es utilizado para fundir las superficies del metal base y el extremo del electrodo. El metal fundido del electrodo es transferido hacia la pieza a través del arco, donde se convierte en metal de soldadura depositado. La protección de gas, que puede ser gas inerte, activo o una mezcla de

ambos, envuelve el área del arco para protegerlo de contaminantes de la atmósfera. La soldadura puede ser aplicada en forma semiautomática usando una pistola sostenida manualmente, en la cual el electrodo es alimentado por una bobina, o en forma automática que incluye equipos automatizados o robots (American Welding Society, 2016).

Figura 5

Proceso de soldadura GMAW



Fuente. American Welding Society (2016).

2.2.2.2. Variables del Proceso

Las siguientes son algunas de las variables que afectan la penetración, la geometría y en general la calidad de la soldadura (American Welding Society, 2016):

1. Corriente de soldadura
2. Polaridad
3. Voltaje del arco
4. Velocidad de avance
5. Extensión del electrodo
6. Orientación del electrodo (ángulo de desplazamiento)

7. Posición de la unión que se va a soldar
8. Diámetro del electrodo
9. Composición y tasa de flujo del gas protector

El conocimiento y control de estas variables es indispensable para producir soldaduras de buena calidad. Estas variables no son del todo independientes, ya que cuando se modifica una, casi siempre modifica una o más de las otras para obtener los resultados que se buscan (American Welding Society, 2016).

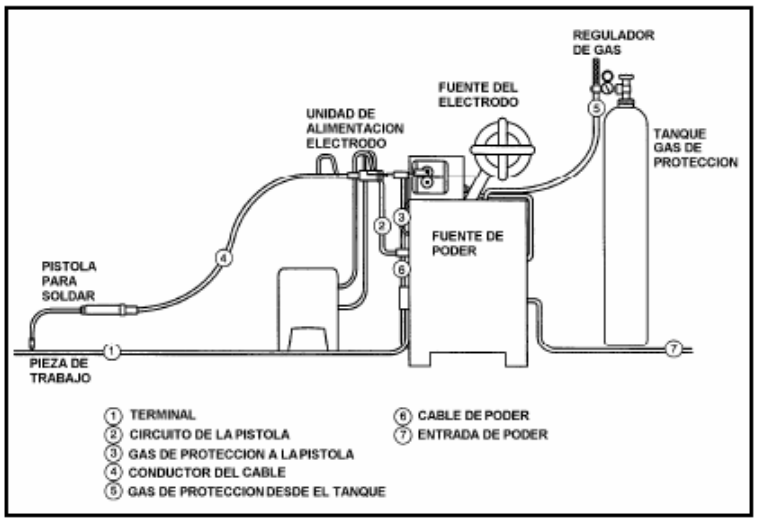
2.2.2.3. Equipo

El equipo básico para cualquier instalación del proceso de soldadura GMAW, figura 7 consiste en lo siguiente:

a. Pistola (enfriada por aire ó agua)
b. Unidad de alimentación del electrodo
c. Control de soldadura
d. Fuente de potencia para soldadura
e. Suministro regulado de gas protector
f. Suministro de electrodo
g. Cables y mangueras para interconexión
h. Sistema de recirculación de agua (para pistolas enfriadas por agua).

Figura 6

Equipo del proceso GMAW



Fuente. American Welding Society (2016).

2.2.2.4. Mecanismos de transferencia de metal

Los mecanismos básicos empleados para transferir metal del electrodo a la pieza de trabajo son:

a. Transferencia por cortocircuito

b. Transferencia globular

c. Transferencia por aspersión

d. Transferencia pulsada

El tipo de transferencia está determinada por varios factores, entre los más importantes están los siguientes:

1. Magnitud y tipo de la corriente de soldadura.
2. Diámetro del electrodo
3. Composición del electrodo
4. Extensión del electrodo

5. Gas protector

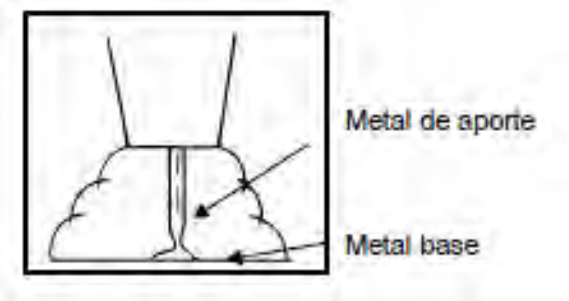
A. Transferencia por corto circuito

La característica principal de este tipo de transferencia consiste en que el metal de aporte haga contacto con el metal fundido generándose un corto circuito como se muestra en la figura 8, después se produce un estrangulamiento y el desprendimiento de la gota de metal.

Este tipo de transferencia puede emplear una mezcla de gas protector compuesta por argón y CO2 o bien 100% CO2, generalmente se emplean rangos bajos de amperaje y alambre de diámetro pequeño, como los rangos de amperaje son bajos este tipo de transferencia se usa para unir láminas o elementos delgados, también como el charco de metal fundido se solidifica rápidamente puede emplearse en todas las posiciones: plano, horizontal, vertical y sobre cabeza (AWS A5.9/A5.9M, 2022).

Figura 7

Transferencia por corto circuito



Nota. Obtenido de AWS A5.9/A5.9M, 2022.

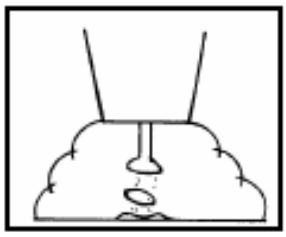
B. Transferencia globular

La transferencia globular ocurre a más altos rangos de amperaje que el cortocircuito, en este tipo el metal de aporte fundido, forma una bola de aproximadamente dos veces el diámetro del electrodo que al hacer contacto con la superficie del metal líquido se funde y se transfiere al charco de metal, ver figura 9.

Este tipo de transferencia no es común usarlo debido a que produce mucho chisporroteo y como depende de la fuerza de la gravedad no es posible emplearlo en posición sobre cabeza.

Figura 8

Transferencia globular



Nota. Obtenido de AWS A5.9/A5.9M, 2022.

C. Transferencia por rociado

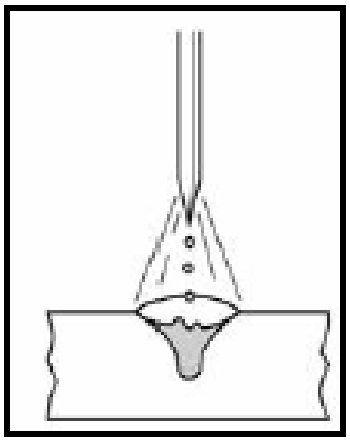
La transferencia por rociado (figura 11) ocurre a más altos amperajes que los presentados en la transferencia globular, con diámetros grandes de alambre y una mezcla de gas rica en argón, el proceso genera gran cantidad de calor y por ello se prefiere no emplearlo en láminas o elementos delgados, la transferencia por rociado se limita a soldaduras de filete, ranuras de unión en posición plana y filetes en posición horizontal debido a lo fluido del metal fundido.

D. Transferencia por rociado axial.

Es un modo de transferencia muy estable, libre de chisporroteo, que se alcanza cuando se utiliza una mezcla de gas rica en argón. Este tipo de transferencia requiere el uso de corriente directa electrodo al positivo y un nivel de corriente por arriba del valor crítico llamado "corriente de transición". Debajo de este nivel de corriente, ocurre la transferencia globular con una relación de gotas por segundo baja. Arriba de la corriente de transición, la transferencia ocurre en forma de pequeñas gotas que se desprenden en una relación de cientos por segundo y son aceleradas axialmente en forma transversal al arco (figura 9).

Figura 9

Transferencia por rociado axial



Nota. Obtenido de AWS A5.9/A5.9M, 2022.

La corriente de transición depende de la tensión superficial del metal líquido, es inversamente proporcional al diámetro del electrodo, en un grado más pequeño a la extensión del electrodo, y varía de acuerdo a la temperatura de fusión del metal de aporte y a la composición del gas de protección. En la tabla 4 se indica la corriente de transición típica para algunos materiales.

Tabla 4

Corriente de transición globular-rociado para diferentes tipos de electrodos

Tipo de electrodo	Diámetro (pulg)	Diámetro (mm)	Gas de protección	Corriente de transición (A)
Acero Inoxidable	0.035	0.9	99% Ar + 1% O_2	150
Acero Inoxidable	0.045	1.2	99% Ar + 1% O_2	195
Acero Inoxidable	0.062	1.6	99% Ar + 1% O_2	265
Acero Inoxidable	0.035	0.9	Ar + Helio + CO_2	160
Acero Inoxidable	0.045	1.2	Ar + Helio + CO_2	205
Acero Inoxidable	0.062	1.6	Ar + Helio + CO_2	280

Acero Inoxidable	0.035	0.9	$Ar + H_2 + CO_2$	145
Acero Inoxidable	0.045	1.2	$Ar + H_2 + CO_2$	185
Acero Inoxidable	0.062	1.6	$Ar + H_2 + CO_2$	255

Fuente. AWS A5.9M (2006).

E. Transferencia por rociado pulsado

Este tipo de transferencia es una variación de la transferencia por rociado, pero con arco "pulsado", es decir, la fuente de poder pulsa o varía el amperaje en un rango de corriente varios cientos de veces por segundo. A niveles de corriente altos se forma una pequeña gota de metal fundido que se transfiere a través del arco al charco. Este tipo de transferencia emplea bajos amperajes en comparación con el de rociado convencional, lo cual hace que prácticamente se emplee en cualquier posición y espesores de material.

El proceso GMAW generalmente emplea corriente directa y polaridad invertida (electrodo positivo) debido a que se obtiene un arco más estable, la transferencia de metal es más suave y con pocas salpicaduras. La polaridad directa (electrodo negativo) es raramente usada debido a que produce un arco inestable; la velocidad de depósito es más grande, pero se tiene poca penetración.

La corriente alterna no se usa comercialmente debido a un errático comportamiento del arco, como resultado de la extinción del arco cada medio ciclo de la onda de corriente.

2.2.3. Electrodos para GMAW

El electrodo, alambre o metal de aporte es clasificado por diversas especificaciones de la Sociedad Americana de la Soldadura (AWS). En general, para aplicaciones de unión, la composición del electrodo es similar a la del metal base. Los electrodos que se usan para GMAW son de diámetro muy pequeño. Son comunes los diámetros de 0.9 a 1.6 mm (0.035" a 0.062"), pero pueden usarse electrodos con diámetro tan pequeño como 0.5 mm (0.020") y tan grande como 3.2 mm (1/8"). Cuando los diámetros de los electrodos son pequeños y las corrientes relativamente

altas, las velocidades de alimentación del alambre en GMAW son altas, desde unos 40 hasta 340 mm/s para la mayor parte de los metales.

2.2.4. Gases protectores

La función primaria del gas protector es impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal de soldadura fundido. Esto es necesario porque la mayor parte de los metales, al calentarse hasta su punto de fusión al aire, presentan una marcada tendencia a formar óxidos y, en menor grado, nitruros. Además, el oxígeno reacciona con el dióxido de carbono. La reacción de estos diversos productos puede causar deficiencias en la soldadura, como porosidad y pérdida de ductilidad.

Además de proporcionar un entorno protector, el tipo de gas y la tasa de flujo tienen un efecto importante sobre:

- Características eléctricas del arco
- Modo de transferencia del metal
- Penetración y perfil de la soldadura
- Velocidad de soldadura
- Tendencia al socavamiento
- Acción limpiadora
- Propiedades mecánicas del metal de soldadura

La selección correcta del gas de protección para una determinada aplicación es crítica para la calidad de la soldadura. El criterio utilizado para hacer la selección incluye:

- Aleación del alambre
- Propiedades mecánicas deseadas del deposito
- Espesor del material y diseño de la junta

- Condición del material, si tiene recubrimiento, oxido o aceite
- El modo de transferencia de metal
- Perfil de penetración deseado
- Posición de la soldadura
- Condiciones de ensamble
- Apariencia final del cordón deseada
- Costos

Bajo el efecto del calor del arco, los gases de protección responden de diferentes formas. El flujo de corriente en el arco y la magnitud tienen un gran efecto en el comportamiento de las gotas de metal fundido. Existen tres criterios básicos útiles para comprender las propiedades de los gases.

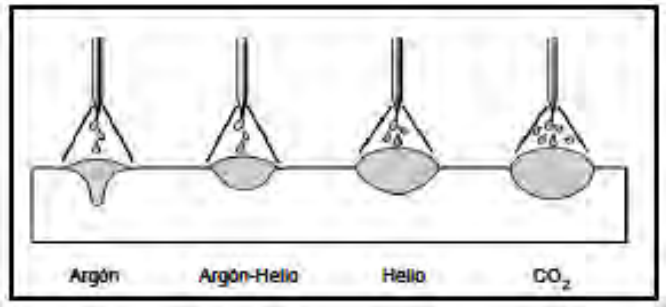
- Potencial de ionización de los componentes del gas
- Conductividad térmica de los componentes del gas
- Reactividad química del gas de protección con el metal fundido

Por lo anterior, es importante detallar la física del arco asociado con algunos gases de protección específicos, que permita la selección del mejor gas de protección para la aplicación. El argón y el helio son dos gases inertes utilizados para la protección del charco de soldadura, el ser inertes significa que químicamente no reaccionan con el metal fundido, sin embargo, en cierto orden llegan a ser conductivos y ese gas en el plasma es ionizado. Gases distintos requieren diferente energía para ionizarse y esto se mide en términos de energía de ionización. Para el argón, la energía de ionización es de 15 eV, el helio tiene una energía de ionización de 24.5 eV. Por lo tanto, el argón es más fácil de ionizar que el helio, por esa razón el argón facilita más el inicio del arco que el helio.

La conductividad térmica o capacidad del gas para transferir energía térmica, es la consideración más importante para seleccionar el gas de protección. Niveles altos de conductividad térmica resulta en más conducción de energía térmica a la pieza de trabajo. La conductividad térmica también afecta la forma del arco y la distribución de la temperatura en la región. El argón tiene más baja conductividad térmica, alrededor del 10 % del nivel del helio e hidrogeno. La alta conductividad térmica del helio provee un patrón de penetración ancho y reducirá la profundidad. Las mezclas de gas con un porcentaje alto de argón dan como resultado una penetración con un perfil llamado de “dedo” proyectado hacia el material base. Esto es debido a la baja conductividad térmica del argón. La figura 11 y 12 muestran el perfil del cordón de soldadura para diferentes tipos de gases.

Figura 10

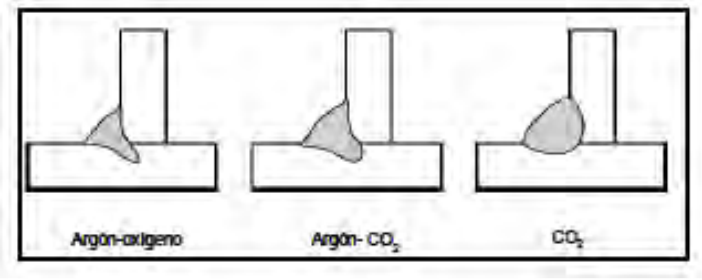
Contorno del cordón y patrón de penetración para diferentes gases de protección.



Fuente. Rodríguez (2013).

Figura 11

Efecto de la adición de oxígeno vs. CO2 al argón de protección.



Fuente. Rodríguez (2013)

A continuación, se mencionan algunos gases y mezclas utilizados en el proceso GMAW y su efecto en la soldadura.

a) Argón: Es más pesado que el aire, químicamente inerte, incoloro y sin olor como gas y líquido. Promueve la buena apertura de arco debido a su bajo potencial de ionización. El argón es el gas de protección inerte más común. Comparado con el helio, la conductividad térmica es baja. El argón produce una estrecha columna de arco con alta densidad de corriente, lo cual provoca que la energía del arco se concentre sobre una pequeña superficie. El resultado es una profundidad de fusión con un perfil característico en "dedo". El argón se utiliza para materiales base no ferrosos como el aluminio, níquel, cobre, magnesio y sus aleaciones, así como para metales reactivos como el circonio y titanio.

b) Hidrógeno: Es el elemento más ligero, químicamente activo; su alta conductividad térmica hace que sus mezclas sean útiles en determinados procesos de soldadura.

c) Dióxido de carbono: Es un gas incoloro que presenta un olor ligeramente picante, químicamente activo. El CO_2 no puede ser usado para la transferencia de rociado en GMAW. Se utiliza sólo para corto circuito o transferencia globular. En presencia de un intenso calor como un arco de soldadura, se disocia en monóxido de carbono y oxígeno libre. La ventaja del CO_2 es su

mayor ancho en la fusión en comparación con el argón. La principal desventaja del CO_2 en transferencia globular es el exceso de salpicaduras que produce.

d) Mezclas de gases binarias.

- **Argón - CO_2**

Se utiliza principalmente en aceros al carbono, baja aleación y aceros inoxidables. Si aumenta la cantidad de CO_2, tendrá como resultado un aumento en el nivel de salpicaduras y una disminución en la eficiencia de deposición. En GMAW se pueden realizar pequeñas adiciones de CO2, a niveles altos de corriente teniendo cuidado de mantener estable la transferencia por rociado. Por arriba de 20% de CO2, la transferencia por rociado se torna inestable y periódicamente ocurren transferencias de corto circuito y globular.

- **Argón con 1 al 10% CO_2**

Estas mezclas se utilizan para la transferencia por rociado y corto circuito en varios materiales y espesores. Una mezcla de 5% de CO_2 se puede utilizar en GMAW con una transferencia pulsada en aceros de baja aleación y en cualquier posición.

- **Argón entre 11 a 20% CO_2**

Esta mezcla se utiliza en una gran variedad de aplicaciones en aceros al carbono y baja aleación. Con esta mezcla disminuye el exceso de penetración incrementando las velocidades de depósito y avance.

- **Argón con variaciones entra el 21% a 49% CO2**

Esta gama se utiliza comúnmente para GMAW con transferencia corto circuito en acero al carbono. Estas mezclas se usan para aplicaciones en alta corriente, como en la soldadura de vigas de espesor considerable.

- **Argón con el 50% de CO2**

Esta mezcla se utiliza cuando se requiere alto calor de entrada y profundidad de fusión. Se recomienda para espesores de metal base por encima de 3.2 mm. Aumenta la profundidad de fusión en soldadura fuera de posición utilizando transferencia con corto circuito. Proporciona un buen mojado y forma del cordón sin excesiva fluidez, siendo una ventaja para la soldadura de tubería. En materiales delgados será mayor la tendencia al exceso de penetración. Cuando la soldadura es a altos niveles de corriente, la transferencia de metal es similar a la de cualquier mezcla de argón + CO_2. Con la adición de argón hay una disminución en las salpicaduras.

- **Argón con hidrógeno**

La adición de hidrógeno aumenta el calor de entrada, permitiendo mayor velocidad de avance, mayor profundidad de fusión, mejor acción de mojado y un perfil del cordón de soldadura más ancho. Las mezclas de argón con hidrógeno se utilizan a menudo para soldar metales como aceros inoxidables austeníticos, níquel y aleaciones de níquel.

En la tabla 5 se muestran los principales gases que se usan en la aplicación de GMAW, transferencia rociada. Casi todas las mezclas de gases inertes también pueden contener pequeñas cantidades de oxígeno ó CO_2. En la tabla 6 se da una lista de los gases que se emplean para GMAW con transferencia con cortocircuito.

Tabla 5

Principales gases del proceso GMAW, transferencia rociada

Metal	Gas protector	Espesor	Ventajas

Aluminio	100% Argón	0-25 mm	Transferencia de metal y estabilidad del arco; mínimo de salpicaduras
Aluminio	35% Argón - 65% Helio	25-76 mm	Más alto aporte de calor que sólo con argón
Aluminio	25% Argón - 75% Helio	>76 mm	Máximo aporte de calor, minimiza la porosidad
Magnesio	100% Argón	—	Excelente acción limpiadora
Acero al carbono	95% Argón + 3.5% Oxígeno	—	Mejora la estabilidad del arco; produce un charco más fluido y controlable
Acero al carbono	90% Argón + 8/10% CO_2	—	Altas velocidades en soldadura mecanizada; bajo costo
Acero de baja aleación	98% Argón + 2% Oxígeno	—	Minimiza el socavado; proporciona buena tenacidad
Acero inoxidable	99% Argón + 1% Oxígeno	—	Mejora la estabilidad del arco; minimiza el socavado
Níquel y aleaciones	100% Argón	—	Ofrece buen mojado; reduce la fluidez
Titanio	100% Argón	—	Buena estabilidad del arco; contaminación mínima

Fuente. American Welding Society (2016).

Tabla 6

Gases que se emplean en el GMAW con transferencia por corto circuito

Metal	Gas protector	Espesor	Ventajas
Acero al carbono	75% Ar + 25% CO_2	<3.2 mm	Altas velocidades sin perforación; mínimo de distorsión y salpicaduras
Acero al carbono	75% Ar + 25% CO_2	>3.2 mm	Mínimo de salpicaduras; buen control del charco en posiciones vertical y sobrecabeza
Acero al carbono	Argón con 5-10% CO_2	—	Penetración más profunda, más altas velocidades
Acero inoxidable	90% He + 7.5% Ar + 2.5% CO_2	—	ZAC pequeña, sin socavados, mínima distorsión
Acero de baja aleación	60-70% He + 25-30% Ar + 4.5% CO_2	—	Reactividad mínima, excelente tenacidad
Acero de baja aleación	75% Ar + 25% CO_2	—	Buena tenacidad, excelente estabilidad del arco

Fuente. American Welding Society (2016).

2.2.5. Soldabilidad del Hierro Fundido Nodular

La soldabilidad se define según Rodríguez (2013), como la capacidad que tiene los materiales para ser unidos permanentemente, manteniendo sus propiedades físicoquímicas y estructurales, de materiales disimiles o de las mismas características.

2.2.5.1. Clasificación de la soldabilidad

La definición de soldabilidad incorpora algunos puntos de vista diferentes, por lo que para su mejor comprensión se la divide en tres aspectos principales:

A. Soldabilidad operativa

Hace referencia a todas las condiciones tecnológicas de ejecución de uniones soldadas por cualquier proceso de soldadura, ya sea por fusión o presión. Existen condiciones que determinan esta soldabilidad, tales como:

1. Tipo de material
2. Tamaño, espesor y forma de las partes soldadas
3. Posición de las juntas
4. Niveles de corrientes
5. Tipo de polaridad
6. Voltaje
7. Velocidad de la soldadura
8. Tipo de protección del arco y de la unión soldada

La mala soldabilidad operativa se podría producir si el metal u oxido tiene altas temperaturas de fusión.

B. Soldabilidad metalúrgica

Es la capacidad que tienen los materiales, de la misma o diferente naturaleza, para ser unidos de forma permanente mediante los procesos de soldadura sin presentar transformaciones microestructurales o variación en las propiedades mecánicas y químicas.

No se debe producir el temple del metal base ni del de aporte. En aceros de bajo carbono, aunque esta posibilidad es mínima, en aceros aleados hay mayor posibilidad de que se generen estructuras martensíticas que tornan frágil al material.

C. Soldabilidad constructiva

Se liga al proyecto de construcción, a las propiedades físicas del material como son la dilatación y contracción que originan fisuramientos en la unión soldada. Depende también de factores externos como son: la temperatura y humedad ambiental, estos dos aspectos son mucho más evidentes en países de cuatro estaciones severas, en nuestro medio se puede encontrar ambientes húmedos. También se define como una combinación de propiedades las cuales controlan la facilidad de unir un metal por soldadura bajo una serie de condiciones impuestas

2.2.5.2. Problemas en la soldabilidad de las fundiciones

A excepción de los hierros fundidos blancos, los cuales no son soldables, según Rodríguez (2013), el resto de los hierros fundidos como el hierro fundido nodular presentan problemas principales y secundarios en la ejecución de la soldadura.

A. Problemas principales

- Agrietamiento: Es uno de los problemas que se genera por las propiedades fisicoquímicas (plasticidad casi nula) que presenta el hierro fundido nodular.
- Formación más o menos localizada de cementita (Fe_3C): También conocida como fundición blanca, es un problema que se presenta tanto en las zonas fundidas como en las zonas de influencia térmica, obteniéndose un material muy duro y a la vez muy frágil, lo cual dificulta la maquinabilidad.

B. Problemas secundarios

- Formación de monóxido y dióxido de carbono, que pueden crear porosidades en la zona fundida.
- Formación de una película refractaria de óxidos de silicio y manganeso con alto punto de fusión.
- Alta fluidez, favorable desde el punto de vista de la fabricación, pero adversa al realizar soldaduras en posiciones inclinadas, verticales y sobrecabeza.

C. Métodos para controlar los problemas de soldabilidad según la AWS

Los métodos para controlar la soldabilidad son muy necesarios dentro del análisis de una soldadura, debido a que mediante estos ensayos se logra evaluar las características tanto de la unión soldada como del material base, por lo tanto, para el estudio comparativo de la soldabilidad del hierro fundido nodular soldado con material de aporte AWS E312-16 y AWS ENiFe-Cl, se procederá a realizar los dos métodos que recomienda la norma ANSI/AWS D1.1-89, que son; el ensayo de soldabilidad y el cálculo del carbono equivalente, ambos procesos tienen por objetivo determinar la temperatura de precalentamiento, un factor muy importante a tomar en cuenta al momento de realizar la soldadura, debido a que el hierro fundido nodular presenta puntos de fusión más elevados que los materiales de aporte, además, mediante el precalentamiento se consigue controlar la microestructura en la zona de soldadura.

2.2.6. Ensayo de soldabilidad

El ensayo de soldabilidad según la norma ANSI/AWS D1.1-89 se realiza en barras rectangulares de hierro fundido, para lo cual se requiere como mínimo 8 y como máximo 12 muestras, con el fin de determinar la temperatura de precalentamiento a la cual ya no existe agrietamiento.

2.2.7. Carbono equivalente

Una de las formas de predecir la soldabilidad de los aceros es a través de la medida de la dureza de las soldaduras en la zona afectada por el calor (ZAC). En las soldaduras, los valores de dureza altos se han considerado como indicadores de potenciales problemas como la fisuración en frío, comportamiento frágil de las uniones soldadas, corrosión bajo tensión y fragilidad por hidrógeno.

Como el carbono es el elemento que más influye en la templabilidad y en la dureza final del acero, se ha considerado conveniente denominar "carbono equivalente" (CE) al índice que permite correlacionar la composición química de un acero con su tendencia a presentar estructuras frágiles cuando es sometido a un proceso de soldadura.

2.2.7.1. Cálculo del carbono equivalente

La norma ANSI/AWS D1.1-89, detalla que al intentar encontrar los valores de temperaturas sin grietas en función del carbono equivalente, se encontraron con la novedad de que la fórmula del carbono equivalente convencional de los aceros no es aplicable para los hierros fundidos, razón por la cual se modificó, dando como resultado una fórmula particular de carbono equivalente (CE) para los hierros fundidos, pero ésta es aplicable solo para fundiciones de hierro cuya suma total de sus componentes cobre, níquel, cromo y molibdeno, presenten un valor máximo de 1,5%. Las pruebas que se desarrollaron en la norma ANSI /AWS D1.1-89, no fueron con el fin de encontrar temperaturas de precalentamiento de los metales base por lo que no se debería usar para ese fin, sin embargo, este método de carbono equivalente se usará solo como un método de comprobación en el presente trabajo de titulación.

$$CE = C + 0{,}31Si + 0{,}33P + 0.45S - 0{,}028Mn + Mo + Cr - 0{,}02Ni - 0{,}01Cu \quad \text{(Ec.1)}$$

La ecuación 1, determina el cálculo del carbono equivalente para fundiciones de hierro de varios grados.

2.2.8. Proceso de Soldadura SMAW

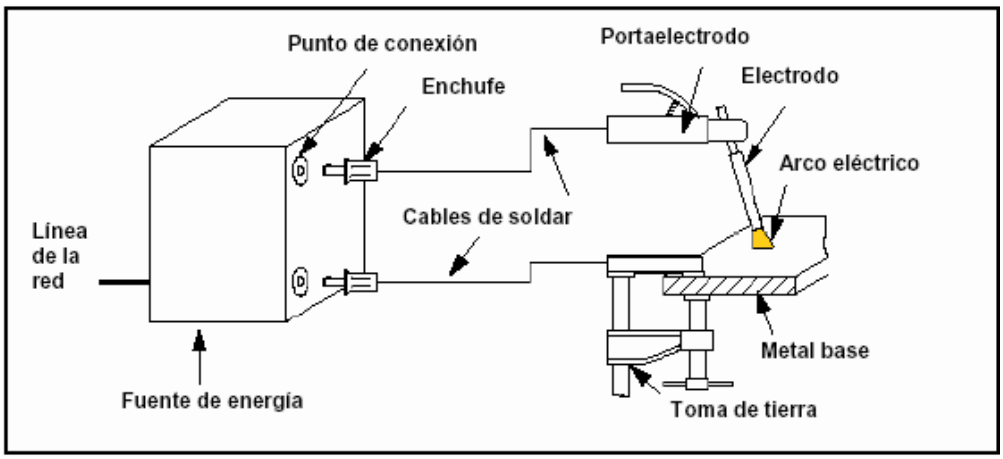
El proceso de soldadura SMAW (Shielded Metal Arc Welding) es uno de los procesos utilizado con mayor frecuencia dentro de la soldadura por arco eléctrico. Este método aprovecha el calor generado por el arco eléctrico para fundir tanto el metal base como la punta del electrodo revestido.

El circuito de este proceso está conformado por los siguientes elementos como se muestra en la Figura 12:

1. Fuente de poder
2. Cables de soldadura
3. Porta electrodos
4. Masa o tierra
5. Material de aporte (electrodo)
6. Metal base

Figura 12

Elementos típicos de un circuito del proceso SMAW



Fuente. Soldexa.

2.2.8.1. Definición

La soldadura por arco de metal protegido (SMAW) es un proceso de soldadura en el cual la unión de los metales se produce por el calor que genera un arco eléctrico entre la pieza a soldar y la varilla metálica conocida como electrodo. Este proceso se desarrolla con o sin presión (Soldexa).

2.2.8.2. Variables principales

En el proceso de soldadura SMAW, las variables principales son:

- Corriente de soldadura (I)
- Voltaje generado en el arco (V)
- Velocidad de soldadura (S)

Estas variables deben ser controladas de manera óptima debido a que las características (penetración, geometría y otras de naturaleza metalúrgica) de los cordones de soldadura dependen de estas variables (Escuela Politécnica Nacional, 2013).

A. Corriente de soldadura

El proceso SMAW puede ser ejecutado utilizando la corriente continua o alterna, con la finalidad de mejorar la estabilidad en el arco de soldadura, para cualquier tipo de corriente que se seleccione es muy importante controlar el amperaje debido a que, de este factor depende tener una excelente fusión y penetración. Dependiendo del tamaño y la clasificación de los electrodos éstos pueden trabajar a diferentes amperajes dentro de un rango de manera óptima.

El amperaje recomendado, de manera particular para un tipo de electrodo, depende de algunos factores como, por ejemplo: la posición de soldadura y el tipo de unión.

Se debe tener en cuenta que la rapidez de aportación del material es directamente proporcional al amperaje, y que no es conveniente trabajar con amperajes que sobrepasen el rango recomendado, debido a que puede causar un sobrecalentamiento en el electrodo, esto desata problemas en la soldadura como: el exceso de salpicadura, golpe del arco, socavamiento, y sobre todo agrietamiento en el metal soldado (Escuela Politécnica Nacional, 2013).

B. Voltaje generado en el arco

El voltaje tiene una relación directa con la longitud del arco (distancia entre el núcleo de la punta del electrodo y la superficie del charco de soldadura).

Para tener una soldadura de buena calidad es importante utilizar una longitud de arco apropiada, como regla general se conoce que esta longitud no debe exceder el diámetro del núcleo del electrodo. Al tener una longitud de arco muy corta genera un cortocircuito al momento de la transferencia del metal fundido, por otro lado, si se tiene una longitud de arco demasiado largo, también genera problemas ya que el metal fundido que se transfiere desde el electrodo hacia la

soldadura tiende a dispersarse, por lo tanto, existe mayor salpicadura, lo cual disminuye la eficiencia del depósito (Escuela Politécnica Nacional, 2013).

C. Velocidad de soldadura

La velocidad de soldadura o de trabajo es el avance del electrodo a lo largo de la junta. Para establecer una velocidad de soldadura correcta se debe tener en cuenta que ésta se encuentra influenciada por:

- Tipo de corriente, amperaje y polaridad.
- Posición de soldadura.
- Velocidad de fusión del electrodo.
- Espesor del material base.
- Condición superficial del material base.
- Tipo de junta.
- Manipulación del electrodo.

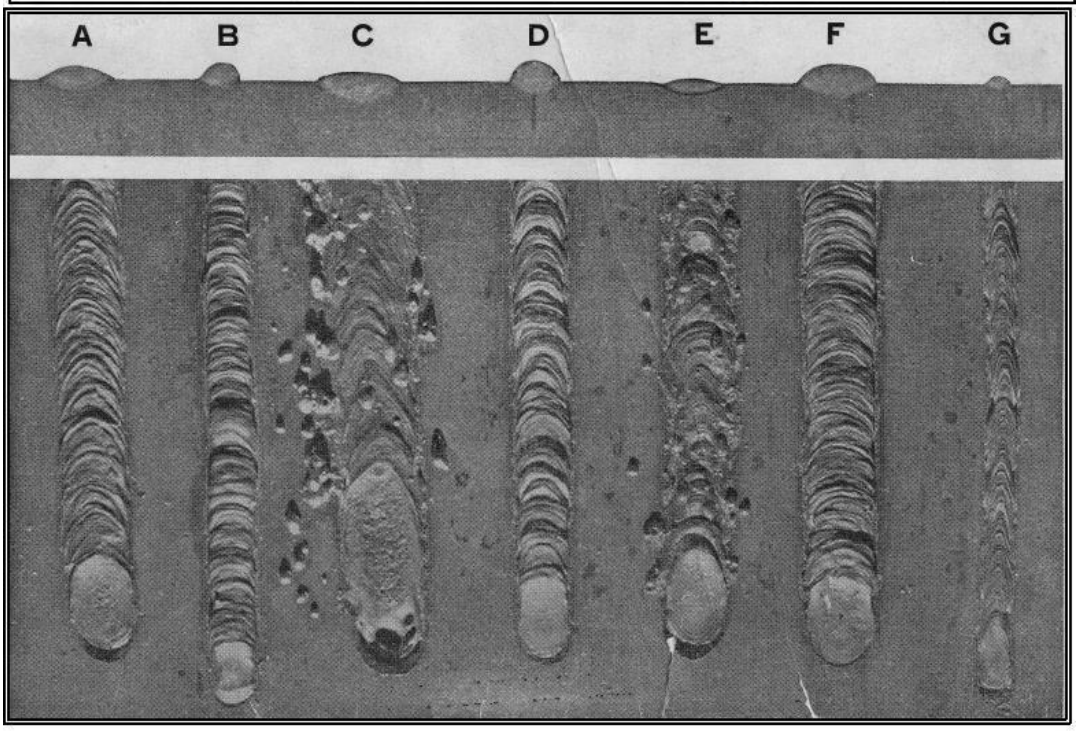
La velocidad de soldadura tiene incidencia directa con el aporte de calor: una baja velocidad de soldadura incrementa la zona afectada por el calor (ZAC) en el metal soldado (Escuela Politécnica Nacional, 2013).

En la Figura 13 se puede apreciar la calidad de soldadura y la influencia de las variables principales.

Figura 13

Calidad de soldadura versus influencia de las variables

	A	B	C	D	E	F	G
Amperaje	Normal	BAJO	ALTO	Normal	Normal	Normal	Normal
Voltaje	Normal	Normal	Normal	BAJO	ALTO	Normal	Normal
Velocidad	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	BAJA	ALTA
Fusión del electrodo	Buena	Buena	Profunda	Pobre	Se funde poco metal base	Normal	Normal



Fuente. Escuela Politécnica Nacional (2013).

2.2.8.3. Capacidades y limitaciones del proceso

Según Quesada (2015), el proceso SMAW es uno de los procesos más usados desde la antigüedad, debido a que presenta varias ventajas como las siguientes:

A. Ventajas

- Los equipos son bastante simples, económicos y fáciles de transportar.
- Los electrodos suministran el metal de aporte y la protección del arco.
- No se requiere de gases de protección adicionales.

- No presenta tanta sensibilidad a las corrientes de aire como los procesos que utilizan gas de protección.
- Se puede usar en áreas de acceso restringido.
- Es un proceso amigable con la mayoría de los metales y aleaciones.

B. Limitaciones

- No es adecuado para metales con punto de fusión muy bajo (plomo, estaño).
- Presenta limitación al soldar metales reactivos (titanio, zirconio, tantalio).
- Es muy dependiente de la habilidad del soldador.
- Existe desperdicio de electrodos, ya que no se pueden consumir en su totalidad.
- El rendimiento y la velocidad de deposición son bajos.

2.2.8.4. Tipos de Electrodos para SMAW

De acuerdo al Manual de Soldadura, Tomo I (American Welding Society, 1996), existe una gran variedad de electrodos que se utiliza en el proceso SMAW dependiendo del material base a soldar. En la Tabla 7 se especifica la clasificación de los electrodos recubiertos según la AWS.

Tabla 7

Especificación de la AWS para electrodos recubiertos



Fuente. American Welding Society (1996).

Para nuestro caso de estudio se especifican los electrodos de hierro fundido según la AWS A5.15.

A. Electrodos de hierro fundido

La norma ANSI/AWS A5.15 clasifica los electrodos para soldar hierro fundido en cuatro tipos: níquel, níquel-hierro, níquel-cobre y acero. Los electrodos de níquel son los más comunes en reparaciones por SMAW, destacando por su maquinabilidad (excepto en zonas afectadas por el calor) y la posibilidad de usarse sin precalentamiento. La dureza del cordón depende de la dilución con el material base.

El níquel mejora la soldabilidad al evitar la formación de carburos y favorecer la grafitización durante el enfriamiento, lo que reduce tensiones y riesgo de grietas. Según Agüera (2008), el níquel y el hierro comparten similitudes estructurales y fisicoquímicas: radios atómicos e iónicos similares, estructuras FCC, electronegatividades y densidades próximas, y puntos de fusión cercanos.

2.2.9. Metalurgia de la Soldadura

″En la práctica industrial de la soldadura, el metal de aporte rara vez resulta idéntico al metal base. Esta diferencia de composición y las características de distribución de calor en la junta soldada resultan en un compuesto heterogéneo consistente de hasta seis zonas metalúrgicas distintas″ (Pástor Vargas, 2002).

Una soldadura típica consiste de:

- La zona compuesta (zona fundida)
- La zona no mezclada
- La intercara de la soldadura

- La zona parcialmente fundida
- La zona termicamente afectada
- El metal base no afectado

2.2.9.1. Zonas Metalúrgicas de la Soldadura

a) La zona compuesta: Es la región en donde el metal de soldadura y el metal base se encuentran fundidos formando la zona de fusión.

b) La zona no mezclada: Es una región muy estrecha que rodea la zona compuesta. Consiste de una capa límite de metal base fundido que se solidifica antes de experimentar mezcla en la zona compuesta.

c) La intercara de la soldadura: Es la región donde se delinea claramente el límite entre el metal base no fundido y el metal de soldadura.

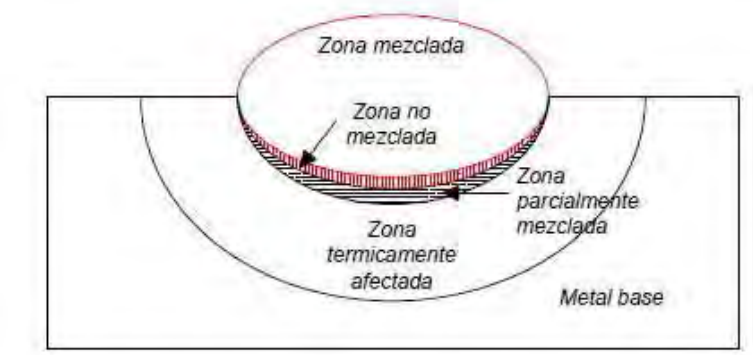
d) La zona parcialmente fundida: Se encuentra en el metal base, inmediatamente adyacente a la intercara de la soldadura, donde puede ocurrir fusión localizada.

e) La zona térmicamente afectada (ZAC): Es la región de la soldadura que experimenta temperaturas pico suficientemente altas como para producir cambios microestructurales en estado sólido, pero no para producir la fusión.

f) El metal base no afectado: Es aquella región de la pieza soldada en la que no ha ocurrido ningún cambio de microestructura (Pástor Vargas, 2002).

Figura 14

Zonas metalúrgicas producidas en una junta soldada



Fuente. Pastor Vargas (2002, Pág. 55)

2.2.10. Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura durante la Soldadura por Arco.

2.2.10.1. Aporte de Calor (heat input).

"El input térmico es la energía aportada por un proceso de soldadura cuando se realiza un cordón por unidad de longitud, expresado en Joules por milímetro (J/mm). Para procesos de soldadura por arco eléctrico, el input térmico es estimado por la ecuación 2" (Fosca Pastor, 2005).

$$Hnet = \frac{V\ X\ I}{v} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Hnet = Calor suministrado (j/mm)

I = Intensidad de corriente (A)

V = Tensión eléctrica (V)

v = Velocidad de soldeo (mm/seg)

La ecuación anterior permite conocer la energía bruta aportada por la máquina (H). Sin embargo, parte de ésta se pierde antes de llegar a la soldadura debido a procesos de radiación, convección y conducción en el arco y en la pieza (Garcia et al., 2010). En ese sentido, es de interés

el cálculo de la energía neta aportada (Hnet), que es el producto del input térmico bruto por el rendimiento del proceso de soldadura.

$$Hnet = \frac{V \times I}{v} \times f \qquad Ec.3.$$

Donde:

f: Eficiencia térmica

La eficiencia térmica de los diferentes procesos se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8

Eficiencia térmica de los procesos de arco

Proceso	Eficiencia
GTAW	20 – 50 %
GMAW	70 – 85 %
SMAW	70 – 80 %
SAW	70 – 99 %

Fuente. García et al (2010).

2.2.10.2. Temperatura Inicial de la Chapa (o Temperatura de Precalentamiento)

Es la temperatura a la cual el metal ha de ser precalentado antes de soldar.

2.2.10.3. Geometría de la soldadura

La geometría de la soldadura se refiere al espesor de la pieza, la forma y dimensión del depósito de soldadura y el ángulo entre las piezas a unir.

2.2.10.4. Características Térmicas del Material

Está relacionado con la conductividad térmica del material.

- Cuanto más baja sea la conductividad térmica, más pronunciada será la distribución de temperaturas máximas. En otras palabras, la zona afectada térmicamente será menor.
- Cuanta más alta sea la conductividad térmica del metal, más rápido se enfriará después de la soldadura.
- Cuanta más alta sea la conductividad térmica, más corto será el tiempo de exposición a elevada temperatura

2.2.10.5. Diámetro del electrodo.

Para un diámetro mayor de electrodo se requerirá, mayor aporte de calor para fundirlo. Este factor es de poca importancia, pero influye en el tamaño de la fuente de calor.

Finalmente, se debe tener en cuenta que determinados rangos de temperatura provocan en el metal transformaciones microestructurales que afectan las propiedades mecánicas de la unión soldada. Generalmente, para el caso de los aceros, los cambios metalúrgicos se producen tras la exposición a temperaturas entre la crítica inferior (723 °C) y la temperatura de fusión (1480°C). Cuando se realiza una soldadura, las regiones de la pieza que alcancen valores entre los límites arriba indicados, experimentarán cambios significativos en su microestructura y por lo tanto en las propiedades mecánicas (Fosca Pastor, 2005).

2.2.11. Cálculo del Ancho de la ZAC

Uno de los empleos más interesantes de la ecuación que nos da la temperatura máxima en un punto es el cálculo de la anchura de la ZAC. Para calcular la anchura con exactitud debe identificarse el extremo de la ZAC más alejado de la soldadura mediante un valor máximo de la temperatura en dicho extremo, que debe corresponder con algún cambio estructural o de las propiedades del material que se suelda (Fosca Pastor, 2005).

La ecuación se aplica en procesos de pasadas únicas de penetración completa, soldeo o corte térmico, con independencia del espesor de la chapa. También se aplica a cualquier soldadura por arco de penetración completa con menos de 4 pasadas (Fosca Pastor, 2005):

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_o}\right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_o}\right)\right] X \left[\frac{H_{net}}{4.13 * \rho C * t}\right] \qquad Ec.4$$

Donde:

T_{max} = Temperatura máxima (°C) a una distancia Y (mm) del extremo o contorno del metal fundido.

T_o = Temperatura inicial de la chapa.(°C)

T_m = Temperatura de fusión (°C) (Temperatura del liquidus del metal a soldar)

C =Calor especifico del metal solido.(J/g.°C)

H_{net} = energía aportada neta (J/mm)

t= Espesor de la chapa a soldar (mm)

ρ = Densidad del material (g/mm^3)

ρC = Calor especifico volumétrico (J/mm^3°C)

$\boldsymbol{Y}$ =Ancho de la zona afectada térmicamente (mm)

2.2.12. Temperatura de precalentamiento (método de Seferian)

Seferian propone un método fundamentado en sus estudios en los que usa una fórmula para el carbono equivalente (Ce), que lo plantea como suma de un carbono equivalente químico y un carbono equivalente del espesor (Fosca Pastor, 2007):

$$C_t = C_e + C_s \qquad Ec.8$$

$$C_e = \text{C} + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13} \qquad Ec.9$$

$$C_s = 0.005 * e\ (\text{mm}) * C_e \qquad Ec.10$$

Donde:

C_s : carbono equivalente del espesor (%)

e: espesor de la pieza (mm)

C_e : carbono equivalente químico (%)

(C_e), depende de la composición química del acero y de un carbono equivalente del espesor (Cs) o llamado también Seferian.

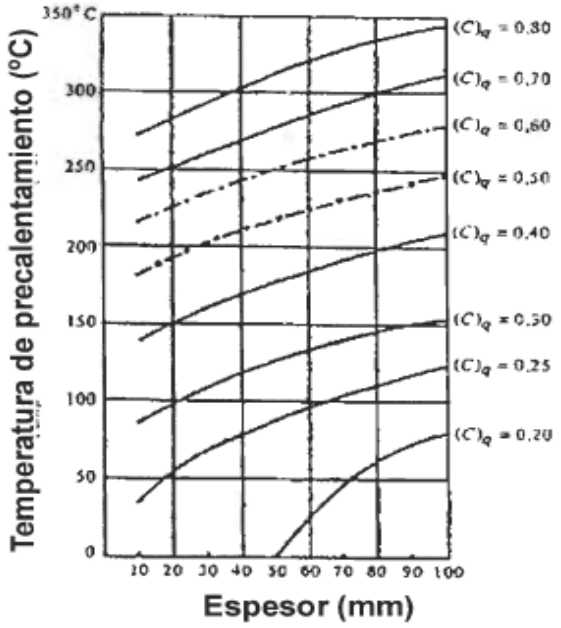
Finalmente, para obtener la temperatura de precalentamiento (Tp) se aplica la formula desarrollada por Seferian (Fosca Pastor, 2007):

$$T_p = 350\sqrt{ct - 0.25} \qquad Ec.11$$

Seferian determina gráficamente la temperatura de precalentamiento como se muestra en la figura 15.

Figura 15

Gráfico de Seferian



Fuente. Fosca Pastor (2007).

Seferian no tiene en cuenta la energía neta aportada en el proceso de soldadura, por lo que las temperaturas resultantes son superiores a las realmente necesarias en aproximadamente 25 a 50 °C (Fosca Pastor, 2007).

2.2.13. Carbono Equivalente

Una de las formas de predecir la soldabilidad de los aceros es a través de la medida de la dureza de las soldaduras en la zona afectada por el calor (ZAC). En las soldaduras, los valores de dureza altos se han considerado como indicadores, en general de potenciales problemas como la fisuración en frio, comportamiento frágil de las uniones soldadas, corrosión bajo tensión, fragilidad por hidrógeno, etc.

La dureza máxima de un acero depende, principalmente, de su % C. La dureza máxima real bajo el cordón depende no solo del contenido del acero, sino también de su templabilidad bajo los ciclos térmicos presentes durante la soldadura en la que influyen muchos otros factores.

Como el carbono es el elemento que más influye en la templabilidad y en la dureza final del acero, se ha considerado convenientemente denominar "carbono equivalente" (Ce) al índice que permite correlacionar la composición química de un acero con su tendencia a presentar estructuras frágiles cuando este es sometido a un proceso de soldadura.

2.2.13.1. Formulas del carbono equivalente (Ce)

El carbono equivalente de un acero es una medida de su tendencia potencial a fisurarse durante o después de la soldadura.

El carbono equivalente brinda información sobre diversos aspectos como pueden ser:

- La templabilidad
- La sensibilidad de los aceros a la figuración en frio (a fin de estimar la temperatura mínima de precalentamiento recomendada o la tolerancia a la figuración debido al hidrogeno).
- La evaluación de las propiedades durante el servicio (que permita medir a través del CE el agrietamiento a causa de los sulfuros o el agrietamiento por corrosión bajo tensiones.)

Existe un gran número de expresiones diferentes para el CE, pero aquí algunos de los más usados en la actualidad:

a. Formula del CE del instituto internacional de soldadura (IIW).

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \qquad \text{Ec. 12}$$

Esta fórmula fue propuesta inicialmente propuesta por DEARDEN y O´Neil en 1940, puede utilizarse para aceros con contenido de carbono superior al 0.18% o en algunas condiciones de soldeo que requieran un enfriamiento lento: t 8/5 >12 segundos. Todos los elementos de aleación están expresados en % en peso. Esta expresión puede utilizarse para aceros con contenido de carbono superior al 0,18% o en unas condiciones de soldeo que requieran un enfriamiento lento: t8/5 > 12 segundos.

b. Formula del tipo PCM (parámetro de composición).

Fueron propuestas por Ito y Bessyo.

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10}\ 5V \qquad \text{Ec.13}$$

Esta fórmula es empleada por el código estructural AWS D1.1 para la determinación de la temperatura mínima de precalentamiento.

c. El tipo CEMW

Propuesta por DUREN en el año 1981

$$CEMW = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \qquad \text{Ec.14}$$

Ambas pueden elegirse para aceros que tengan una proporción de carbono inferior a 0.22% y en el caso de un enfriamiento rápido: t8/5 < a 6 segundos. Esta ecuación da una mejor correlación con las situaciones reales de soldaduras en campo, donde las velocidades de enfriamiento suelen ser mayores (t8/5 = 2-3 seg.).

d. Formula del CEN.

Propuesta por Yurioka (1981).

$$CEN = C + A(C)[\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr+Mo+Nb+V}{5} + 5B] \qquad \text{Ec.15}$$

En la que A(C)= 0.75+ 0.25 tanh [20(C – 0.12)].

A(C), es un factor de acomodación que se aproxima a 0.5 cuando él %C < 0.08% y a 1 cuando % C >0.18%.

Esta expresión ofrece estimaciones aceptables para aceros con contenidos de carbono hasta el 0.25%.

El criterio que se emplea con el CE es que cuanto más alto sea su valor, el acero tendrá mayor dificultad para ser soldado. Para evitar riesgos de fisuración en frío por la presencia de estructuras frágiles en el cordón de soldadura se recomienda que el CE no sea mayor a 0,35 - 0,40 (dependiendo del espesor de la plancha y el grado de embridamiento de la unión).

Por otro lado, según el código de soldadura estructural ANSI/ AWS D1.1 los aceros también se pueden clasificar de acuerdo a su posicionamiento en el diagrama de Graville.

2.2.14. Ensayos Destructivos y no Destructivos

2.2.14.1. Ensayos no Destructivos

Son técnicas no invasivas para determinar la integridad de un material, componente o estructura o para medir cuantitativamente características de un objeto. Estos ensayos no afectan a las propiedades, dimensiones y uso de las piezas ensayadas.

La inspección de la calidad de las soldaduras mediante pruebas no destructivas en acero, titanio y aluminio permiten la detección de grietas, porosidades, penetraciones incompletas, inclusiones, así como las discontinuidades y otros defectos que pudieran comprometer la resistencia de la soldadura.

Los métodos de END más utilizados para detección de fallas en soldadura son:

- Inspección Visual
- Líquidos Penetrantes
- Partículas magnéticas
- Radiografía
- Ultrasonido

a. Inspección visual.

Se realiza en toda la secuencia de operaciones a lo largo de todo el proceso productivo, desde la recepción de los materiales y tiene como fin asegurar la calidad de las uniones soldadas. La inspección visual es una de las Pruebas No Destructivas (PND) más empleada. La soldadura de sellado de los perfiles huecos de acero requiere inspección visual.

Los criterios de aceptación del ensayo de inspección visual según la norma AWS D1.1, se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9

Criterios de aceptación para ensayo visual

No	Criterios
1	No se debe aceptar grietas de ninguna dimensión.
2	Todas las mordeduras presentes en la soldadura se deben completar hasta su sección transversal.
3	Debe haber una fusión completa entre el metal base y el metal de aporte. El refuerzo no debe superar los 3 mm.
4	El máximo valor de socavación debe ser de 1 mm.
5	No se acepta grietas, penetración inadecuada o fusión incompleta en la raíz de soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP).
6	La perforación por fusión o concavidad de raíz de un lado sin respaldo en soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP) deben ajustarse a lo siguiente: • Si el espesor total de la soldadura es igual o mayor al metal base, la concavidad de raíz no debe superar los 2 mm. • La perforación por fusión no debe exceder los 3 mm.

Nota. Obtenido de AWS

b. Inspección por líquidos penetrantes

Este ensayo se utiliza para detectar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales inspeccionados. Es uno de los END más ampliamente utilizados para la detección de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. Es, casi seguro, el método de END más comúnmente utilizado en la actualidad, porque se puede aplicar a cualquier material magnético o no magnético. Los líquidos penetrantes proporcionan a la industria una amplia gama de sensibilidades y técnicas que lo hacen adaptable a una gama de tamaños y formas. Es extremadamente útil para exámenes que se realizan en lugares remotos por su versatilidad. También es apropiado en entornos de producción de piezas pequeñas en período de tiempo relativamente corto.

La característica distintiva principal entre los dos tipos es:

- Los líquidos penetrantes fluorescentes contienen un colorante que fluorece bajo la luz negra o ultravioleta.
- Los líquidos penetrantes no fluorescentes contienen un colorante de alto contraste bajo luz blanca.

Ambos líquidos se aplican igual y constan de las siguientes fases:

- Limpieza inicial de la pieza.
- Aplicación del líquido penetrante.
- Medida del tiempo de penetración.
- Eliminación del líquido sobrante.
- Aplicación del líquido revelador.
- Examen de la pieza.
- Limpieza final de la pieza.

c. Partículas magnéticas

Detecta discontinuidades de tipo superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Es aplicado cuando se necesita una inspección más rápida que la obtenida mediante líquidos penetrantes.

El método se basa en la formación de distorsiones del campo magnético o de los polos cuando se genera o se induce éste en un material ferromagnético; o sea, cuando el material analizado presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, este campo se deforma o produce polo. Dichas distorsiones atraen a las partículas magnéticas, aplicadas en forma de polvo o suspensión directamente en la superficie a inspeccionar, la acumulación de estas produce las indicaciones que se observan de manera directa, o por incidencia de luz ultravioleta.

- **Ventajas de las partículas magnéticas**
  - Requiere menor limpieza en comparación a otros métodos.
  - Rápido y económico.
  - Revela discontinuidades que no abiertas a la superficie.
- **Desventajas de las partículas magnéticas**
  - Baja penetración.
  - Sólo aplicables en materiales ferromagnéticos.
  - La operación del equipo en campo puede ser de alto costo.
  - Requiere energía eléctrica para su utilización.
  - Sólo detecta discontinuidades perpendiculares al campo.

2.2.14.2. Ensayos Destructivos

a. Dureza.

Radeva, (2014), define la dureza como “la resistencia que opone un material a ser penetrado por un cuerpo más duro, y esta micropenetración se realiza mediante una punta”.

Los ensayos de dureza más utilizados son:

- Ensayo Martens.
- Ensayo Shore.
- Ensayo Mohs.
- Ensayo Brinell.
- Ensayo Vickers.
- Ensayo Rockwell.
- Ensayo Poldi.
- Ensayo Knoop.

2.2.15. Las Discontinuidades en Soldadura

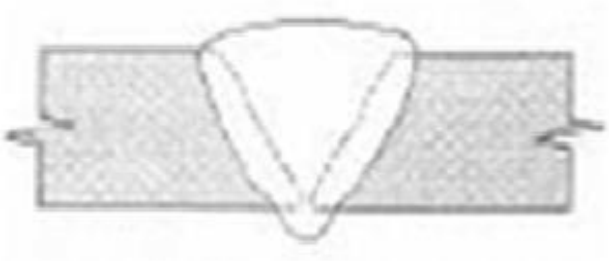
En soldadura, las discontinuidades se clasifican en: superficiales e internas

2.2.15.1. Discontinuidades Superficiales

- **Exceso de penetración:** Se produce por efecto de un movimiento que causa la penetración del electrodo dentro de los biseles, los cuales son distribuidos en esas áreas. Causa que el material chorree al interior y puede retener escoria o no en su interior. Este defecto puede producir en soldadura de gaseoductos, desgaste por erosión. La imagen radiográfica da una densidad más clara en el centro del ancho de la imagen, ya sea extendida a lo largo de la soldadura o en gotas circulares aisladas, pudiendo presentar en su interior una mancha deforme negra Figura 16 (Echevarria, 2002).

Figura 16

Exceso de penetración



Fuente. Echevarria (2002).

- **Falta de penetración:** Como en las uniones en U o en V son visibles por la cara posterior, esta imperfección puede considerarse superficial. A menudo la raíz de la soldadura no quedará adecuadamente rellena con metal dejando un vacío que aparecerá en la radiografía como una línea negra oscura firmemente marcada, gruesa y negra, continua o intermitente reemplazando el cordón de la primera pasada. Puede ser debida a una separación excesivamente pequeña de la raíz, a un electrodo demasiado grueso, a una corriente de soldadura insuficiente, a una velocidad excesiva de pasada, penetración incorrecta en la ranura. Este defecto por lo general no es aceptable y requiere la eliminación del cordón de soldadura anterior y repetición del proceso Figura 17 (Echevarria, 2002).

Figura 17

Falta de penetración



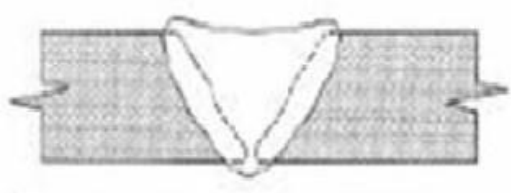
Fuente. Echevarria (2002).

a. Concavidades. Estas discontinuidades se presentan de dos tipos:

Concavidad externa o falta de relleno: presenta una disminución de refuerzo externo, por poco depósito de material de aporte en el relleno del cordón. La imagen radiográfica muestra una densidad de la soldadura más oscura que la densidad de las piezas a soldarse, la cual se extiende a través del ancho completo de la imagen, figura 21 (Echevarria, 2002).

Figura 18

Concavidad externa

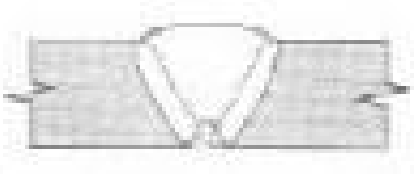


Fuente. Echevarria (2002).

Concavidad interna: Insuficiente refuerzo interno de la soldadura en su cordón de primera pasada el cual al enfriarse disminuye su espesor pasando a ser menor que el del material base. Figura 19 (Echevarria, 2002).

Figura 19

Concavidad interna



Fuente. Echevarria (2002).

i. Socavaduras o mordeduras de borde: La socavadura es una ranura fundida en el metal base, adyacente a la raíz de una soldadura o a la sobre monta, que no ha sido llenada por el metal de soldadura figura 20 (Echevarria, 2002).

Causas y corrección

- Exceso de calor - Corrija el amperaje de su maquina
- Electrodo inadecuado - Cambie el electrodo
- Manipulación incorrecta - Mejore el movimiento manual
- Arco muy intenso - Corrija el arco
- Velocidad inadecuada - Mejore la velocidad y corrija el movimiento del electrodo

Figura 20

Socavaduras o mordeduras de borde

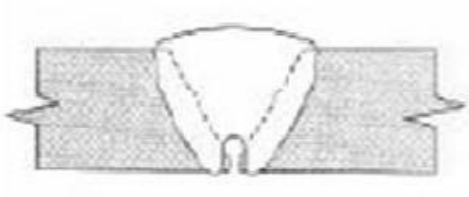


Fuente. Echevarria (2002).

ii. Quemado: Es una zona de la pasada de raíz donde la penetración excesiva ha causado que el aporte de la soldadura penetre dentro de la misma soplándose. Resulta de factores que producen excesivo calor en un área determinada, tales como: excesiva corriente, velocidad lenta del electrodo, manejo incorrecto del electrodo. Hay destrucción completa de los biseles. Esta discontinuidad se observa en la figura 21 (Echevarria, 2002).

Figura 21

Quemado



Fuente. Echevarria (2002).

b. Salpicaduras: Son imperfecciones consistentes en esferuelas de metal fundido depositadas aleatoriamente sobre el cordón y su vecindad. Pueden ser provocadas por humedad en el revestimiento del electrodo. En la figura 22 se observa esta discontinuidad.

Figura 22

Salpicaduras de metal

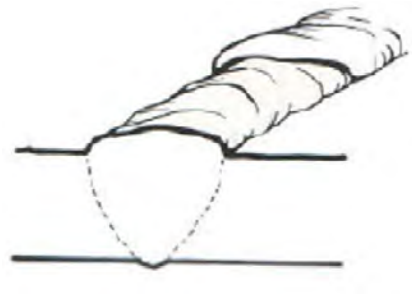


Fuente. Echevarria (2002).

i. Falta de continuidad del cordón: Se origina al interrumpir el soldador el cordón y no empalmar bien la reanudación del trabajo. Su severidad es muy variable ya que, en los casos más severos, pueden considerarse auténticas faltas de fusión transversales, en tanto que, en otras ocasiones, son simples surcos normales al eje del cordón. Su aspecto radiográfico es el de una línea oscura u oblicua, relativamente nítida Figura 23 (Echevarria, 2002).

Figura 23

Falta de continuidad del cordón



Fuente. Echevarria (2002).

2.2.15.2. Discontinuidades Internas

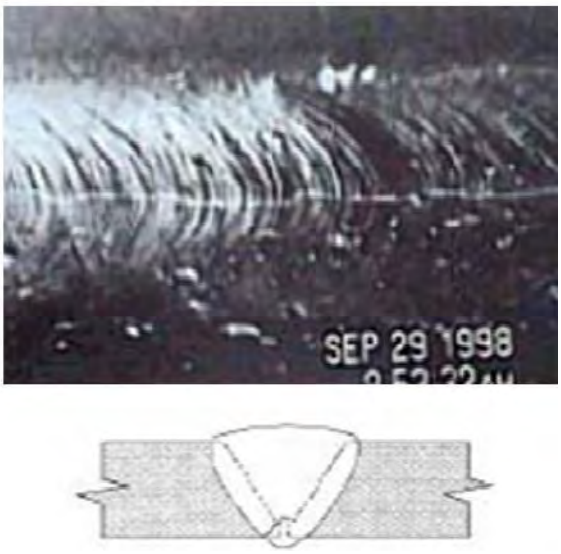
Pueden clasificarse en:

a. Fisuras longitudinales

Pueden producirse en el centro del cordón (generalmente por movimientos durante o posteriores a la soldadura) o en la interfase del material base con el de aporte (por causa de un enfriamiento brusco o falta de un correcto precalentamiento en grandes espesores). Esta discontinuidad se observa en la Figura 24 (Echevarria, 2002).

Figura 24

Fisuras longitudinales



Fuente. Echevarria (2002).

b. Fisuras transversales

Producidas generalmente en aceros duros, por combinación de elementos que al enfriarse a la temperatura normal producen la fisura que puede o no prolongarse al metal base Figura 25 (Echevarria, 2002).

Figura 25

Fisuras transversales



Fuente. Echevarria (2002).

c. Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)

En el arranque de la soldadura por cambio de electrodo pueden producirse fisuras en forma de estrella por efecto del brusco enfriamiento y recalentamiento del material (son fisuras en caliente), Figura 26 (Echevarria, 2002).

Figura 26

Fisura de interrupción



Fuente. Echevarria (2002).

d. Fisuras alrededor del cordón (ZAC)

Fisuras en frío: Se produce por la falta de precalentamiento (crítica para ciertos tipos de aceros), en aceros duros (estructura martensítica en ZAC como resultado del ciclo térmico de soldadura) o de mucho espesor, Figura 27 (Echevarria, 2002).

Figura 27

Fisuras en la zona afectada por el calor



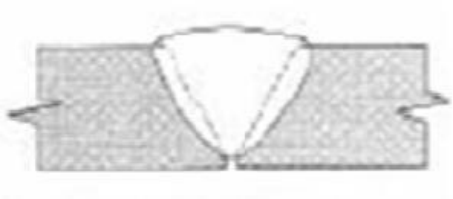
Fuente. Echevarria (2002).

Falta de penetración

Se da en la zona de raíz cuando no ha penetrado el metal fundido. Si la unión es en X o en K, la raíz queda en corazón mismo del cordón, siendo la falta del metal de aporte en dicha zona rigurosamente interna, Figura 28 (Echevarria, 2002).

Figura 28

Falta de penetración



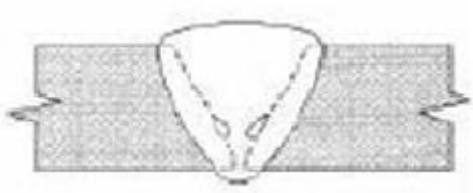
Fuente. Echevarria (2002).

e. Falta de fusión

Generalmente ocasionada por falta de temperatura suficiente para fundir el metal base o el cordón anterior ya sólido, Figura 29 (Echevarria, 2002).

Figura 29

Falta de fusión



Fuente. Echevarria (2002).

Falta de fusión entre pasadas.

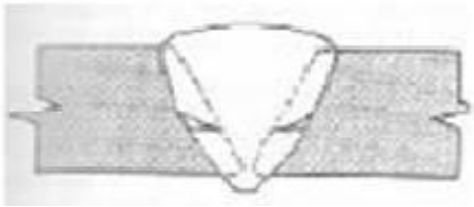
Se produce en las interfases de la soldadura, donde las capas adyacentes del metal, o el metal base y el metal de soldadura no se fusionan debidamente, por lo general debido a una capa

muy fina de óxido que se forma en las superficies. Esta capa de óxido puede deberse a una falta de calentamiento del metal base o al depósito previo del metal de soldadura en volumen suficientemente alto que impide que cualquier capa de óxido, escoria, impurezas, etc. migre a la superficie.

También puede deberse a la falta de corriente suficiente o la mala ubicación del arco eléctrico dentro de los biseles, el cual, al producirse más sobre uno, deja al otro sin fundir, Figura 30 (Echevarria, 2002).

Figura 30

Falta de fusión



Fuente. Echevarria (2002).

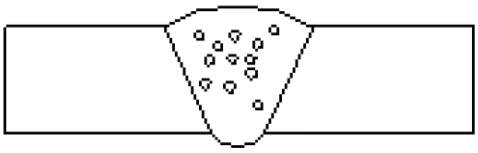
2.2.15.3. Discontinuidades Como Inclusiones

a. Inclusiones gaseosas.

Por diversas razones, en el metal de soldadura fundido se forman gases que pueden quedar atrapados si no hay tiempo suficiente para que escapen antes de la solidificación de la soldadura. El gas así atrapado, por lo general tiene la forma de agujeros redondos denominados porosidades esféricas, o de forma alargada llamados porosidad tubular o vermicular, Figura 31 (Echevarria, 2002).

Figura 31

Inclusiones gaseosas



Fuente. Echevarria (2002).

b. Porosidad agrupada (nido de poros).

Producida generalmente por un agente oxidante o excesiva humedad del revestimiento. Pueden también encontrarse capas de óxido sobre los biseles, las que al fundirse desprenden gas. El tamaño de estos poros es igual en toda la zona, Figura 32.

Figura 32

Porosidad agrupada.



Fuente. Echevarria (2002).

c. Porosidad alineada

Generalmente surge en la pasada de base del cordón soldado, por efecto de la dificultad de penetrar con el electrodo, por mala regulación eléctrica en correspondencia con el fundente utilizado por máquinas automáticas y por acumulación de algunos de los elementos del mismo. Figura 33 (Echevarria, 2002).

Figura 33

Porosidad alineada



Fuente. Echevarria (2002).

d. Inclusiones no metálicas.

Provienen de agentes extraños como pueden ser del material de aporte. Esta discontinuidad se observa en la Figura 34 (Echevarria, 2002).

Figura 34

Inclusiones no metálicas



Fuente. Echevarria (2002).

e. Inclusiones de escoria aisladas.

La mayoría de las soldaduras contienen escorias que han sido atrapadas en el metal depositado durante la solidificación. Son depósitos de carbón, óxidos metálicos y silicatos principalmente, Figura 35 (Echevarria, 2002).

Figura 35

Inclusión de escoria aisladas



Fuente. Echevarria (2002).

Las escorias pueden provenir del revestimiento del electrodo o del fundente empleado. Las inclusiones de escoria se asocian frecuentemente a la falta de penetración, fusión deficiente, talón de raíz suficientemente grande, soldadura en V muy estrecha y deficiente habilidad del soldador.

f. Escorias alineadas.

Se producen por movimientos inadecuados del electrodo por parte del soldador. Quedan alineadas sobre el costado del cordón soldado. En el caso de la soldadura automática, el fundente suele quedar atrapado por una mala regulación de la máquina o por falta de limpieza, pero en este caso estará en el centro del cordón. Este tipo de defecto es muy agresivo, Figura 36 (Echevarria, 2002).

Figura 36

Escorias alineadas



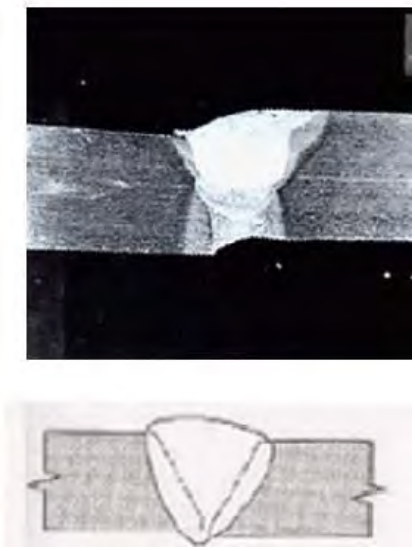
Fuente. Echevarria (2002).

g. Desalineado (high low).

Desalineamiento de las partes a ser soldadas, Figura 37.

Figura 37

Desalineado



Fuente. Echevarria (2002).

2.2.16. Calificación del Procedimiento

Antes de iniciar una soldadura de producción será establecido y calificado un documento detallado del procedimiento para garantizar que la soldadura presente adecuadas propiedades. La calidad de la soldadura debe ser probada por ensayos destructivos y no destructivos.

2.2.16.1. Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

Más conocido por sus siglas en inglés (WPS = welding procedure specification), es un documento técnico que contiene los parámetros y los valores de variables de soldadura necesarias para realizar soldaduras de producción para un determinado proceso de soldadura o combinación de estos, de manera que cumplan los requisitos de una norma aplicable y se asegure repetitividad en los procesos de soldadura ejecutados por personal calificado.

2.2.16.2. Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)

Documento que valida y respalda el WPS. EL PQR contiene las variables reales de soldadura utilizadas en la prueba y los resultados del ensayo realizado sobre la soldadura para propósitos de calificar las especificaciones del procedimiento de soldadura. El PQR es el registro que documenta los resultados de soldar y ensayar las probetas.

2.2.16.3. Calificación de Soldadores (WPQ)

Es un registro en el cual se detallan los resultados del desempeño de un soldador, para producir juntas soldadas que están dentro del rango de aceptación de una determinada norma, este documento contiene los datos personales del soldador, descripción del material base y material de aporte, los rangos de distintas variables de soldadura dentro de los cuales el soldador se encuentra calificado y los resultados de los ensayos destructivos como también de los no destructivos realizados al cupón de prueba.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

El proceso de soldadura influye significativamente en las características microestructurales y mecánicas de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) del hierro dúctil; específicamente, el proceso GMAW genera una ZAC de menor ancho y con distribución de dureza más homogénea que el proceso SMAW, debido a su menor aporte de calor y mejor control del arco eléctrico.

3.1.2. Hipótesis especificas

- El ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) producida por el proceso GMAW es menor que la generada por el proceso SMAW, debido a la diferencia en la densidad de corriente y en la estabilidad térmica del arco.
- El mayor aporte de calor (energía por unidad de longitud) en el proceso SMAW incrementa la extensión y modifica las características microestructurales de la ZAC en comparación con el proceso GMAW, generando una zona térmicamente más afectada.
- La distribución de dureza transversal muestra una mayor variación entre el depósito, la ZAC y el metal base en el proceso SMAW que en el proceso GMAW, evidenciando una relación directa entre las condiciones térmicas del proceso y los gradientes de dureza resultantes.

3.2. Variables

3.2.1. Variables independientes

- Proceso de soldadura aplicado (SMAW y GMAW)

3.2.2. Variables dependientes

- Ancho de la zona afectada por el calor (ZAC)
- Microestructura de la ZAC
- Dureza de la ZAC

3.2.3. Variables intervinientes

- Temperatura ambiental
- Humedad ambiental

3.3. Matriz de operacionalización de variables

Tabla 10

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADOR	DIMENSIÓN	UNIDAD	INSTRUMENTOS Y/O TÉCNICAS
Proceso de soldadura	Independiente	Método de unión de metales mediante arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) o electrodo continuo con protección gaseosa (GMAW)	Aplicación de los procesos SMAW y GMAW bajo parámetros controlados	Tipo de proceso	SMAW/GMAW	Cualitativo	WPS, registros de parámetros
Ancho de la ZAC	Dependiente	Distancia perpendicular desde el límite de la zona fundida hasta el punto donde no hay cambios microestructurales	Medición directa en sección transversal metalografiada	Ancho medido	mm	mm	Microscopio óptico, software de medición
Microestructura de la ZAC	Dependiente	Fases y constituyentes presentes en la ZAC como resultado del ciclo térmico	Observación y caracterización mediante microscopía óptica	Fases identificadas	Cualitativo	—	Microscopio óptico, ataques químicos
Dureza de la ZAC	Dependiente	Resistencia a la penetración en la ZAC medida en escala Rockwell B	Medición con durómetro Rockwell en la ZAC	Valor de dureza	HRB	HRB	Durómetro Rockwell

Nota. Elaboración propia.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Ámbito de estudio: Localización política y geográfica

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Taller de Soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, así como en el Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Perú, donde se realizaron los ensayos de caracterización de las probetas soldadas.

Figura 38

Ubicación geográfica del taller de soldadura UNSAAC



Fuente. Recuperado de Google Earth (2026).

Datos de la ubicación del taller de soldadura:

Dirección exacta: Av. de la Cultura N° 773, Cusco 08003

Provincia: Cusco

Departamento: Cusco

Coordenadas: -13.520457, -71.957919

Altitud: 3,399 m s. n. m.

4.2. Diseño de investigación

La investigación desarrollada se enmarca dentro del diseño experimental, ya que se trabajó con un conjunto de variables que fueron manipuladas de manera intencional para analizar su efecto en las características de la ZAC. Se consideraron como variables independientes el proceso de soldadura (SMAW y GMAW) y los parámetros operativos (corriente, voltaje, velocidad de avance), mientras que las variables dependientes fueron el ancho de la ZAC, la microestructura y la dureza.

Tal como señalan Hernández y otros (2014), en este tipo de diseños el investigador manipula deliberadamente una o varias variables independientes con el propósito de examinar las consecuencias que dicha manipulación produce sobre la variable dependiente. En este estudio, se aplicó un diseño experimental factorial 2 × 4, donde el primer factor corresponde al proceso de soldadura (SMAW y GMAW) y el segundo factor corresponde a cuatro niveles de energía de soldadura (definidos por la combinación de corriente y voltaje).

4.3. Método de investigación

El método es hipotético-deductivo, ya que la investigación anticipa las respuestas de la investigación y mediante la contrastación de resultados se comprueban las hipótesis planteadas. Para ello, se realizaron soldaduras en probetas de hierro esferoidal bajo condiciones controladas y

se evaluaron las características de la ZAC mediante ensayos destructivos y no destructivos (Hernández y otros, 2014). El proceso deductivo consistió en: a) formular hipótesis basadas en la teoría existente, b) diseñar experimentos para probar dichas hipótesis, c) recolectar y analizar datos, y d) confirmar o refutar las hipótesis a partir de los resultados obtenidos.

4.4. Enfoque de la investigación

La investigación es de enfoque cuantitativo, el cual es secuencial y probatorio, utiliza la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías (Hernández y otros, 2014). El enfoque cuantitativo se evidencia en: a) la medición numérica de las variables (ancho de ZAC en mm, dureza en HRB, aporte de calor en J/mm), b) el uso de instrumentos de medición calibrados, c) el análisis estadístico de los resultados (promedios, desviaciones estándar), y d) la contrastación de hipótesis mediante comparaciones numéricas.

4.5. Tipo de la investigación

La presente investigación es de tipo **tecnológica**, pues su propósito principal no es descubrir nuevas leyes científicas, sino aplicar conocimientos ya existentes para optimizar procesos productivos (Bello, 1996). En este sentido, el estudio buscó generar información aplicable para mejorar los procedimientos de soldadura del hierro dúctil, estableciendo criterios técnicos para la selección del proceso más adecuado según la aplicación. La investigación se orienta a la solución de un problema práctico: la falta de procedimientos estandarizados para la soldadura de hierro dúctil en la industria peruana.

4.6. Nivel de la investigación

La investigación se ubica en los siguientes niveles, según la clasificación de Hernández y otros (2014):

- **Descriptivo:** Describe las características de la ZAC (ancho, dureza, microestructura) generada por ambos procesos, estableciendo una caracterización sistemática de las uniones soldadas.
- **Correlacional:** Determina el grado de relación entre el aporte de calor y las características de la ZAC, evaluando la correlación entre variables independientes y dependientes.
- **Explicativo:** Busca el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto entre el proceso de soldadura y las propiedades de la ZAC, estableciendo las razones por las cuales un proceso genera mejores resultados que el otro.

4.7. Población y Muestra

4.7.1. Población

Está conformada por todas las uniones soldadas realizadas sobre piezas de hierro esferoidal que pueden ser producidas mediante los procesos de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) y soldadura por arco metálico con gas (GMAW), bajo diferentes combinaciones de parámetros de soldadura, que podrían ser producidas en el contexto industrial peruano.

4.7.2. Muestra

La muestra está constituida por 8 probetas de hierro esferoidal (4 para cada proceso), dimensionadas a 120 mm × 150 mm × 6.35 mm, soldadas bajo condiciones controladas según las especificaciones del WPS. El tamaño de muestra fue determinado considerando la suficiencia para el análisis estadístico de los resultados y la factibilidad experimental. Cada probeta fue identificada con una codificación alfanumérica (SMAW-01 a SMAW-04; GMAW-01 a GMAW-04). Los

criterios de inclusión fueron: a) material certificado según ASTM A536, b) espesor nominal de 6.35 mm, c) preparación de junta en V con ángulo de 60°, d) ausencia de defectos superficiales visibles previos a la soldadura.

4.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

4.8.1. Técnicas

Se emplearon cuatro técnicas principales de recolección de datos:

a) Inspección Visual: Evaluación de la calidad superficial de los cordones de soldadura, siguiendo los criterios de aceptación de la norma AWS D1.1 (American Welding Society, 2015). La inspección se realizó a simple vista y con una lupa de aumento 10×, registrando la presencia de defectos como grietas, poros, socavaduras, falta de fusión y falta de penetración.

b) Ensayo por Partículas Magnéticas: Detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales según ASTM E709 (ASTM International, 2020), utilizando un Yugo B300 y partículas fluorescentes. El procedimiento consistió en: limpieza de la superficie con cepillo de acero y thinner, magnetización de la probeta, aplicación de partículas fluorescentes, paso del yugo a lo largo del cordón, y observación de acumulación de partículas bajo luz ultravioleta.

c) Ensayo de Dureza Rockwell B: Medición del perfil de dureza transversal en las zonas de interés (metal base, ZAC y depósito), según ASTM E190-14 ((ASTM International, 2014). Las mediciones se realizaron por triplicado en cada zona, calculando el valor promedio y la desviación estándar.

d) Medición del Ancho de ZAC: Cuantificación directa en secciones metalografiadas utilizando un microscopio óptico con micrómetro calibrado. Las secciones

transversales fueron preparadas mediante desbaste, pulido y ataque químico con Nital 2%.

4.8.2. Instrumentos

Los instrumentos utilizados fueron:

- Pirómetro óptico para medición de temperatura
- Durómetro Rockwell para ensayos de dureza
- Yugo de CA para ensayos de partículas magnéticas
- Microscopio óptico para análisis metalográfico
- Equipo de ensayo de doblez
- Máquinas de soldar RH 400 (SMAW) y HOBART Beta-Mig (GMAW)
- Kit de tintes penetrantes MR (limpiador MR85, penetrante MR68, revelador MR70)

4.9. Viabilidad de la Investigación

La realización del presente trabajo de investigación es factible por las siguientes razones:

a) **Disponibilidad de materiales:** Se cuenta con acceso a probetas de hierro esferoidal ASTM A536, electrodos ENi-CI y alambre ERNi-1, suministrados por proveedores locales y el taller de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

b) **Disponibilidad de equipos:** El taller de soldadura de la UNSAAC dispone de las máquinas de soldar RH 400 y HOBART Beta-Mig, así como del equipo de ensayo de doblez y yugo magnético. El Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Perú cuenta con el durómetro Rockwell y el pirómetro óptico necesarios para la caracterización.

c) **Financiamiento:** Los costos asociados a materiales, preparación de probetas y ensayos son asumidos por los tesistas.

d) **Tiempo:** El cronograma de actividades contempla 6 meses para la ejecución experimental, procesamiento de datos y redacción de la tesis.

e) **Recursos humanos:** Se cuenta con el asesoramiento del Mgt. Ing. Eduardo F. Ortiz Saravia, así como con el apoyo técnico del personal del taller y laboratorios.

4.10. Validez y Confiabilidad de Instrumentos

La validez y confiabilidad de los datos recopilados se garantizó siguiendo los procedimientos estandarizados de las normas ASTM y AWS. Los instrumentos fueron calibrados antes de su uso y las mediciones se realizaron por triplicado en cada zona de interés, calculando el valor promedio y la desviación estándar, según recomiendan Hernández y otros (2014).

4.11. Equipos y Materiales

4.11.1. Maquinaria y Equipos

A. Máquina de soldar RH 400 (Proceso SMAW)

Esta máquina proporciona corriente continua, lo que permite soldar todo tipo de materiales ferrosos y no ferrosos como el aluminio y bronce. Sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11

Características técnicas de la máquina de soldar RH 400

Modelo	Corriente nominal de salida	Rango de amperaje	Máximo voltaje en vacío	Corriente nominal de entrada para 220/380/440 V	Potencia nominal de entrada

RH - 400	400 A – 36V	25 - 500 A	79 V	78/35/49 A	29.5 /18.84 KVA/KW

Nota. Tomado de la ficha técnica del equipo.

Figura 39

Máquina de soldar RH 400



Nota. Fotografía del autor.

B. Máquina de soldar HOBART Beta-Mig (Proceso GMAW)

Para la soldabilidad de las probetas se utilizó una fuente cuyas características son las siguientes:

- Marca: HOBART
- Modelo: Beta-Mig
- Fases: Dos
- Voltaje: 220/240 V
- Puede funcionar con voltaje constante o voltaje variable
- Opera en aplicaciones manuales

Figura 40

Máquina de soldar HOBART Beta-Mig



Nota. Fotografía del autor.

C. Pirómetro óptico

Mide la temperatura de un objeto a distancia comparando el brillo de la radiación térmica emitida por él con la de un filamento interno. Sus especificaciones son:

- Rango de medición: -50°C – 550°C
- Precisión: -50°C – 0°C (±3°C), 0°C – 100°C (±1.5°C), 100°C – 550°C (±1.5%)
- Repetibilidad: 1°C o 1% de lectura
- Resolución: 0.1°C o 0.1°F
- Tiempo de respuesta: 500 mSec, 95% respuesta

Figura 41

Pirómetro óptico



Nota. Fotografía del autor.

D. Equipo de ensayo de doblez

El equipo de ensayo de doblez se encuentra en el laboratorio de un taller de soldadura utilizado para la realización de las pruebas experimentales de la presente investigación, ubicado en las instalaciones de SKF Perú. Este equipo permite aplicar una carga de flexión controlada sobre las probetas soldadas con la finalidad de evaluar su comportamiento mecánico y verificar la presencia de discontinuidades, como grietas, falta de fusión u otras imperfecciones que puedan manifestarse durante el doblado. Su utilización permitió complementar la evaluación de las uniones soldadas obtenidas mediante los procesos SMAW y GMAW.

Figura 42

Equipo de ensayo de doblez



Nota. Fotografía del autor.

E. Yugo de CA para partículas magnéticas

Para este ensayo se utilizó el Yugo B300, equipo destinado a la inspección mediante partículas magnéticas y diseñado para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. El equipo, perteneciente a SKF Perú, fue facilitado para la realización de los ensayos durante uno de los proyectos en los que se participó, permitiendo efectuar las inspecciones correspondientes de acuerdo con el procedimiento establecido.

Figura 43

Yugo de CA



Nota. Fotografía del autor.

4.11.2. Material Base

Para la experimentación se utilizó hierro fundido nodular ASTM A536, grado 60-40-18, proveniente de material sobrante de un proyecto desarrollado en las instalaciones de SKF Perú, en el cual se participó. Dicho material fue destinado para la preparación de las probetas utilizadas en la presente investigación.

La especificación ASTM A536 es emitida por la American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales), organismo internacional referente en la estandarización técnica de materiales, productos, sistemas y procesos de ensaye; dentro de su codificación alfanumérica, el prefijo ASTM acredita la entidad normativa, el prefijo A clasifica formalmente al material dentro de la familia de las aleaciones ferrosas, y la designación numérica 536 corresponde al identificador específico de la norma que rige las especificaciones técnicas y requerimientos de las fundiciones de hierro dúctil (esferoidal).

La composición química correspondiente al material utilizado se detalla en la Tabla 12.

Tabla 12

Composición química del ASTM A536, grado 60-40-18

Elemento (% en peso)	ASTM A536 60-40-18
Carbono (C)	3.2 – 3.9
Silicio (Si)	2.2 – 2.8
Manganeso (Mn)	0.1 – 0.3
Fósforo (P)	≤ 0.08
Azufre (S)	≤ 0.02
Magnesio (Mg)	0.03 – 0.06
Hierro (Fe)	Resto
Aleantes opcionales	–

Fuente. ASTM International (2021).

Tabla 13

Propiedades mecánicas del ASTM A536, grado 60-40-18

Propiedad	Valor
Dureza (HB)	170 - 220
Resistencia a la tracción (MPa)	280 - 470
Energía de Impacto (J)	13
Elongación (%)	20-40
Tenacidad ($MPa \cdot m^{1/2}$)	120

Fuente. ASTM International (2021).

4.11.3. Material de Aporte

La selección de los metales de aporte para los procesos SMAW y GMAW se realizó considerando las características metalúrgicas del hierro fundido nodular ASTM A536, grado 60-40-18, particularmente su elevado contenido de carbono y su sensibilidad a las variaciones térmicas producidas durante la soldadura. Estas características pueden favorecer la formación de zonas endurecidas y estructuras frágiles en las regiones próximas al cordón, incrementando la susceptibilidad a la aparición de fisuras durante el enfriamiento. Por esta razón, se seleccionaron consumibles de base níquel: ENi-CI para SMAW y ERNi-1 para GMAW, debido a su aplicación en la soldadura y reparación de hierros fundidos y a la capacidad de los depósitos ricos en níquel para presentar una adecuada ductilidad y menor tendencia al endurecimiento excesivo en comparación con otros materiales de aporte.

Para el proceso SMAW, se empleó el electrodo ENi-CI, cuya selección estuvo orientada a obtener un depósito con características compatibles con el hierro fundido y a limitar la formación de zonas de elevada dureza asociadas al ciclo térmico de soldadura. Para el proceso GMAW, se utilizó el alambre ERNi-1, seleccionado por su aplicación en la unión y reparación de fundiciones y por permitir un aporte continuo y estable del metal de soldadura. La utilización de consumibles

de base níquel en ambos procesos permitió mantener un criterio de comparación metalúrgicamente consistente entre las dos técnicas de soldadura.

Asimismo, la selección del diámetro del consumible se realizó considerando las características particulares de cada proceso, el rango de corriente empleado, la estabilidad del arco y el control del aporte de calor. El diámetro seleccionado para cada proceso permitió trabajar dentro de un rango operativo adecuado, manteniendo una transferencia de metal estable y evitando incrementos innecesarios del aporte térmico. De esta manera, el diámetro del consumible se mantuvo constante dentro de cada proceso experimental, reduciendo su influencia como variable adicional y permitiendo evaluar con mayor confiabilidad el efecto de las condiciones de soldadura sobre el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) y la distribución de dureza.

A. Para proceso SMAW: Electrodo ENi-CI (Norma AWS A5.15)

Para el proceso SMAW se seleccionó el electrodo ENi-CI, debido a que corresponde a un consumible de base níquel desarrollado para la soldadura de hierros fundidos. Su elección se fundamentó en su capacidad para producir depósitos relativamente dúctiles y con menor tendencia a generar estructuras excesivamente endurecidas en comparación con consumibles ferrosos convencionales. Esta característica resulta importante en la soldadura de la fundición nodular ASTM A536 60-40-18, donde el control de las transformaciones metalúrgicas y de la dureza de las zonas próximas al cordón es fundamental.

El diámetro del electrodo se seleccionó de acuerdo con el rango de corriente establecido para el proceso SMAW y con el objetivo de mantener una adecuada estabilidad del arco y una deposición controlada. En las condiciones experimentales empleadas, las corrientes de 70, 90, 110 y 130 A permitieron establecer diferentes niveles de aporte térmico manteniendo condiciones de soldadura controladas. Por ello, el diámetro seleccionado fue compatible con el rango de corriente

utilizado y permitió evaluar el efecto del incremento del aporte de calor sobre el ancho y la dureza de la ZAC.

En resumen, el electrodo que utilizamos es de alto contenido de níquel para la soldadura de unión y recargue de hierro fundido. Su depósito es maquinable, libre de poros y fisuras. Posee alta ductilidad (mayor a la de los hierros fundidos).

Tabla 14

Composición química del electrodo ENi-CI

Elemento	C	Mn	Si	Ni
%	0.03	0.10	0.15	Resto

Fuente. Soldexa.

Tabla 15

Propiedades mecánicas del electrodo ENi-CI

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción (MPa)	> 140
Límite de fluencia (MPa)	—
Elongación 2" (%)	—
Dureza (HB)	—

Fuente. Soldexa.

B. Para proceso GMAW: Electrodo ERNi-1 (Níquel 99%)

Para el proceso GMAW se seleccionó el alambre ERNi-1, de base níquel, debido a su aplicación en la unión y reparación de materiales ferrosos y a las características metalúrgicas que proporciona al depósito. La selección de este consumible permitió mantener una condición de comparación con el proceso SMAW mediante el empleo de aportes de naturaleza similar, de modo que la comparación experimental se enfocara principalmente en las diferencias propias de cada proceso y en el aporte térmico generado.

El diámetro del alambre se seleccionó considerando la alimentación continua característica del proceso GMAW y los niveles de corriente empleados experimentalmente, correspondientes a 130, 180, 250 y 310 A. El diámetro seleccionado permitió mantener una transferencia metálica estable y una alimentación continua durante los ensayos, posibilitando variar el aporte térmico de manera controlada. De esta forma, se establecieron diferentes condiciones experimentales para determinar la relación entre el aporte de calor neto y el comportamiento de la ZAC en términos de ancho y dureza.

En resumen, se eligió el electrodo AWS ERNi-1, ya que es un alambre de níquel casi puro, diseñado para soldadura MIG/TIG de níquel, aleaciones de níquel y hierro fundido. Su principal ventaja en el hierro fundido nodular es que produce un cordón blando, tenaz y fácilmente mecanizable, con bajo riesgo de fisuración.

Tabla 16

Composición química del electrodo ERNi-1

Elemento	Contenido (%)
Níquel (Ni)	92.0 – 99.0
Carbono (C)	≤ 0.15
Manganeso (Mn)	≤ 2.5
Hierro (Fe)	≤ 1.5
Cobre (Cu)	≤ 1.5
Silicio (Si)	≤ 1.25
Otros	Trazas

Fuente. Soldexa.

4.11.4. Elección de gas protector

Para el proceso GMAW se seleccionó dióxido de carbono (CO_2) como gas de protección, considerando las características del material base, las condiciones de soldadura establecidas y los requerimientos del estudio experimental. El CO_2, al ser un gas activo, proporciona protección al

baño de fusión frente a la contaminación atmosférica y permite obtener una adecuada penetración y estabilidad del arco bajo las condiciones de corriente y voltaje empleadas. Asimismo, su utilización es compatible con el alambre ERNi-1 seleccionado para la soldadura del hierro fundido nodular ASTM A536 grado 60-40-18.

Desde el punto de vista experimental, se mantuvo constante el uso de CO_2 en todas las probetas soldadas mediante GMAW, con el propósito de evitar que el cambio de gas protector introdujera una variable adicional que pudiera modificar la transferencia metálica, el aporte térmico o las características de la ZAC. De esta manera, fue posible analizar de forma más controlada la influencia de las condiciones de soldadura sobre el ancho de la ZAC y la distribución de dureza.

Adicionalmente, la selección del CO_2 consideró un criterio técnico-económico, debido a que es un gas de protección de amplia disponibilidad para aplicaciones de soldadura y presenta un costo generalmente accesible frente a gases inertes como el argón o el helio. Esta característica resulta favorable para aplicaciones industriales de reparación, en las que, además del comportamiento metalúrgico de la unión, se deben considerar la disponibilidad y los costos asociados a los consumibles. Por tanto, la elección del CO_2 permitió establecer una condición de protección adecuada, reproducible y económicamente viable para el desarrollo de la investigación.

4.12. Procedimiento Experimental

4.12.1. Preparación de las Probetas

Las probetas tienen las siguientes características:

- Ancho: 100 mm
- Largo: 200 mm
- Espesor: 6.35 mm

- Material: Hierro fundido nodular ASTM A536, grado 60-40-18
- Cantidad: 8 probetas (4 para cada proceso)

A. Limpieza de las probetas

Antes de la soldadura, los cupones deben estar libres de grasa, aceites, pintura y otras impurezas para evitar la contaminación de los depósitos y la formación de discontinuidades. También se eliminaron las rebabas que quedaron producto del corte. La limpieza se llevó a cabo de forma manual mediante el uso de un disco abrasivo y thinner como disolvente.

B. Preparación de la junta

Las probetas se prepararon con las características que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17

Características de la junta a soldar

Símbolo	Descripción	Probeta de experimentación
a	Abertura o luz de la raíz	3 mm
e	Espesor nominal del material base	6.35 mm
t	Altura de raíz o talón	2 mm
α	Ángulo de la ranura (bisel)	60°

Nota. Elaboración propia.

Figura 44

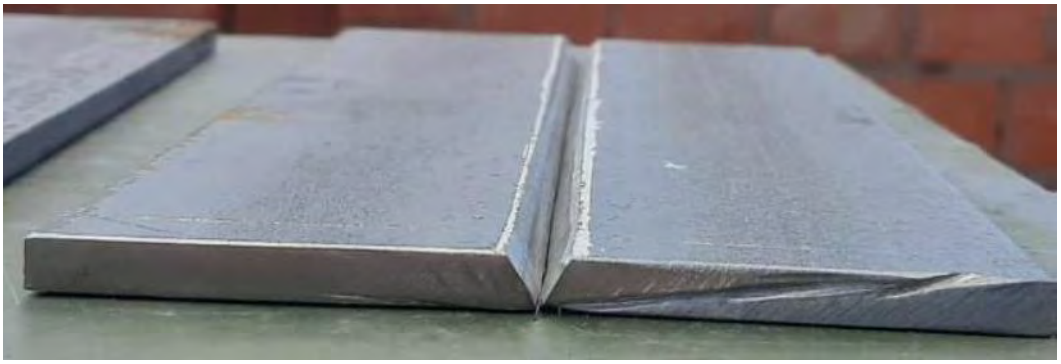
Preparación de las probetas



Nota. Fotografía del autor.

Figura 45

Bisel de las probetas



Nota. Fotografía del autor.

C. Identificación de las probetas

Para un mejor estudio, las probetas se identificaron con letra y un dígito. Para la soldadura se emparejaron las probetas denominándose: PX (X1+X2), PY (Y1+Y2) y PZ (Z1+Z2).

Figura 46

Probetas soldadas



Nota. Fotografía del autor.

4.12.2. Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

Se elaboraron WPS para cada probeta, tanto para el proceso SMAW como para el GMAW, especificando los parámetros de soldadura. A continuación, se presenta los WPS utilizados, así como también un resumen de los parámetros utilizados:

Proceso SMAW:

Probeta 1:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.

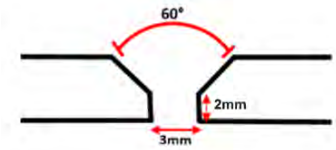
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D11							
Institución:			Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco		**Identificación Nº:**		WPS 01
Proceso de soldadura			SMAW		**Soporte de PQR**		PQR N.º 01
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:
Revisión:	1	Fecha:	04/06/2025		Revisado por:		Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia
DISEÑO DE UNIÓN					**POSICIÓN**		
Tipo de Unión:			A tope		**Ranura:**	1G	**Filete:** N/A
Tipo de Soldadura:			Bisel en "V"		**Plancha:**	N/A	**Tubería:** N/A
Abertura de Raíz:			3 mm		**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS**		
Longitud de Cara de Raíz:			N/A		**Modo de transferencia GMAW:**		**N/A**

Angulo de ranura	60°	**Radio J/U**	--	**Corto Circuito:**		Globular:	Spray:
Soporte:	**No**		**No** X	**Corriente:**	**Proceso SMAW**		
Material de aporte:		ENi-CI		**AC:**	--	**DCEP**	X
Limpieza de Raíz:	-	**Método:**	--	**Pulso:**	--	**DECEN**	--

METAL BASE			**TÉCNICA**			
DATOS	**M.B. 1**		**Aportación:**	**Oscilante:** X	**Recta:**	
Especificación:	ASTM A536		**Limpieza en pases:**	No	**Método**	Cepillo
Grado:	60-40-18		**PRECALENTAMIENTO**			
Espesor	6.35 mm		**Precalentamiento:**	**Si** X	**No**	

METAL DE APORTE		**PROTECCIÓN**			
Especificación AWS:	A5.15	**Fundente:**	--	**Gas:**	--
Clasificación AWS:	ENiCI	**Composición:**	--	**Composición:**	--
Marca:	Oerlikon	**Fundente:**	--	**V. de flujo:**	--
Diámetro del electrodo:	1/8" (3.175 mm)	**Otros:**		**Otros:**	

DETALLES DEL DEPOSITO



PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase N°	Proceso		Metal de aporte		Corriente		Velocidad de avance (mm/seg)
			Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad (AC/DC)	Amperaje (A)	
1	SMAW		ENiCI	1/8	DCEP	70	1.08

Elaborado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Fecha:**	04/06/2025
Aprobado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz SARAVIA	**Institución:**	UNSAAC

Probeta 2:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.

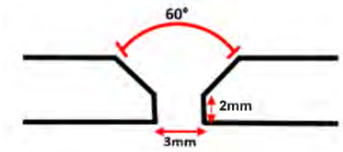
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D11

Institución:	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco	**Identificación Nº:**	WPS 02
Proceso de soldadura	SMAW	**Soporte de PQR**	PQR N.º 02
Tipo: Manual: X	Automático:	Semiautomático:	Maquina:
Revisión: 1	Fecha: 04/06/2025	Revisado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia

DISEÑO DE UNIÓN		**POSICIÓN**			
Tipo de Unión:	A tope	**Ranura:**	1G	**Filete:**	N/A
Tipo de Soldadura:	Bisel en "V"	**Plancha:**	N/A	**Tubería:**	N/A
Abertura de Raíz:	3 mm	**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS**			
Longitud de Cara de Raíz:	N/A	**Modo de transferencia GMAW:**		**N/A**	
Angulo de ranura 60°	**Radio J/U** --	**Corto Circuito:**	Globular:	Spray:	
Soporte: **No**	**No** X	**Corriente:**	**Proceso SMAW**		
Material de aporte:	ENi-CI	**AC:**	--	**DCEP**	X

Limpieza de Raíz:	-	**Método:**	--	**Pulso:**	--	**DECEN**	--
METAL BASE				**TÉCNICA**			
DATOS	**M.B. 1**			**Aportación:**	**Oscilante:** X	**Recta:**	
Especificación:	ASTM A536			**Limpieza en pases:**	No **Método**	Cepillo	
Grado:	60-40-18			**PRECALENTAMIENTO**			
Espesor	6.35 mm			**Precalentamiento:**	**Si** X	**No**	
METAL DE APORTE				**PROTECCIÓN**			
Especificación AWS:	A5.15			**Fundente:**	--	**Gas:**	--
Clasificación AWS:	ENiCI			**Composición:**	--	**Composición:**	--
Marca:	Oerlikon			**Fundente:**	--	**V. de flujo:**	--
Diámetro del electrodo:	1/8" (3.175 mm)			**Otros:**		**Otros:**	

DETALLES DEL DEPOSITO



PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase N°	Proceso		Metal de aporte Clase	Metal de aporte Diámetro (mm)	Corriente Tipo y polaridad (AC/DC)	Corriente Amperaje (A)	Velocidad de avance (mm/seg)
1	SMAW		ENiCI	3.175	DCEP	90	1.08

Elaborado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Fecha:**	04/06/2025
Aprobado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz SARAVIA	**Institución:**	UNSAAC

Probeta 3:

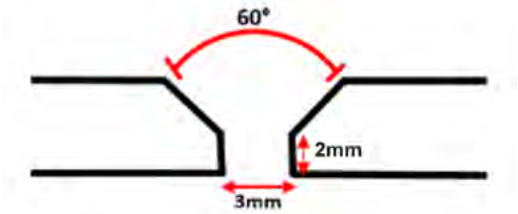
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D11

Institución:	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco			**Identificación Nº:**	WPS 03		
Proceso de soldadura	SMAW			**Soporte de PQR**	PQR N.º 03		
Tipo: Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	
Revisión:	1	Fecha:	04/06/2025	Revisado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia		
DISEÑO DE UNIÓN				**POSICIÓN**			
Tipo de Unión:	A tope			**Ranura:**	1G	**Filete:**	N/A
Tipo de Soldadura:	Bisel en "V"			**Plancha:**	N/A	**Tubería:**	N/A
Abertura de Raíz:	3 mm			**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS**			
Longitud de Cara de Raíz:	N/A			**Modo de transferencia GMAW:**	**N/A**		
Angulo de ranura	60°	**Radio J/U**	--	**Corto Circuito:**	Globular:	Spray:	
Soporte:	**No**	**No**	X	**Corriente:**	**Proceso SMAW**		
Material de aporte:	ENi-CI			**AC:**	--	**DCEP**	X

Limpieza de Raíz:	-	**Método:**	--	**Pulso:**	--	**DECEN**	--
METAL BASE				**TÉCNICA**			
DATOS	**M.B. 1**			**Aportación:**	**Oscilante:** X	**Recta:**	
Especificación:	ASTM A536			**Limpieza en pases:**	No **Método**	Cepillo	
Grado:	60-40-18			**PRECALENTAMIENTO**			
Espesor	6.35 mm			**Precalentamiento:**	**Si** X	**No**	
METAL DE APORTE				**PROTECCIÓN**			
Especificación AWS:	A5.15			**Fundente:**	--	**Gas:**	--
Clasificación AWS:	ENiCI			**Composición:**	--	**Composición:**	--
Marca:	Oerlikon			**Fundente:**	--	**V. de flujo:**	--
Diámetro del electrodo:	1/8" (3.175 mm)			**Otros:**		**Otros:**	

DETALLES DEL DEPOSITO



PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase N°	Proceso		Metal de aporte Clase	Metal de aporte Diámetro (mm)	Corriente Tipo y polaridad (AC/DC)	Corriente Amperaje (A)	Velocidad de avance (mm/seg)
1	SMAW		ENiCI	3.175	DCEP	110	1.08

Elaborado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Fecha:**	04/06/2025
Aprobado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz SARAVIA	**Institución:**	UNSAAC

Probeta 4:

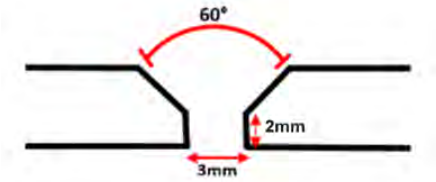
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D11

Institución:		Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco		**Identificación N°:**		WPS 04	
Proceso de soldadura		SMAW		**Soporte de PQR**		PQR N.° 04	
Tipo:	Manual:	X	Automático:	Semiautomático:		Maquina:	
Revisión:	1	Fecha:	04/06/2025	Revisado por:		Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia	
DISEÑO DE UNIÓN				**POSICIÓN**			
Tipo de Unión:		A tope		**Ranura:**	1G	**Filete:**	N/A
Tipo de Soldadura:		Bisel en "V"		**Plancha:**	N/A	**Tubería:**	N/A
Abertura de Raíz:		3 mm		**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS**			
Longitud de Cara de Raíz:		N/A		**Modo de transferencia GMAW:**		**N/A**	
Angulo de ranura	60°	**Radio J/U**	--	**Corto Circuito:**	Globular:		Spray:
Soporte:	**No**	**No**	X	**Corriente:**		**Proceso SMAW**	
Material de aporte:		ENi-CI		**AC:**	--	**DCEP**	X

Limpieza de Raíz:	-	**Método:**	--	**Pulso:**	--	**DECEN**	--
METAL BASE				**TÉCNICA**			
DATOS	**M.B. 1**			**Aportación:**	**Oscilante:** X	**Recta:**	
Especificación:	ASTM A536			**Limpieza en pases:**	No **Método**	Cepillo	
Grado:	60-40-18			**PRECALENTAMIENTO**			
Espesor	6.35 mm			**Precalentamiento:**	**Si** X	**No**	
METAL DE APORTE				**PROTECCIÓN**			
Especificación AWS:	A5.15			**Fundente:**	--	**Gas:**	--
Clasificación AWS:	ENiCI			**Composición:**	--	**Composición:**	--
Marca:	Oerlikon			**Fundente:**	--	**V. de flujo:**	--
Diámetro del electrodo:	1/8" (3.175 mm)			**Otros:**		**Otros:**	

DETALLES DEL DEPOSITO



PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase N°	Proceso		Metal de aporte Clase	Metal de aporte Diámetro (mm)	Corriente Tipo y polaridad (AC/DC)	Corriente Amperaje (A)	Velocidad de avance (mm/seg)
1	SMAW		ENiCI	3.175	DCEP	130	1.08

Elaborado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Fecha:**	04/06/2025
Aprobado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz SARAVIA	**Institución:**	UNSAAC

Proceso GMAW:

Probeta 1:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.

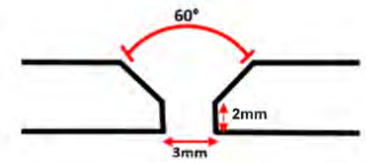
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D11

Institución:		Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco			**Identificación N°:**		WPS 05
Proceso de soldadura		GMAW			**Soporte de PQR**		PQR N.° 01
Tipo:	Manual: X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	
Revisión:	Fecha: 04/06/2025			Revisado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia		

DISEÑO DE UNIÓN		**POSICIÓN**			
Tipo de Unión:	A tope	**Ranura:**	1G	**Filete:**	N/A
Tipo de Soldadura:	Bisel en "V"	**Plancha:**	N/A	**Tubería:**	N/A

Abertura de Raíz:			3 mm		**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS**				
Longitud de Cara de Raíz:			N/A		**Modo de transferencia GMAW:**				
Angulo de ranura	60°	**Radio J/U**		--	**Corto Circuito:**	Globular:		Spray:	X
Soporte:	**No**	**No**		X	**Corriente:**				
Material de aporte:			ERNi-1		**AC:**	--	**DCEP**	X	
Limpieza de Raíz:	-	**Método:**		--	**Pulso:**	--	**DECEN**	--	
METAL BASE					**TÉCNICA**				
DATOS	**M.B. 1**				**Técnica**	**Oscilante: X**		**Recta:**	
Especificación:	ASTM A536				**Limpieza en pases:**	No	**Método**	-----	
Grado:	60-40-18				**PRECALENTAMIENTO**				
Espesor	6.35 mm				**Precalentamiento:**	**Si**	X	**No**	
METAL DE APORTE					**PROTECCIÓN**				
Especificación AWS:			A5.15		**Fundente:**	--	**Gas:**	CO_2	
Clasificación AWS:			ERNi-1		**Composición:**	--	**Composición:**	--	
Marca:			Oerlikon		**Fundente:**	--	V. de flujo (l/min)	12	
Diámetro del alambre			1.0		**Otros:**	---	**Otros:**	---	

DETALLES DEL DEPOSITO



PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase N°	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Velocidad de avance del alambre (mm/seg)
		Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad (AC/DC)	Amperaje (A)	
1	GMAW	ERNi-1	1.0	DCEP	130	3.333

Elaborado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Fecha:**	04/06/2025
Aprobado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia	**Institución:**	UNSAAC

Probeta 2:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D11

Institución:			Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco		**Identificación N°:**	WPS 06	
Proceso de soldadura			GMAW		**Soporte de PQR**	PQR N.° 02	
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:

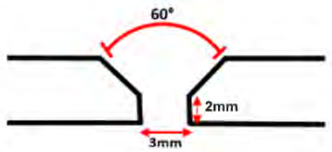
Revisión:	1	04/06/2025	Revisado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia

DISEÑO DE UNIÓN				**POSICIÓN**			
Tipo de Unión:		A tope		**Ranura:**	1G	**Filete:**	N/A
Tipo de Soldadura:		Bisel en "V"		**Plancha:**	N/A	**Tubería:**	N/A
Abertura de Raíz:		3 mm		**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS**			
Longitud de Cara de Raíz:		N/A		**Modo de transferencia GMAW:**			
Angulo de ranura	60°	**Radio J/U**	--	**Corto Circuito:**	Globular:	Spray:	X
Soporte:	**No**	**No**	X	**Corriente:**			
Material de aporte:		ERNi-1		**AC:**	--	**DCEP**	X
Limpieza de Raíz:	-	**Método:**	--	**Pulso:**	--	**DCEN**	--

METAL BASE			**TÉCNICA**			
DATOS	**M.B. 1**		**Técnica**	**Oscilante: X**		**Recta:**
Especificación:	ASTM A536		**Limpieza en pases:**	No	**Método**	-----
Grado:	60-40-18		**PRECALENTAMIENTO**			
Espesor	6.35 mm		**Precalentamiento:**	**Si**	X	**No**

METAL DE APORTE		**PROTECCIÓN**			
Especificación AWS:	A5.15	**Fundente:**	--	**Gas:**	CO_2
Clasificación AWS:	ERNi-1	**Composición:**	--	**Composición:**	--
Marca:	Oerlikon	**Fundente:**	--	V. de flujo (l/min)	12
Diámetro del alambre	1.0	**Otros:**	---	**Otros:**	---

DETALLES DEL DEPOSITO



PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase N°	**Proceso**	**Metal de aporte**		**Corriente**		**Velocidad de avance del alambre (mm/seg)**
		Clase	**Diámetro (mm)**	**Tipo y polaridad (AC/DC)**	**Amperaje (A)**	
1	GMAW	ERNi-1	1.0	DCEP	180	3.333

Elaborado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Fecha:**	04/06/2025
Aprobado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia	**Institución:**	UNSAAC

Probeta 3:

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D11

Institución:		Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco			**Identificación Nº:**	WPS 07	
Proceso de soldadura		GMAW			**Soporte de PQR**	PQR N.º 03	
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:
Revisión:	1	04/06/2025			Revisado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia	

DISEÑO DE UNIÓN

Tipo de Unión:	A tope		
Tipo de Soldadura:	Bisel en "V"		
Abertura de Raíz:	3 mm		
Longitud de Cara de Raíz:	N/A		
Angulo de ranura	60°	**Radio J/U**	--
Soporte:	**No**	**No**	X
Material de aporte:	ERNi-1		
Limpieza de Raíz:	-	**Método:**	--

POSICIÓN

Ranura:	1G	**Filete:**	N/A
Plancha:	N/A	**Tubería:**	N/A

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modo de transferencia GMAW:			
Corto Circuito:	Globular:	Spray:	X
Corriente:			
AC:	--	**DCEP**	X
Pulso:	--	**DECEN**	--

METAL BASE

DATOS	**M.B. 1**
Especificación:	ASTM A536
Grado:	60-40-18
Espesor	6.35 mm

TÉCNICA

Técnica	**Oscilante: X**		**Recta:**
Limpieza en pases:	No	**Método**	-----

PRECALENTAMIENTO

Precalentamiento:	**Si**	X	**No**

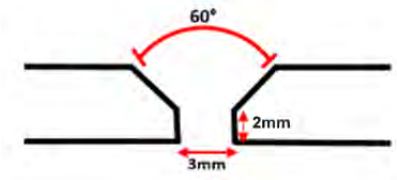
METAL DE APORTE

Especificación AWS:	A5.15		
Clasificación AWS:	ERNi-1		
Marca:	Oerlikon		
Diámetro del alambre	1.0		

PROTECCIÓN

Fundente:	--	**Gas:**	CO_2
Composición:	--	**Composición:**	--
Fundente:	--	V. de flujo (l/min)	12
Otros:	---	**Otros:**	---

DETALLES DEL DEPOSITO



PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase N°	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Velocidad de avance del alambre (mm/seg)
		Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad (AC/DC)	Amperaje (A)	
1	GMAW	ERNi-1	1.0	DCEP	250	3.333

Elaborado por:		**Fecha:**	04/06/2025

	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.		
Aprobado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia	**Institución:**	UNSAAC

Probeta 4:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA
AWS D11

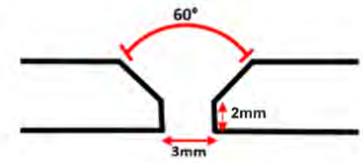
Institución:		Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco			**Identificación Nº:**	WPS 08	
Proceso de soldadura		GMAW			**Soporte de PQR**	PQR N.º 04	
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:
Revisión:	1	04/06/2025			Revisado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia	

DISEÑO DE UNIÓN				**POSICIÓN**			
Tipo de Unión:	A tope			**Ranura:**	1G	**Filete:**	N/A
Tipo de Soldadura:	Bisel en "V"			**Plancha:**	N/A	**Tubería:**	N/A
Abertura de Raíz:	3 mm			**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS**			
Longitud de Cara de Raíz:	N/A			**Modo de transferencia GMAW:**			
Angulo de ranura	60°	**Radio J/U**	--	**Corto Circuito:**	Globular:	Spray:	X
Soporte:	**No**	**No**	X	**Corriente:**			
Material de aporte:	ERNi-1			**AC:**	--	**DCEP**	X
Limpieza de Raíz:	-	**Método:**	--	**Pulso:**	--	**DECEN**	--

METAL BASE			**TÉCNICA**			
DATOS	**M.B. 1**		**Técnica**	**Oscilante: X**		**Recta:**
Especificación:	ASTM A536		**Limpieza en pases:**	No	**Método**	-----
Grado:	60-40-18		**PRECALENTAMIENTO**			
Espesor	6.35 mm		**Precalentamiento:**	**Si**	X	**No**

METAL DE APORTE		**PROTECCIÓN**			
Especificación AWS:	A5.15	**Fundente:**	--	**Gas:**	CO_2
Clasificación AWS:	ERNi-1	**Composición:**	--	**Composición:**	--
Marca:	Oerlikon	**Fundente:**	--	V. de flujo (l/min)	12
Diámetro del alambre	1.0	**Otros:**	---	**Otros:**	---

DETALLES DEL DEPOSITO



PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						
Pase N°	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Velocidad de avance del alambre (mm/seg)
		Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad (AC/DC)	Amperaje (A)	
1	GMAW	ERNi-1	1.0	DCEP	310	3.333
Elaborado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Fecha:**	04/06/2025	
Aprobado por:	Mgt. Eduardo F. Ortiz Saravia			**Institución:**	UNSAAC	

Tabla 18

Parámetros de soldadura del proceso SMAW

Probeta	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad (mm/seg)	Electrodo	Polaridad
1	70	20	1.08	ENi-CI	DCEP
2	90	22	1.08	ENi-CI	DCEP
3	110	24	1.08	ENi-CI	DCEP
4	130	26	1.08	ENi-CI	DCEP

Nota. Elaboración propia.

La velocidad de avance se estableció como un parámetro de referencia para cada proceso de soldadura, considerando las condiciones operativas propias de SMAW y GMAW. Para SMAW se consideró una velocidad de avance de 1.08 mm/s, mientras que para GMAW se consideró una velocidad de 3.333 mm/s. Estos valores fueron utilizados en el cálculo del aporte de calor neto de cada condición experimental.

La velocidad de avance no constituyó la variable independiente del estudio, por lo que se mantuvo como condición de referencia dentro de cada proceso, mientras que la corriente fue modificada entre las diferentes probetas. De esta manera, al mantener la velocidad de avance y los demás parámetros de cálculo como condiciones de referencia, la variación de la corriente permitió

generar diferentes niveles de aporte de calor neto y evaluar su influencia sobre el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC).

La diferencia de velocidad entre SMAW y GMAW se debe a las características operativas de cada proceso y a las condiciones experimentales establecidas para su ejecución. Por tanto, no se consideró que ambos procesos debieran emplear una misma velocidad de avance, sino que cada proceso contó con su propia condición de referencia para el desarrollo del estudio.

Tabla 19

Parámetros de soldadura del proceso GMAW

Probeta	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/seg)	Alambre	Polaridad	Gas
1	130	28	3.333	ERNi-1	DCEP	CO_2
2	180	28	3.333	ERNi-1	DCEP	CO_2
3	250	28	3.333	ERNi-1	DCEP	CO_2
4	310	28	3.333	ERNi-1	DCEP	CO_2

Nota. Elaboración propia.

4.12.3. Cálculo del Calor Neto Aportado

El calor neto aportado se calculó mediante la ecuación:

$$Hnet = \frac{V \times I}{v} \times f$$

Donde f = 0.75 para SMAW y f = 0.85 para GMAW (García, 2010).

- **Proceso SMAW:**

Probeta 1: $Hneto = \frac{70 \times 20}{1.08} \times 0.75 = 972.22\, J/mm$

Probeta 2: $Hneto = \frac{90 \times 22}{1.08} \times 0.75 = 1375.0\, J/mm$

Probeta 3: $Hneto = \frac{110 \times 24}{1.08} \times 0.75 = 1833.33\, J/mm$

Probeta 4: $Hneto = \frac{130 \times 26}{1.08} \times 0.75 = 2347.22\, J/mm$

- **Proceso GMAW:**

Probeta 1: $Hneto = \frac{130 \times 28}{3.333} \times 0.85 = 929.12\, J/mm$

Probeta 2: $Hneto = \frac{180 \times 28}{3{,}333} \times 0.85 = 1286.48\, J/mm$

Probeta 3: $Hneto = \frac{250 \times 28}{3{,}333} \times 0.85 = 1786.78\, J/mm$

Probeta 4: $Hneto = \frac{310 \times 28}{3{,}333} \times 0.85 = 2215.61\, J/mm$

En la Tabla 20 se resumen los resultados del aporte de calor (J/mm) en los procesos SMAW y GMAW:

Tabla 20

Resumen del aporte de calor en los procesos SMAW y GMAW

Probeta	Proceso SMAW (J/mm)	Proceso GMAW (J/mm)
1	972.22	929.12
2	1375.00	1286.48
3	1873.33	1786.78
4	2347.22	2215.61

Nota. Elaboración propia.

4.12.4. Cálculo del Ancho de la ZAC

El ancho de la ZAC se calculó mediante la ecuación propuesta por Fosca (2005):

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_0}\right) - \left(\frac{1}{T_f - T_0}\right)\right] \times \left[\frac{H_{net}}{4{,}13 \times \rho C \times t}\right]$$

Valores utilizados:

- T ambiente (promedio) = 15°C

- T fusión = 1200°C
- ρ·C = 0.0034 J/mm³·°C
- t (espesor) = 6.35 mm
- T_max = 723°C
- K= 0.05 J/mm·s·°C

A. Cálculos para el proceso SMAW:

Probeta 1:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-300}\right) - \left(\frac{1}{1200-300}\right)\right] \times \left[\frac{972{,}22}{4{,}13 \times 0.0034 \times 6.35}\right] = 13.66\ mm$$

Probeta 2:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-300}\right) - \left(\frac{1}{1200-300}\right)\right] \times \left[\frac{1375.0}{4{,}13 \times 0.0034 \times 6.35}\right] = 19.32\ mm$$

Probeta 3:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-300}\right) - \left(\frac{1}{1200-300}\right)\right] \times \left[\frac{1873.33}{4{,}13 \times 0.0034 \times 6.35}\right] = 26.32\ mm$$

Probeta 4:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-300}\right) - \left(\frac{1}{1200-300}\right)\right] \times \left[\frac{2347.22}{4{,}13 \times 0.0034 \times 6.35}\right] = 32.98\ mm$$

B. Cálculos para el proceso GMAW (MAG):

Probeta 1:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-300}\right) - \left(\frac{1}{1200-300}\right)\right] \times \left[\frac{929.12}{4{,}13 \times 0.0034 \times 6.35}\right] = 13.055\ mm$$

Probeta 2:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-300}\right) - \left(\frac{1}{1200-300}\right)\right] \times \left[\frac{1286.48}{4{,}13 \times 0.0034 \times 6.35}\right] = 18.077\ mm$$

Probeta 3:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-300}\right) - \left(\frac{1}{1200-300}\right)\right] \times \left[\frac{1786.78}{4{,}13 \times 0.0034 \times 6.35}\right] = 25.107\ mm$$

Probeta 4:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-300}\right) - \left(\frac{1}{1200-300}\right)\right] \times \left[\frac{2215.61}{4{,}13 \times 0.0034 \times 6.35}\right] = 31.133\ mm$$

En la Tabla 21 se resume los valores del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) de los procesos SMAW y GMAW.

Tabla 21

Resumen del ancho de la ZAC en los procesos SMAW y GMAW

Probeta	Ancho ZAC SMAW (mm)	Ancho ZAC GMAW (mm)
1	13.66	13.05
2	19.32	18.07
3	26.32	25.10
4	32.98	31.13

Nota. Elaboración propia.

4.13. Control de Calidad de las Probetas

4.13.1. Inspección Visual

La inspección visual se empleó para verificar la calidad del depósito, constituyendo una etapa esencial dentro del control de calidad aplicado. Este ensayo no destructivo permite detectar discontinuidades presentes en las superficies visibles de los materiales. La inspección se realizó siguiendo los criterios de aceptación de la norma AWS D1.1 (American Welding Society, 2015), evaluando aspectos como: presencia de grietas, porosidad, socavadura, falta de fusión, falta de penetración y apariencia general del cordón.

4.13.2. Ensayo por Partículas Magnéticas

Para realizar este ensayo se siguió el siguiente procedimiento según ASTM E709 (ASTM International, 2020):

1. **Limpieza de la superficie:** Se realizó utilizando un cepillo de acero para eliminar la escoria y los óxidos, seguido de limpieza con disolvente (thinner).
2. **Ajuste del yugo:** Las patas del yugo se ajustaron a una distancia equidistante del cordón (3.5 cm a cada lado).
3. **Magnetización:** Se magnetizó la probeta objeto de ensayo.
4. **Aplicación de partículas:** Se aplicaron partículas fluorescentes por su alta sensibilidad.
5. **Inspección:** Después de pasar el yugo a lo largo del cordón, se retiró el exceso de partículas.
6. **Observación:** La observación se realizó en los bordes del cordón bajo luz ultravioleta; la acumulación de partículas indicó la existencia de discontinuidades (grietas, fisuras, poros).
7. **Evaluación:** Se registraron las indicaciones encontradas.

4.13.3. Ensayo de Dureza

Se realizaron mediciones de dureza Rockwell B (HRB) en las diferentes zonas de las probetas soldadas, de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma ASTM E18 (ASTM International, 2020).

- Metal base (zona no afectada térmicamente)
- ZAC (lado izquierdo y derecho)
- Depósito de soldadura

Las mediciones se realizaron por triplicado en cada zona, calculando el valor promedio y la desviación estándar.

4.13.4. Análisis Metalográfico

Se prepararon secciones transversales de las probetas soldadas para el análisis metalográfico, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Corte: Se cortaron secciones transversales de las probetas soldadas.
2. Desbaste: Se realizó desbaste con papel abrasivo de granulometría decreciente (80 a 1200).
3. Pulido: Se pulió con paño y pasta de diamante (6 μm y 1 μm).
4. Ataque químico: Se atacó con Nital 2% (ácido nítrico al 2% en alcohol) durante 10-15 segundos.
5. Observación: Se observó la microestructura en un microscopio óptico con micrómetro calibrado, identificando las fases presentes y midiendo el ancho de la ZAC.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Resultados de la Inspección Visual

La inspección visual se realizó en las 8 probetas soldadas, evaluando la calidad superficial de los cordones de soldadura. Los resultados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22

Resultados de la inspección visual

Probeta	Proceso	Discontinuidad	Causa	Aspecto del cordón	Evaluación
1	SMAW	Falta de fusión	Intensidad de corriente baja	Mala apariencia superficial	No aceptable
2	SMAW	Sin defectos relevantes	Velocidad de soldeo aceptable	Cordón uniforme, liso y de buen acabado	Aceptable
3	SMAW	Sin defectos relevantes	Intensidad de corriente aceptable	Penetración y perfil adecuados	Aceptable
4	SMAW	Sin defectos relevantes	Parámetros adecuados	Cordón uniforme, liso y de buen acabado	Aceptable
1	GMAW	Sin defectos relevantes	Parámetros adecuados	Cordón uniforme, perfil adecuado	Aceptable
2	GMAW	Sin defectos relevantes	Parámetros adecuados	Cordón uniforme, perfil adecuado	Aceptable
3	GMAW	Sin defectos relevantes	Parámetros adecuados	Cordón uniforme, perfil adecuado	Aceptable
4	GMAW	Sin defectos relevantes	Parámetros adecuados	Cordón uniforme, perfil adecuado	Aceptable

Nota. Elaboración propia.

En la probeta 1 del proceso SMAW se evidenció una falta de fusión, atribuida a una intensidad de corriente baja (70 A), lo cual generó una mala apariencia superficial y un cordón con

fusión incompleta, escasa dilución y poca penetración. Este tipo de discontinuidad puede comprometer la integridad metalúrgica de la unión, favoreciendo la aparición de zonas débiles y la disminución de la resistencia mecánica. Por tanto, se considera una condición no aceptable, que requiere la corrección del parámetro de corriente.

En las probetas 2, 3 y 4 del proceso SMAW, así como en todas las probetas del proceso GMAW, no se identificaron defectos relevantes, obteniéndose cordones uniformes, lisos y de buen acabado. En ambos casos, los parámetros de intensidad de corriente, velocidad y ángulo de soldeo fueron adecuados, con penetración y perfil correctos.

5.2. Resultados del Ensayo por Partículas Magnéticas

El ensayo por partículas magnéticas se aplicó a las uniones soldadas obtenidas mediante los procesos SMAW y GMAW, con el propósito de detectar posibles discontinuidades superficiales y subsuperficiales. Los resultados se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Resultados del ensayo por partículas magnéticas

Probeta	Proceso SMAW	Proceso GMAW
1	Mayor número de fisuras	Escaso o casi nula presencia de fisuras
2	Presencia de poros	No existe presencia de poros
3	Presencia de inclusiones de escoria	No presenta inclusiones de escoria
4	Perfil del cordón más ancho	Perfil del cordón menos ancho

Nota. Elaboración propia.

Los resultados evidencian diferencias significativas en la calidad superficial de los cordones según el proceso utilizado. El proceso SMAW presentó mayor número de fisuras (probeta 1), presencia de poros (probeta 2) e inclusiones de escoria (probeta 3), mientras que el

proceso GMAW mostró una calidad superficial superior con escasa o nula presencia de discontinuidades.

En la probeta 1, el proceso SMAW presentó un mayor número de fisuras, mientras que el proceso GMAW mostró una presencia escasa o casi nula de dichas discontinuidades. Este comportamiento se atribuye a la mayor estabilidad del arco y menor variabilidad térmica del proceso GMAW, que reduce los gradientes de temperatura y las tensiones residuales responsables de la formación de fisuras.

En la probeta 2, se detectó presencia de poros en el cordón obtenido por SMAW, mientras que el cordón correspondiente al proceso GMAW no presentó porosidad visible. Esto puede explicarse por la naturaleza del recubrimiento del electrodo revestido, que genera gases protectores de manera menos controlada, pudiendo originar atrapamiento de gas durante la solidificación del metal fundido.

En la probeta 3, se revelaron inclusiones de escoria en el cordón realizado por el proceso SMAW, defectos que no se observaron en el GMAW. Las inclusiones se relacionan con una limpieza inadecuada entre pasadas o una técnica de escoriado deficiente, propias del proceso con electrodo revestido.

En la probeta 4, se observó que el perfil del cordón obtenido mediante SMAW fue más ancho que el logrado con GMAW. Esta diferencia se asocia al mayor aporte térmico y menor control en la distribución del metal fundido que caracteriza al proceso SMAW.

La susceptibilidad a la formación de fisuras durante la soldadura del hierro fundido nodular ASTM A536, grado 60-40-18, está relacionada principalmente con su composición química y con las transformaciones metalúrgicas producidas durante el ciclo térmico de soldadura. El elevado

contenido de carbono del material base puede favorecer la formación de zonas endurecidas y de menor ductilidad en las regiones próximas al cordón, particularmente durante el enfriamiento.

Asimismo, el calentamiento localizado generado durante la soldadura produce una expansión térmica del material, seguida de una contracción durante el enfriamiento y la solidificación. Esta contracción puede generar tensiones residuales de tracción en el cordón y en la zona afectada por el calor (ZAC). Cuando estas tensiones se concentran en regiones con baja capacidad de deformación, pueden favorecer la iniciación y propagación de fisuras.

El riesgo de fisuración también puede verse influenciado por el aporte de calor y la velocidad de enfriamiento. Las variaciones de corriente empleadas en las diferentes condiciones experimentales modificaron el aporte de calor neto, generando diferentes condiciones térmicas en el material. Por ello, el control de los parámetros de soldadura resulta fundamental para limitar transformaciones microestructurales desfavorables y reducir la concentración de tensiones durante el enfriamiento.

En el presente estudio, aunque la susceptibilidad metalúrgica del hierro nodular permite explicar la posibilidad de formación de fisuras durante el proceso de soldadura, la discontinuidad identificada en la probeta SMAW 1 correspondió a falta de fusión, asociada a la baja intensidad de corriente empleada. Las demás probetas no presentaron defectos relevantes bajo las condiciones de inspección realizadas. Por tanto, los resultados obtenidos no permiten afirmar que todos los cordones presentaron fisuras, sino que evidencian la necesidad de controlar las condiciones térmicas y los parámetros de soldadura para evitar discontinuidades en las uniones.

5.3. Resultados del Ensayo de Dureza

Se realizaron mediciones de dureza Rockwell B (HRB) en las diferentes zonas de las probetas soldadas: metal base, ZAC (lado izquierdo), depósito de soldadura y ZAC (lado derecho). Los resultados se presentan en las Tablas 24 y 25.

Tabla 24

Resultados del ensayo de dureza - Proceso SMAW

Probeta	Ancho ZAC (mm)	ZAC Izquierdo (HRB)	Depósito (HRB)	ZAC Derecho (HRB)	Metal base (HRB)
1	13.66	96.00	96.00	96.00	85.00
2	19.32	90.50	92.78	91.00	85.00
3	26.32	86.31	88.79	86.32	85.00
4	32.98	85.00	85.00	85.01	85.00

Nota. Elaboración propia.

Tabla 25

Resultados del ensayo de dureza - Proceso GMAW

Probeta	Ancho ZAC (mm)	ZAC Izquierdo (HRB)	Depósito (HRB)	ZAC Derecho (HRB)	Metal base (HRB)
1	13.80	95.92	95.92	95.92	85.00
2	19.12	90.70	92.89	91.00	85.00
3	26.55	86.22	88.66	86.31	85.00
4	32.93	85.00	85.03	85.01	85.00

Nota. Elaboración propia.

Para anchos pequeños de ZAC (probeta 1, ~13.7 mm), la dureza de la ZAC es prácticamente igual a la del depósito (~96 HRB), lo que indica una transición térmica abrupta y una zona afectada con microestructura similar a la del metal depositado. A medida que el ancho de la ZAC aumenta (probetas 2, 3 y 4), la dureza disminuye progresivamente hasta alcanzar el valor del metal base (85 HRB). Este comportamiento es consistente con el efecto del aporte térmico

y la velocidad de enfriamiento: un mayor aporte de calor implica un enfriamiento más lento, lo que genera una microestructura más blanda en la ZAC.

Comparando ambos procesos, el SMAW presenta una pendiente de disminución de dureza ligeramente más pronunciada que el GMAW, lo que indica que la dureza del SMAW es más sensible al aumento del ancho de la ZAC. Esto sugiere que el proceso GMAW ofrece una distribución térmica más uniforme y un control más preciso de la microestructura resultante.

5.4. Resultados del Cálculo del Calor Aportado

Los resultados del cálculo del calor neto aportado para ambos procesos se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26

Aporte de calor en los procesos SMAW y GMAW

Probeta	Proceso SMAW (J/mm)	Proceso GMAW (J/mm)
1	972.22	929.12
2	1375.00	1286.48
3	1873.33	1786.78
4	2347.22	2215.61

Nota. Elaboración propia.

Los valores del aporte de calor para ambos procesos son similares en cada nivel de energía. Se observa un incremento progresivo desde la probeta 1 hasta la probeta 4 en ambos procesos, lo que refleja una mayor energía aportada o mayor temperatura máxima alcanzada. Esta correlación es consistente con el comportamiento esperado en materiales ferrosos bajo condiciones de soldadura con distintos niveles de energía.

Al comparar ambos métodos, se observa que los valores correspondientes al proceso GMAW son ligeramente superiores en las probetas 1 y 3, mientras que en las probetas 2 y 4 las diferencias con respecto al proceso SMAW son mínimas o prácticamente iguales. Esta tendencia

indica que ambos procesos generan comportamientos térmicos muy similares, aunque GMAW tiende a presentar una ligera ventaja en la eficiencia de transferencia de calor y estabilidad del arco.

5.5. Resultados del Ancho de la ZAC

Los resultados del cálculo del ancho de la ZAC para ambos procesos se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27

Ancho de la ZAC en los procesos SMAW y GMAW

Probeta	Ancho ZAC SMAW (mm)	Ancho ZAC GMAW (mm)
1	13.66	13.05
2	19.32	18.07
3	26.32	25.10
4	32.98	31.13

Nota. Elaboración propia.

Se observa un incremento progresivo del ancho de la ZAC desde la probeta 1 hasta la probeta 4 para ambos procesos, lo que indica una correlación directa entre el aumento del aporte de calor y la extensión térmica de la ZAC. Las diferencias entre ambos procesos son mínimas, con valores prácticamente equivalentes en todas las probetas, lo que sugiere que, bajo las mismas condiciones de energía aportada, ambos procesos generan una distribución térmica similar en el material base.

CAPÍTULO VI

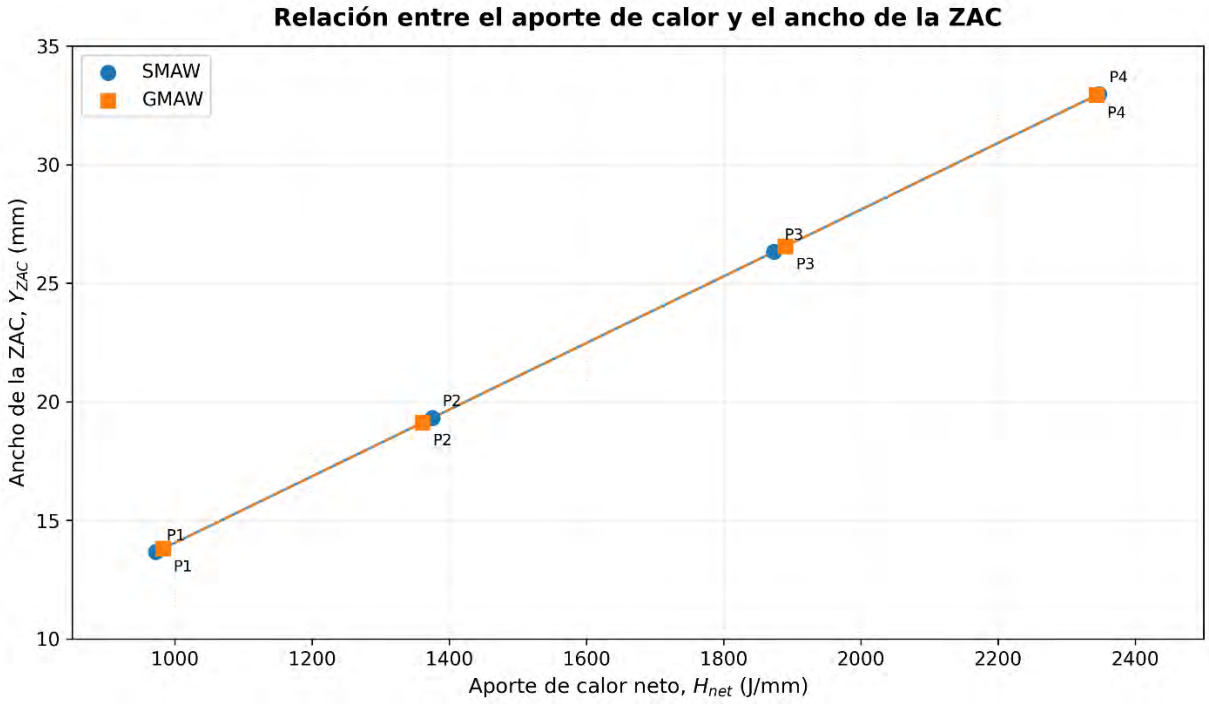
DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Análisis del Calor Aportado y su Relación con el Ancho de la ZAC

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran una relación directa entre el aporte de calor y el ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en ambos procesos de soldadura. A medida que el aporte de calor aumenta, el ancho de la ZAC se incrementa de manera proporcional, lo que es consistente con los fundamentos teóricos de la metalurgia de la soldadura (Fosca Pastor, Introduccion a la metalurgia de la soldadura, 2005).

Figura 47

Relación entre el aporte de calor y el ancho de la ZAC



Nota. Elaboración propia.

Se observa que, para valores similares de aporte de calor, el proceso GMAW genera una ZAC ligeramente más estrecha que el proceso SMAW, lo que puede atribuirse a la mayor

eficiencia térmica del GMAW (70-85%) en comparación con el SMAW (70-80%) (García, 2010). Esta mayor eficiencia permite una transferencia de calor más controlada y concentrada, reduciendo la extensión de la zona afectada térmicamente.

En el caso de la probeta 1, el aporte de calor fue de 972.22 J/mm para SMAW y 929.12 J/mm para GMAW, generando anchos de ZAC de 13.66 mm y 13.05 mm, respectivamente. Para la probeta 4, el aporte de calor fue de 2347.22 J/mm para SMAW y 2215.61 J/mm para GMAW, generando anchos de ZAC de 32.98 mm y 31.13 mm, respectivamente. Estos valores demuestran que, aunque el ancho de ZAC aumenta con el aporte de calor, la relación no es perfectamente lineal, ya que factores como la conductividad térmica del material y la eficiencia del proceso influyen en la extensión real de la ZAC.

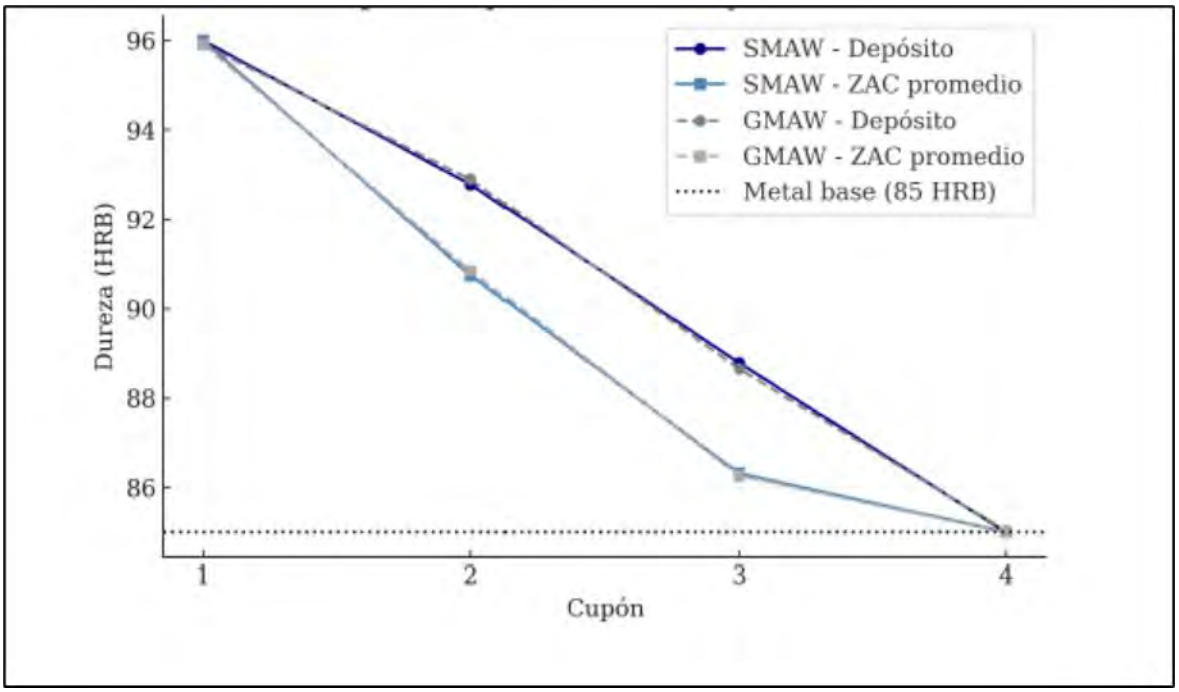
Las diferencias en el ancho de la ZAC entre ambos procesos son relativamente pequeñas, encontrándose aproximadamente entre 4 % y 6 %, lo que sugiere que, bajo condiciones controladas, ambos procesos pueden generar resultados comparables en términos de extensión de la ZAC. Esto coincide con lo reportado por Zúñiga (2015) y Loachamín (2018) en sus estudios sobre soldadura de hierro nodular, quienes encontraron que los anchos de ZAC en SMAW y GMAW para materiales similares eran comparables cuando los parámetros de soldadura estaban optimizados.

6.2. Análisis de la Distribución de Dureza

La evaluación de la dureza transversal reveló patrones consistentes en ambos procesos. Para anchos pequeños de ZAC (probeta 1, ~13.7 mm), la dureza de la ZAC es prácticamente igual a la del depósito (~96 HRB), lo que indica una transición térmica abrupta y una zona afectada con microestructura similar a la del metal depositado.

Figura 48

Perfil de dureza en los procesos SMAW y GMAW



Nota. Elaboración propia.

A medida que el ancho de la ZAC aumenta (probetas 2, 3 y 4), la dureza disminuye progresivamente hasta alcanzar el valor del metal base (85 HRB). Este comportamiento es consistente con el efecto del aporte térmico y la velocidad de enfriamiento: un mayor aporte de calor implica un enfriamiento más lento, lo que genera una microestructura más blanda en la ZAC.

La disminución de la dureza en la ZAC puede atribuirse a la formación de estructuras más blandas como ferrita y perlita, en lugar de estructuras más duras como martensita o bainita. Este fenómeno ha sido documentado en la literatura especializada (Fosca, 2005; Rodríguez, 2013), donde se indica que la velocidad de enfriamiento en la ZAC determina la microestructura final y, por tanto, la dureza resultante.

Comparando ambos procesos, el SMAW presenta una pendiente de disminución de dureza ligeramente más pronunciada que el GMAW, lo que indica que la dureza del SMAW es más

sensible al aumento del ancho de la ZAC. Esto sugiere que el proceso GMAW ofrece una distribución térmica más uniforme y un control más preciso de la microestructura resultante. Esta observación coincide con los hallazgos de Hariprasath et al. (2022), quienes encontraron que las uniones GMAW presentaban propiedades mecánicas más homogéneas que las uniones SMAW.

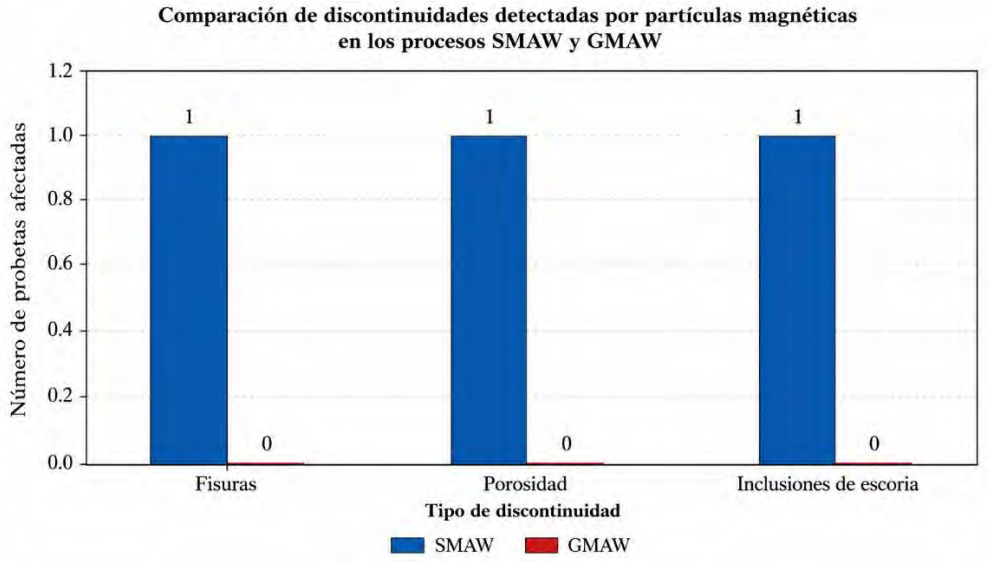
En términos cuantitativos, para la probeta 2, el SMAW mostró una dureza en la ZAC de 90.50 HRB, mientras que el GMAW mostró 90.70 HRB; para la probeta 3, los valores fueron 86.31 HRB (SMAW) y 86.22 HRB (GMAW). Estas diferencias son pequeñas pero consistentes, sugiriendo una ventaja marginal del GMAW en términos de homogeneidad.

6.3. Análisis de las Discontinuidades Detectadas

Los ensayos por partículas magnéticas revelaron diferencias significativas entre los procesos. El proceso SMAW presentó mayor número de fisuras (probeta 1), presencia de poros (probeta 2) e inclusiones de escoria (probeta 3), mientras que el proceso GMAW mostró una calidad superficial superior con escasa o nula presencia de discontinuidades.

Figura 49

Comparación de discontinuidades entre procesos



Nota. Elaboración propia.

Estos resultados pueden explicarse por las características inherentes de cada proceso:

1. **Estabilidad del arco:** El GMAW ofrece un arco más estable y controlable, reduciendo las fluctuaciones térmicas que favorecen la formación de fisuras. La alimentación continua del electrodo y la regulación automática de los parámetros en GMAW permiten mantener condiciones de soldadura más constantes (American Welding Society, 2016).
2. **Atmósfera de protección:** El gas protector continuo en GMAW (CO_2 en este estudio) proporciona una protección más efectiva contra la contaminación atmosférica, reduciendo la formación de poros. En SMAW, la protección generada por el revestimiento del electrodo es menos consistente, especialmente en condiciones de baja corriente (Jeffus, 2009).
3. **Ausencia de escoria:** El GMAW, al no generar escoria, elimina el riesgo de inclusiones de escoria, un problema común en SMAW debido al revestimiento del electrodo. En SMAW, la escoria debe ser removida entre pasadas, y una limpieza deficiente puede resultar en inclusiones (Echevarria, 2002).
4. **Control del aporte de calor:** El GMAW permite un control más preciso del aporte de calor mediante la regulación de la velocidad de alimentación del alambre y el voltaje, lo que reduce la extensión de la ZAC y las tensiones residuales asociadas.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Loachamín (2018), quien encontró que las soldaduras realizadas con electrodos de níquel (ENi-CI) presentaban menos defectos que aquellas realizadas con electrodos de acero inoxidable. También son consistentes con los resultados de Omiogbemi et al. (2025), quienes encontraron que el SMAW mostró una excelente resistencia a la corrosión en comparación con el GMAW, pero con mayor presencia de defectos superficiales.

6.4. Comparación de los Procesos SMAW y GMAW

Los resultados obtenidos permiten establecer una comparación sistemática entre los procesos SMAW y GMAW para la soldadura de hierro dúctil, como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 28

Comparación de los procesos SMAW y GMAW

Aspecto	SMAW	GMAW
Ancho de la ZAC	Mayor (13.66-32.98 mm)	Menor (13.05-31.13 mm)
Homogeneidad de dureza	Menos homogénea	Más homogénea
Riesgo de fisuras	Mayor	Menor
Riesgo de poros	Mayor	Menor
Riesgo de inclusiones	Mayor (escoria)	Menor (sin escoria)
Control térmico	Limitado	Preciso
Productividad	Menor	Mayor
Eficiencia térmica	70-80%	70-85%

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados experimentales.

En general, el proceso GMAW ofrece mejores condiciones de soldabilidad para el hierro dúctil, al minimizar la extensión de la ZAC, controlar la dureza y preservar las propiedades mecánicas del metal base. Esto es consistente con la hipótesis planteada y con los hallazgos de investigaciones previas (Vera, 2019; Zúñiga, 2015; Hariprasath et al., 2022).

Sin embargo, es importante señalar que, aunque el GMAW mostró ventajas en términos de calidad superficial y control térmico, el SMAW sigue siendo un proceso viable para aplicaciones donde la disponibilidad de equipo y la versatilidad son factores críticos. La elección del proceso dependerá de los requisitos específicos de la aplicación, los recursos disponibles y la habilidad del soldador.

6.5. Limitaciones del Estudio

Es importante reconocer las limitaciones del presente estudio:

1. **Número de probetas:** El estudio se limitó a cuatro probetas por proceso (total 8), lo que, aunque suficiente para establecer tendencias y realizar análisis comparativos, podría ampliarse para obtener resultados estadísticamente más robustos. Un tamaño de muestra mayor ($n \geq 10$ por proceso) permitiría un análisis más detallado de la variabilidad y la significancia estadística de las diferencias observadas.
2. **Rango de parámetros:** Los parámetros de soldadura se limitaron a un rango específico (70-130 A para SMAW; 130-310 A para GMAW). Investigaciones futuras podrían explorar un rango más amplio de corrientes, voltajes y velocidades para establecer una relación más completa entre los parámetros de soldadura y las características de la ZAC.
3. **Análisis microestructural:** Aunque se realizaron mediciones de dureza, no se incluyó un análisis metalográfico detallado de las fases presentes en la ZAC utilizando técnicas más avanzadas como microscopía electrónica de barrido (SEM) o difracción de rayos X (XRD). Este análisis proporcionaría información adicional sobre las transformaciones microestructurales y su relación con las propiedades mecánicas.
4. **Ensayos mecánicos:** Los ensayos se limitaron a dureza; ensayos de tracción, impacto y fatiga proporcionarían una caracterización más completa de las propiedades mecánicas de las uniones. Estos ensayos son especialmente relevantes para aplicaciones industriales donde los componentes están sometidos a cargas dinámicas o cíclicas.

5. **Efecto de la temperatura de precalentamiento:** La temperatura de precalentamiento de 641.5 °C obtenida mediante el método de Seferian corresponde a un valor teórico calculado bajo las condiciones y supuestos propios de dicho método. Este valor no fue aplicado durante la experimentación debido a que la investigación estuvo orientada a evaluar la influencia del aporte de calor generado por los procesos SMAW y GMAW sobre la zona afectada por el calor (ZAC), manteniendo una condición de precalentamiento controlada de 300 °C para las probetas. La utilización de una temperatura de 300 °C permitió establecer una condición experimental uniforme y evitar que un precalentamiento elevado modificara significativamente el ciclo térmico de las probetas, dificultando la evaluación del efecto de los parámetros propios de cada proceso de soldadura. Por tanto, los 641.5 °C obtenidos mediante Seferian se consideraron como un valor de referencia teórico y no como una condición experimental obligatoria. Se recomienda que futuras investigaciones evalúen diferentes temperaturas de precalentamiento, incluyendo valores superiores a los utilizados en el presente estudio, con la finalidad de determinar experimentalmente su influencia sobre el ancho de la ZAC, la distribución de dureza, las transformaciones microestructurales y la aparición de discontinuidades o fisuras en las uniones soldadas.

   Se seleccionó una temperatura de precalentamiento de 300 °C como condición experimental para la soldadura del hierro fundido nodular ASTM A536, grado 60-40-18. Esta temperatura permitió reducir el gradiente térmico entre el metal base y la zona de soldadura, disminuyendo la velocidad de enfriamiento y las tensiones térmicas generadas durante el proceso. De esta manera, se buscó reducir la

susceptibilidad del material a la formación de zonas excesivamente endurecidas y a la aparición de fisuras durante el enfriamiento.

El valor de 300 °C se estableció como una condición térmica uniforme para las probetas soldadas mediante SMAW y GMAW, con el propósito de mantener comparables las condiciones iniciales de ambos procesos y evitar que diferentes temperaturas de precalentamiento introdujeran una variable adicional en el estudio. Por tanto, la temperatura de 300 °C corresponde a una condición experimental controlada y no a un valor obtenido directamente mediante el método de Seferian. El método de Seferian permitió obtener una temperatura teórica de 641.5 °C bajo los parámetros considerados en su modelo. Este valor se tomó como referencia para evidenciar la diferencia entre una estimación teórica y la condición experimental empleada. La evaluación de temperaturas superiores a 300 °C constituye una alternativa para futuras investigaciones, con el fin de determinar experimentalmente su influencia sobre el ancho de la ZAC, la dureza, las transformaciones microestructurales y la formación de discontinuidades.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que las características de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en el hierro dúctil dependen directamente del proceso de soldadura empleado. El proceso GMAW generó una ZAC ligeramente más estrecha (13.05-31.13 mm) y con menor grado de alteración microestructural en comparación con el proceso SMAW (13.66-32.98 mm), lo que evidencia un mejor control térmico y menor afectación del metal base.
2. El análisis del aporte de calor (energía por unidad de longitud) permitió establecer que el proceso SMAW presenta valores más elevados, lo cual incrementa la extensión de la ZAC y favorece la aparición de zonas endurecidas lo que indica áreas de fragilidad. En cambio, el proceso GMAW, al operar con menor aporte térmico, reduce la velocidad de difusión del calor y, por tanto, limita el crecimiento de la ZAC.
3. La evaluación de la dureza transversal mostró que el proceso SMAW produce mayores variaciones de dureza entre el depósito, la ZAC y el metal base (86.31-96.00 HRB en ZAC), lo que refleja gradientes térmicos más pronunciados. En cambio, el proceso GMAW presentó una distribución de dureza más uniforme (86.22-95.92 HRB en ZAC), indicando una transición más gradual entre las zonas soldadas y no afectadas.
4. Los ensayos por partículas magnéticas revelaron que el proceso SMAW presenta mayor número de discontinuidades (fisuras en probeta 1, poros en probeta 2, inclusiones de escoria en probeta 3) en comparación con el GMAW, que mostró

escasa o nula presencia de estas discontinuidades. Esto confirma la superior calidad superficial y metalúrgica de las soldaduras realizadas con GMAW.

En conjunto, los resultados sugieren que el proceso GMAW presenta un comportamiento favorable en la soldadura del hierro dúctil ASTM A536 grado 60-40-18, al presentar menores anchos de ZAC en comparación con SMAW y una distribución de dureza más homogénea. Las diferencias observadas en el ancho de la ZAC entre ambos procesos se encuentran aproximadamente entre 4 % y 6 %, evidenciando una menor extensión de la zona afectada térmicamente para GMAW bajo las condiciones experimentales evaluadas. Asimismo, los resultados obtenidos permiten considerar al proceso GMAW como una alternativa técnicamente viable para aplicaciones que requieran un adecuado control de la zona afectada térmicamente y de la distribución de dureza en las uniones soldadas.

RECOMENDACIONES

1. Considerar preferentemente el proceso de soldadura GMAW para trabajos de reparación en hierro fundido nodular ASTM A536 60-40-18, especialmente cuando se requiera reducir los tiempos de ejecución y optimizar los costos asociados al proceso. De acuerdo con los resultados obtenidos, GMAW presentó ventajas en el control térmico y una menor extensión de la ZAC, por lo que, además de sus beneficios técnicos, su mayor productividad y continuidad durante la ejecución pueden contribuir a disminuir el tiempo de reparación y los costos operativos en comparación con el proceso SMAW. Por ello, se recomienda evaluar y priorizar el uso de GMAW en aplicaciones donde las condiciones de trabajo permitan su implementación.
2. Complementar el análisis metalográfico en futuras investigaciones, mediante técnicas de mayor resolución, como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la difracción de rayos X (XRD), con el propósito de identificar y cuantificar las fases presentes en la zona afectada por el calor (ZAC). Esto permitiría establecer una correlación más precisa entre las transformaciones microestructurales, los perfiles de dureza y el comportamiento mecánico de las uniones soldadas.
3. Ampliar el estudio a otros tipos de hierro fundido, como el hierro fundido gris y el hierro fundido nodular austemperado (ADI), evaluando su comportamiento frente a los procesos SMAW y GMAW bajo diferentes condiciones de aporte de calor. Esto permitiría comparar la respuesta microestructural y mecánica de diferentes matrices y contribuir al desarrollo de criterios de soldabilidad aplicables a distintos tipos de hierros fundidos.

4. Incorporar ensayos mecánicos complementarios, tales como tracción, impacto y fatiga, para evaluar de manera integral el comportamiento de las uniones soldadas y determinar la influencia del proceso de soldadura, el aporte de calor y la extensión de la ZAC sobre sus propiedades mecánicas. Estos ensayos permitirían obtener información adicional sobre la resistencia de las uniones frente a cargas estáticas y dinámicas, especialmente en componentes destinados a condiciones de servicio exigentes.
5. Desarrollar y calificar un procedimiento de soldadura (WPS) específico para el hierro fundido nodular ASTM A536 grado 60-40-18, tomando como referencia los parámetros de soldadura evaluados en la presente investigación, como corriente, voltaje, velocidad de avance, aporte de calor, material de aporte y gas de protección. Posteriormente, se recomienda realizar la correspondiente calificación mediante un PQR, complementada con los ensayos mecánicos y de inspección requeridos, a fin de verificar la reproducibilidad y confiabilidad del procedimiento para trabajos de reparación y recuperación de componentes
6. Determinar experimentalmente el rango de temperatura de precalentamiento más conveniente para la soldadura del hierro fundido nodular ASTM A536 grado 60-40-18, evaluando diferentes temperaturas y su influencia sobre el ancho de la ZAC, la distribución de dureza, las transformaciones microestructurales y la aparición de discontinuidades o fisuras. Esta evaluación permitiría establecer condiciones de precalentamiento técnicamente sustentadas para diferentes aplicaciones de reparación y complementar los resultados obtenidos respecto a la influencia del aporte de calor.

7. Realizar un análisis técnico-económico comparativo entre los procesos SMAW y GMAW aplicados a la soldadura del hierro fundido nodular, considerando el consumo de material de aporte y gas de protección, tiempo de ejecución, productividad, disponibilidad de equipos, mano de obra, retrabajos y costos asociados a inspección, reparación y mantenimiento. Este análisis permitiría determinar el impacto económico de las variables propias de cada proceso y aportar criterios adicionales para su selección en aplicaciones industriales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agüera, F. (2008). *Análisis de soldadura de fundiciones "ADI" con electrodos de Fe-Ni.*

American Welding Society. (1996). *Manual de soldadura.* 1, 8. Pearson Educación.

American Welding Society. (2015). *Structural welding code—Steel* (AWS D1.1/D1.1M:2015).

American Welding Society. (2016). *Welding handbook* (9 ed., Vol. 2). Welding handbook.

American Welding Society. (2025). *AWS announces release of D1.1/D1.1M:2025*, Structural Welding Code—Steel. AWS Welding Journal. Obtenido de https://www.aws.org

ANSI/AWS A5.15. (1990). *Specification for welding electrodes and rods for cast iron ANSI/AWS A5.15.* Society American Welding.

ASTM International. (1993). *Standard specification for steel castings, carbon, for suitable for pressure service (ASTM A27/A27M-93).* ASTM International.

ASTM International. (2003). *Standard test method for determining nodularity of ductile iron (ASTM C5.10/C5.10M:2003).* ASTM International.

ASTM International. (2014). *Standard test method for Rockwell hardness of metallic materials (ASTM E190-14).* ASTM International.

ASTM International. (2020). *Standard guide for magnetic particle testing (ASTM E709-20).* ASTM International.

ASTM International. (2021). *Standard specification for ductile iron castings (ASTM A536-21).* ASTM International.

ASTM International. (2024). *Standard specification for ductile iron castings (ASTM A536-24).* ASTM International.

AWS A5.9/A5.9M. (2022). *Specification for bare stainless steel welding electrodes and rods.* American Welding Society.

Barreiro, J. (2009). *Fundamentos de metalurgia.* Editorial Universitaria.

Bello, F. (1996). *La Investigación Tecnológica: O cuando la solución es el problema.* Naguanagua: Universidad de Carabobo.

Callister, W. (2005). *Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales* (2 ed.). Reverté.

Delgado Collantes, E., & Vargas Julon, D. A. (2025). *Influencia de la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero AISI 4140 por el proceso SMAW*. Cusco: UNSAAC-Institucional. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.12918/11505

Díaz Carrasco, S. (2006). *Metodología dela Investigación Científica.* Lima: Editorial San Marcos.

Echevarria, R. (2002). *Defectologia. Universidad Nacional de Comahue.* Santiago de Chile, Chile.

Escuela Politécnica Nacional. (2013). *Folleto de tecnología de soldadura.* EPN.

Fosca Pastor, C. (2005). *Introduccion a la metalurgia de la soldadura.* Lima, Peru: Pontificie Universidad Católica del Perú. Obtenido de https://es.scribd.com/document/484518034/Carlos-Fosca-Introduccion-a-la-metalurgia-de-la-soldadura-pdf

Fosca Pastor, C. (2007). *Metalurgia de la soldadura.* Pontificia Universidad Católica del Perú.

Garcia, A., Vaarela, A., Mier, J., Camba, C., & Barbadillo, F. (2010). Estudio tribologico de aceros austeniticos tipo hadfield, influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste. *Metalurgia, 46*, 47-52. Obtenido de https://www.academia.edu/11560942/Estudio_tribol%C3%B3gico_de_aceros_austen%C3%ADticos_tipo_Hadfield_influencia_del_manganeso_en_su_respuesta_frente_al_desgaste

Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna.* McGraw-Hill.

Hariprasath, P., Sivaraj, P., Balasubramanian, V., Pilli, S., & Sridhar, K. (2022). Effect of the welding technique on mechanical properties and metallurgical characteristics of the naval grade high strength low alloy steel joints produced by SMAW and GMAW. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 37*, 584-595. doi:10.1016/j.cirpj.2022.03.007.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación.* México D.F.: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A. De C.V.

Jeffus, L. (2009). *Soldadura: Principios y aplicaciones.* Ediciones Paraninfo.

Jesper, S. (2004). *Advanced control methods for optimization of arc welding.* Universidad de Aalborg.

Kalpakjian, S., & Schmind, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología.* McGraw-Hill.

Loachamín, J. (2018). *Comparación de la soldabilidad del hierro nodular con el consumible AWS E 312-16 y AWS E NiFe-Cl mediante el proceso SMAW.* Escuela Politécnica Nacional.

Omiogbemi, I. M.-B., Olatunji, C. E., Awopetu, G. A., Awwal, K. S., Jesuloluwa, S., Adeleke, A. A., . . . Emmanuel Omotosho. (2025). *Influence of SMAW and GMAW on mechanical, microstructural, and corrosion properties of high-carbon steel.* Next Research, *2*(4). doi:10.1016/j.nexres.2025.101026.

Pástor Vargas, M. (2002). *Metalurgia de la soldadura.* Universidad Nacional de Ingeniería.

Quesada. (2015). *Procesos y material base – Soldadura manual por arco con electrodo revestido (SMAW).* Neuquén: Laboratorio de Metalografía y Soldadura de la Universidad Nacional del Comahue.

Rahman, M. (2026). *Characterization of weld zone heterogeneity and fracture behavior in GMAW AISI 1010 steel.* Next Materials, 13. doi:10.1016/j.nxmate.2026.102845.

Rodríguez, O. (2013). *Metalurgia de la soldadura.* Editorial Universitaria.

Shackelford, J. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros.* Pearson.

Soldexa. (s.f.). *Manual de soldadura & Catálogo de productos* (7 ed.). Oerlikon.

Vera, J. (2019). *Optimización de la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido para mejorar las propiedades mecánicas de zapatas de Bulldozer.* Universidad Nacional de San Agustín.

Zegarra Ramírez, L. M. (2023). *Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de los cordones y las juntas soldadas multipase con electrodos (SMAW) de diferente aplicación.* Lima: UNI-Tesis. Obtenido de http://hdl.handle.net/20.500.14076/27338

Zúñiga, J. (2015). *Análisis de la temperatura de precalentamiento adecuada para realizar uniones soldadas en tuberías de agua de hierro nodular mediante soldadura SMAW.* Universidad Técnica de Ambato.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Tabla 29

Matriz de consistencia

DETERMINACIÓN DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR EN LA SOLDABILIDAD DEL HIERRO ESFEROIDAL UTILIZANDO LOS PROCESOS SMAW Y GMAW

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Dependiente	Metodología
¿Cuáles serán las características de la Zona Afectada por el Calor en la soldadura del hierro dúctil realizadas mediante los procesos SMAW y GMAW, y cómo su comparación permite optimizar las condiciones de soldadura para mejorar las propiedades mecánicas y la fiabilidad de las uniones soldadas?	Determinar y comparar las características de la Zona Afectada por el Calor en la soldadura del hierro dúctil utilizando los procesos SMAW y GMAW, con el propósito de optimizar las condiciones de soldadura y contribuir a la mejora de las propiedades mecánicas y la fiabilidad de las uniones soldadas.	El proceso de soldadura influye significativamente en las características microestructurales y mecánicas de la Zona Afectada por el Calor del hierro dúctil; específicamente, el proceso GMAW genera una ZAC de menor ancho y con distribución de dureza más homogénea que el proceso SMAW, debido a su menor aporte de calor y mejor control del arco eléctrico.	• Ancho de la ZAC • Microestructura de la ZAC • Dureza de la ZAC	**ENFOQUE:** Cuantitativo **TIPO:** Tecnológica **NIVEL:** Descriptivo, Correlacional, Explicativo **DISEÑO:** Experimental **POBLACIÓN:** Uniones soldadas de hierro esferoidal **MUESTRA:** Probetas de hierro esferoidal (8 probetas) **TÉCNICAS:** Inspección visual, partículas magnéticas, dureza
Problemas Específicos	**Objetivos Específicos**	**Hipótesis Específicas**	**Variables Independientes**	
¿Cuál será el ancho de la Zona Afectada por el Calor producido por los procesos de soldadura SMAW y GMAW en probetas de hierro dúctil bajo condiciones de soldabilidad controladas?	Determinar y comparar el ancho de la Zona Afectada por el Calor generada por los procesos de soldadura SMAW y GMAW en probetas de hierro dúctil, bajo condiciones de soldabilidad controladas.	El ancho de la Zona Afectada por el Calor producida por el proceso GMAW es menor que la generada por el proceso SMAW, debido a la diferencia en la densidad de corriente y en la estabilidad térmica del arco.	• Proceso de soldadura (SMAW/GMAW) • Tipo de material de aporte • Variables de operación	

¿De qué manera influirá el aporte de calor en la extensión y las características de la ZAC en ambos procesos de soldadura?	Evaluar la influencia del aporte de calor sobre la extensión y características de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en ambos procesos de soldadura.	El mayor aporte de calor en el proceso SMAW incrementa la extensión y modifica las características microestructurales de la ZAC en comparación con el proceso GMAW, generando una zona térmicamente más afectada.
¿Cómo variara la dureza transversal desde el depósito hacia el metal base en las zonas afectadas por el calor generadas por los procesos SMAW y GMAW, y qué relación existe entre esta variación y las condiciones térmicas de cada proceso?	Cuantificar la variación de dureza transversal a lo largo del depósito, la ZAC y el metal base, con el fin de establecer la relación entre la distribución de dureza y las condiciones térmicas generadas por los procesos SMAW y GMAW.	La distribución de dureza transversal muestra una mayor variación entre el depósito, la ZAC y el metal base en el proceso SMAW que en el proceso GMAW, evidenciando una relación directa entre las condiciones térmicas del proceso y los gradientes de dureza resultantes.

Nota. Elaboración propia

Anexo 2: Registros de Calificación del Procedimiento (PQR)

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
	ENSAYO PARTICULAS MAGNETICAS	**PQR 1**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	SMAW	**Amperaje**	70	**Voltaje**	20	**Vel. de soldeo (mm/seg)**	1.08
Tipo de estudio:	De laboratorio			**Nº de probeta:**			1
Norma aplicable:	ASTM E709/E1444			**Fecha de elaboración:**			08/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Asesor:**			Mgt.Ing. Eduardo F.Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Taller de mantenimiento de la Empresa SKF Group/SKF del Peru						
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**		230 mm			

RESULTADOS

Fisuras: Gran numero — Fusión incompleta: Ninguno — Socavado: NO

Porosidad: NO — Penetración incompleta: No — Observaciones:

Causa: Intensidad de corriente baja.

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
	ENSAYO PARTICULAS MAGNETICAS	**PQR 2**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	SMAW	**Amperaje**	90	**Voltaje**	22	**Vel. de soldeo (mm/seg)**	1.08
Tipo de estudio:	De laboratorio			**Nº de probeta:**			2
Norma aplicable:	ASTM E709/E1444			**Fecha de elaboración:**			08/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Asesor:**			Mgt.Ing. . Eduardo F.Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Taller de mantenimiento de la Empresa SKF Group/SKF del Peru						
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**		230 mm			

RESULTADOS

Fisuras: No — Fusión incompleta: No — Socavado: NO

Porosidad: Si — Penetración incompleta: No — Observaciones: Ninguna.

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	

ENSAYO PARTICULAS MAGNETICAS							**PQR 3**
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso de soldado	SMAW	**Amperaje**	110	**Voltaje**	24	**Vel. de soldeo (mm/seg)**	1.08
Tipo de estudio:	De laboratorio			**Nº de probeta:**			3
Norma aplicable:	ASTM E709/E1444			**Fecha de elaboración:**			08/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Asesor:**		Mgt.Ing. . Eduardo F.Ortiz S.	
Centro de estudio y análisis:	Taller de mantenimiento de la Empresa SKF Group/SKF del Peru						
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm				
RESULTADOS							
Fisuras: Gran numero Porosidad: NO	Fusión incompleta: Ninguno Inclusiones de escoria: Si			Socavado: NO Observaciones:			

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	

ENSAYO PARTICULAS MAGNETICAS							**PQR 4**
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso de soldado	SMAW	**Amperaje**	130	**Voltaje**	26	**Vel. de soldeo (mm/seg)**	1.08
Tipo de estudio:	De laboratorio			**Nº de probeta:**			4
Norma aplicable:	ASTM E709/E1444			**Fecha de elaboración:**			08/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Asesor:**		Mgt.Ing. . Eduardo F.Ortiz S.	
Centro de estudio y análisis:	Taller de mantenimiento de la Empresa SKF Group/SKF del Peru						
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm				
RESULTADOS							
Fisuras: No Porosidad: NO	Fusión incompleta: No Perfil de cordon: Ancho			Socavado: NO Observaciones:			

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
	ENSAYO PARTICULAS MAGNETICAS	**PQR 1**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	GMAW	**Amperaje**	130	**Voltaje**	28	**Vel. de avance alambre (mm/seg)**	3.33

Tipo de estudio:	De laboratorio	**Nº de probeta:**	1
Norma aplicable:	ASTM E709/E1444	**Fecha de elaboración:**	08/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Asesor:**	Mgt.Ing. . Eduardo F.Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Taller de mantenimiento de la Empresa SKF Group/SKF del Peru		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm

RESULTADOS

Fisuras: Escasa o casi nula presencia. Fusión incompleta: No Socavado: No
Porosidad: NO Penetración incompleta: No Observaciones:

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
	ENSAYO PARTICULAS MAGNETICAS	**PQR 2**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	GMAW	**Amperaje**	180	**Voltaje**	28	**Vel. de avance alambre (mm/seg)**	3.33

Tipo de estudio:	De laboratorio	**Nº de probeta:**	2
Norma aplicable:	ASTM E709/E1444	**Fecha de elaboración:**	08/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Asesor:**	Mgt.Ing. . Eduardo F.Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Taller de mantenimiento de la Empresa SKF Group/SKF del Peru		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm

RESULTADOS

Fisuras: No Fusión incompleta: No Socavado: NO
Porosidad: NO Penetración incompleta: No Observaciones:

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	

ENSAYO PARTICULAS MAGNETICAS							**PQR 3**
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso de soldado	GMAW	**Amperaje**	250	**Voltaje**	28	**Vel. de avance alambre (mm/seg)**	3.33

Tipo de estudio:	De laboratorio	**Nº de probeta:**	3
Norma aplicable:	ASTM E709/E1444	**Fecha de elaboración:**	08/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Asesor:**	Mgt.Ing. . Eduardo F.Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Taller de mantenimiento de la Empresa SKF Group/SKF del Peru		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm

RESULTADOS

Fisuras: No — Fusión incompleta: No — Socavado: No
Porosidad: NO — Inclusiones de escoria: Ninguna — Observaciones:

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	

ENSAYO PARTICULAS MAGNETICAS							**PQR 4**
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso de soldado	GMAW	**Amperaje**	90	**Voltaje**	22	**Vel. de avance alambre (mm/seg)**	3.33

Tipo de estudio:	De laboratorio	**Nº de probeta:**	4
Norma aplicable:	ASTM E709/E1444	**Fecha de elaboración:**	08/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Asesor:**	Mgt.Ing. . Eduardo F.Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Taller de mantenimiento de la Empresa SKF Group/SKF del Peru		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm

RESULTADOS

Fisuras: No — Fusión incompleta: Ninguno — Socavado: NO
Porosidad: NO — Perfil de cordon : Angosto — Observaciones:

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
	ENSAYO DE DUREZA	**PQR 1**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	SMAW	**Amperaje**	70	**Voltaje**	20	**Vel. de soldeo (mm/seg)**	1.08

Tipo de estudio:	De laboratorio	**Nº de probeta:**	1
Norma aplicable:	ASTM E190-14	**Fecha de elaboración:**	12/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Asesor:**	Ing. Mg. Eduardo F. Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Peru		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm

RESULTADO

Metal base: 85 HRB	- ZAC (Izquierdo): 96 HRB - Depósito de soldadura: 96 HRB - ZAC (Derecho) : 96 HRB

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
	ENSAYO DE DUREZA	**PQR 2**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	SMAW	**Amperaje**	90	**Voltaje**	22	**Vel. de soldeo (mm/seg)**	1.08

Tipo de estudio:	De laboratorio	**Nº de probeta:**	2
Norma aplicable:	ASTM E190-14	**Fecha de elaboración:**	12/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Asesor:**	Ing. Mg. Eduardo F. Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Peru		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm

RESULTADO

Metal base: 85 HRB	ZAC (Izquierdo): 90.50 HRB Depósito de soldadura: 92.78 HRB ZAC (Derecho) : 91.0HRB

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
ENSAYO DE DUREZA		**PQR 3**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	SMAW	**Amperaje**	110	**Voltaje**	24	**Vel. de soldeo (mm/seg)**	1.08
Tipo de estudio:	De laboratorio			**Nº de probeta:**			3
Norma aplicable:	ASTM E190-14			**Fecha de elaboración:**			12/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Asesor:**			Ing. Mg. Eduardo F. Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Peru						
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm				

RESULTADO

Metal base: 85 HRB	- ZAC (Izquierdo): 86.31 HRB - Depósito de soldadura: 88.79 HRB - ZAC (Derecho) : 86.32 HRB

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
ENSAYO DE DUREZA		**PQR 4**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	SMAW	**Amperaje**	70	**Voltaje**	20	**Vel. de soldeo (mm/seg)**	1.08
Tipo de estudio:	De laboratorio			**Nº de probeta:**			4
Norma aplicable:	ASTM E190-14			**Fecha de elaboración:**			12/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Asesor:**			Ing. Mg. Eduardo F. Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Peru						
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm				

RESULTADO

Metal base: 85 HRB	ZAC (Izquierdo): 85.0 HRB Deposito de soldadura: 85.00 ZAC (Derecho) : 85.1 HRB

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
ENSAYO DE DUREZA		**PQR 1**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	GMAW	**Amperaje**	130	**Voltaje**	28	**Vel. de avance alambre (mm/seg)**	3.33

Tipo de estudio:	De laboratorio	**Nº de probeta:**	1
Norma aplicable:	ASTM E190-14	**Fecha de elaboración:**	12/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Asesor:**	Ing. Mg. Eduardo F. Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Peru		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm

RESULTADO

Metal base: 85 HRB	ZAC (Izquierdo): 95.92 HRB Deposito de soldadura: 95.92 HRB ZAC (Derecho) : 95.92 HRB

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	
ENSAYO DE DUREZA		**PQR 2**

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR

Proceso de soldado	GMAW	**Amperaje**	180	**Voltaje**	28	**Vel. de avance alambre (mm/seg)**	3.33

Tipo de estudio:	De laboratorio	**Nº de probeta:**	2
Norma aplicable:	ASTM E190-14	**Fecha de elaboración:**	12/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.	**Asesor:**	Ing. Mg. Eduardo F. Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Peru		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm

RESULTADO

Metal base: 85 HRB	ZAC (Izquierdo): 90.70 HRB Deposito de soldadura: 92.89 HRB ZAC (Derecho) : 91.0 HRB

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	

ENSAYO DE DUREZA							**PQR 3**
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso de soldado	GMAW	**Amperaje**	250	**Voltaje**	28	**Vel. de avance alambre (mm/seg)**	3.33
Tipo de estudio:	De laboratorio			**Nº de probeta:**			3
Norma aplicable:	ASTM E190-14			**Fecha de elaboración:**			12/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Asesor:**			Ing. Mg. Eduardo F. Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Peru						
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm				
RESULTADO							
Metal base: 85 HRB	ZAC (Izquierdo): 86.22 HRB Deposito de soldadura: 88.66 HRB ZAC (Derecho) : 86.31 HRB						

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.**	

ENSAYO DE DUREZA							**PQR 4**
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso de soldado	GMAW	**Amperaje**	310	**Voltaje**	28	**Vel. de avance alambre (mm/seg)**	3,33
Tipo de estudio:	De laboratorio			**Nº de probeta:**			4
Norma aplicable:	ASTM E190-14			**Fecha de elaboración:**			12/07/2025
Realizado por:	Franszua Ayte Alvarez Tito Cconojhuillca H.			**Asesor:**			Ing. Mg. Eduardo F. Ortiz S.
Centro de estudio y análisis:	Laboratorio de la Empresa SKF Group/SKF del Peru						
Espesor de la probeta:	6.35 mm	**Longitud de la probeta:**	230 mm				
RESULTADO							
Metal base: 85 HRB	ZAC (Izquierdo): 85.00 HRB Deposito de soldadura: 85.03 HRB ZAC (Derecho) : 85.01 HRB						

Anexo 3: Certificados de Materiales

Ensayos No Destructivos
Información Técnica
Líquidos Penetrantes

MR® 68 C Líquido penetrante rojo y fluorescente

Para Ensayos por líquidos penetrantes según EN 571 parte 1

Aspecto general y composición:

- Líquido penetrante rojo y fluorescente eliminable con agua y disolvente, tipo III según norma EN 571 parte 1
- A base de aceite mineral, contiene glicoles
- Adecuado para todos los metales (para plásticos y cerámicas necesita pruebas previas)
- Sin colorantes azoicos
- Adecuado para superficies muy lisas
- La seguridad del ensayo está garantizada a temperaturas de trabajo entre -10ºC y +50ºC junto con MR® 79, MR® 85, MR® 88 y MR® 70

Aprobaciones y especificaciones pertinentes

- Ensayos de acuerdo a EN ISO 3452:2006 parte 2
- Sensibilidad clase 2 según DIN EN ISO 3452:2006 parte 2 Sistema IIAe
  - Eliminador: Agua
  - Revelador: MR® 70
- Sensibilidad clase 2 según DIN EN ISO 3452:2006 parte 2 Sistema IIICe
  - Eliminador: MR® 79, MR® 85, MR® 88
  - Revelador: MR® 70
- Sensibilidad clase 2 según DIN EN ISO 3452:2006 parte 2 Sistema IIICe
  - Eliminador: MR® 79, MR® 85, MR® 88
  - Revelador: MR® 70
- Sensibilidad clase 2 según DIN EN ISO 3452:2006 parte 2 Sistema IIEE
  - Eliminador: Agua, MR® 85
  - Revelador: MR® 70
- Bajo contenido de halógenos y azufre según la norma DIN EN ISO 3452 parte 2 y ASME código V, Sección V , Artículo 6 , T -641
- En correspondencia con Reg de Lloyd. , Bureau Veritas , Det Norske Veritas , admitido por Framatome ANP
- Produits et Matériaux Utillisables en Centrales (PMUC)

Aplicación:

- Eliminar impurezas, óxido y otros contaminantes de la superficie. Puede utilizar para la eliminación de aceites o grasas nuestro eliminador MR® 79.
- Aplicar MR® 68C en la zona a ser probada, ya sea por pulverización, cepillado o inmersión. Deje penetrar durante al menos 5 minutos.
- Retire el exceso de penetrante de la superficie, con agua o con un paño limpio y sin pelusa humedecido con un eliminador MR.
- Rocíe con Revelador MR (por ejemplo el MR® 70) a una distancia de aprox. 20 cm sobre la superficie seca, aplicando una capa fina y uniforme. Los defectos superficiales aparecerán de color rojo sobre un fondo blanco, o fluorescente bajo la luz ultravioleta. Nota: Si la capa de revelador es demasiado gruesa, las pequeñas discontinuidades no aparecerán tapadas por el revelador.

Caducidad mínima:

- La vida del producto es de un mínimo de 4 años, se almacena a temperatura ambiente.

Tamaños de envase:

- Aerosoles de 500 ml (1 caja contiene 12 aerosoles)
- 5 L, 30 L, 200 L

Ensayos No Destructivos
Información Técnica
Líquidos Penetrantes

MR® 70 Revelador Blanco

Para Ensayos con líquidos penetrantes según EN 571 parte 1

Aspecto general y composición

- Revelador eliminable por disolvente para ensayos con líquidos penetrantes de color rojo y fluorescente de acuerdo con EN 571 parte 1
- Seca rápidamente
- La seguridad del ensayo está garantizada a temperaturas de trabajo entre -10° C y +50° C

Aprobaciones y especificaciones pertinentes

- Ensayos de acuerdo a EN ISO 3452:2006 parte 2
- Bajo contenido de halógenos y azufre según la norma DIN EN ISO 3452 parte 2 y ASME código V, Sección V , Artículo 6 , T -641
- En correspondencia con Lloyd Register. , Bureau Veritas , Det Norske Veritas, admitido por Framatome ANP

Aplicación

- Eliminar impurezas, óxido y otros contaminantes de la superficie. Puede utilizar para la eliminación de aceites o grasas nuestro eliminador MR® 79.
- Aplicar penetrantre MRen la zona del ensayo, ya sea por pulverización, cepillado o inmersión. Deje penetrar durante al menos 5 minutos.
- Retire el exceso de penetrante de la superficie, con agua o con un paño limpio y sin pelusa humedecido con un eliminador MR.
- Rocíe con Revelador MR® 70 a una distancia de aprox. 20 cm sobre la superficie seca, aplicando una capa fina y uniforme. Los defectos superficiales aparecerán de color rojo sobre un fondo blanco, o fluorescente bajo la luz ultravioleta. Nota: Si la capa de revelador es demasiado gruesa, las pequeñas discontinuidades no aparecerán tapadas por el revelador.

Caducidad mínima

- La vida del producto es de un mínimo de 4 años, se almacena a temperatura ambiente.

Tamaños de envase

- Aerosoles de 500 ml (1 caja contiene 12 aerosoles)
- 5 L, 30 L, 200 L

Ensayos no Destructivos
Información Técnica
Líquidos Penetrantes

MR® 85 Limpiador

Para Ensayos con líquidos penetrantes según EN 571 parte 1

Aspecto general y composición

- Mezcla de disolventes basados en una alcohol, método C de acuerdo a la norma EN 571 parte 1
- Seca lentamente
- Punto de inflamación +13ºC
- Adecuado para todos los metales (para plásticos y cerámicas necesita pruebas previas)
- La seguridad del ensayo está garantizada a temperaturas de trabajo entre -10° C y +50° C

Aprobaciones y especificaciones pertinentes

- Ensayos de acuerdo a EN ISO 3452:2006 parte 2
- Bajo contenido de halógenos y azufre según la norma DIN EN ISO 3452 parte 2 y ASME código V, Sección V , Artículo 6 , T -641
- En correspondencia con Lloyd's Register, Bureau Verita, Det Norske Veritas, admitido por Framatome ANP

Aplicación

- Eliminar impurezas, óxido y otros contaminantes de la superficie con el eliminador MR® 85.
- Aplicar penetrante MR en la zona del ensayo, ya sea por pulverización, cepillado o inmersión. Deje penetrar durante al menos 5 minutos.
- Retire el exceso de penetrante de la superficie, con agua o con un paño limpio y sin pelusa humedecido con eliminador MR® 85.
- Rocíe con Revelador (por ejemplo MR® 70) a una distancia de aprox. 20 cm sobre la superficie seca, aplicando una capa fina y uniforme. Los defectos superficiales aparecerán de color rojo sobre un fondo blanco, o fluorescente bajo la luz ultravioleta. Nota: Si la capa de revelador es demasiado gruesa, las pequeñas discontinuidades no aparecerán tapadas por el revelador.

Caducidad mínima

- La vida del producto es de un mínimo de 4 años, se almacena a temperatura ambiente.

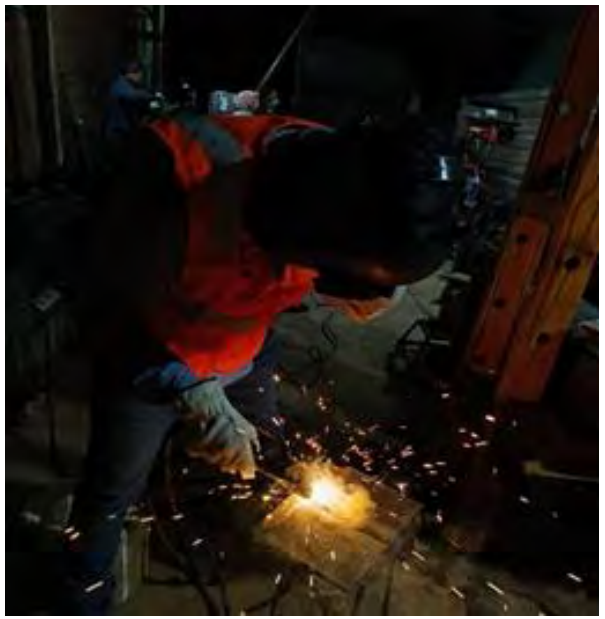
Tamaños de envase

- Aerosoles de 500 ml (1 caja contiene 12 aerosoles)
- 5 L, 30 L, 200 L

Anexo 4: Registros fotográficos















PT-06



