UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

TESIS

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA DUREZA DE LA ZAC EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A36 POR EL PROCESO SMAW (Investigación Tecnológica)

PRESDENTADO POR:
BR. JULIO CESAR CJUNO HUILLCA
BR. LUIS EDISON HANCCO HUANCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALURGICO

ASESOR:
DR. ING. GUSTAVO JANQUI GUZMAN

CUSCO - PERÚ

2024

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

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

El que suscribe, el **Asesor** Dr. GUSTAVO JANQUI GUZMAN ..... quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA DUREZA DE LA ZAC EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A36 POR EL PROCESO SMAW (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA) .....

Presentado por: JULIO CESAR CIUNO HUILLCA ..... DNI N° 48147600 ;
presentado por: LUIS EDISON HANCCO HUANCA ..... DNI N°: 48070169.
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO METALURGICO .....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 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 4 %.

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, 04 de JUNIO de 2026

Firma

Post firma GUSTAVO JANQUI GUZMAN

Nro. de DNI 23851258

ORCID del Asesor 0000-0002-5443-2138

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:597495306

Revisado.docx

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:597495306

Fecha de entrega
4 jun 2026, 8:35 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
4 jun 2026, 9:17 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
Revisado.docx

Tamaño del archivo
11.5 MB

180 páginas

31.154 palabras

170.413 caracteres

4% 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 12 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

3% Fuentes de Internet
0% Publicaciones
4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

PRESENTACIÓN

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

Señores miembros del Jurado Evaluador:

En cumplimiento de las disposiciones establecidas en el Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, y con la finalidad de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra consideración la presente tesis titulada:

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA DUREZA DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC) EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A36 MEDIANTE EL PROCESO SMAW (Investigación Tecnológica)

La presente investigación se desarrolló con el propósito de analizar la influencia de la velocidad de enfriamiento sobre las propiedades mecánicas del acero ASTM A36, particularmente en la dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC), generada durante el proceso de soldadura por arco metálico protegido (SMAW). El estudio busca aportar información técnica que permita comprender el comportamiento metalúrgico del material frente a diferentes condiciones térmicas de enfriamiento, contribuyendo a la optimización de los procedimientos de soldadura.

Esperamos que el presente trabajo cumpla con las exigencias académicas y metodológicas establecidas por nuestra Escuela Profesional, y que sus aportes contribuyan al desarrollo de futuros estudios relacionados con la soldabilidad de los aceros estructurales.

Los Tesistas

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por acompañarme en cada etapa de mi vida, brindándome fortaleza, sabiduría y la oportunidad de alcanzar una de mis metas profesionales.

A mis queridos padres, **Fernando Cjuno Soncco** y **Bernarda Huillca Katata**, por su amor, esfuerzo y sacrificio constante. Gracias por su apoyo incondicional y por inculcarme valores que me han permitido avanzar y superar los desafíos encontrados en el camino.

A mis hermanos **Clever, Vilma, José Ángel, Juan Fernando, Amílcar Manuel y Zenon Polanco** por su compañía, comprensión y palabras de aliento durante mi formación académica.

A mi padrino **Lorenzo Cuaquira Bellido**, a su esposa **Nazaria Quiñones** y a sus hijas **Yadira e Indira**, por el afecto y apoyo brindados a lo largo de estos años.

Asimismo, a mis sobrinos **Alex, Nataly, Andrea, Inés y Flor**, a mi tía **Silveria Taipe**, a mi tío **Gerónimo Huillca** y a mis primos **Sabino, Ronald Edgar, Marina y Rivelino**, quienes siempre estuvieron presentes con su cariño y confianza.

A todos ellos, mi profundo agradecimiento, porque este logro también es parte de ustedes.

Julio Cesar Cjuno Huillca.

DEDICATORIA

A mis queridos padres, **Luis Abdón Hancco Salazar** y **Peregrina Claudia Huanca Cayllahua**, quienes, con su amor incondicional, sacrificio, paciencia y esfuerzo constante me brindaron la oportunidad de alcanzar esta importante meta profesional. Gracias por ser mi ejemplo de trabajo, perseverancia y honestidad, y por enseñarme a enfrentar las dificultades con valentía y determinación. Todo lo que soy y cada logro alcanzado se lo debo en gran parte a ustedes.

A mi amado hijo, **Sayri Tupac Seleuco Hancco Phacsi**, quien es la mayor motivación de mi vida. Su existencia me inspira cada día a seguir adelante, a superar los obstáculos y a esforzarme por ser una mejor persona y un mejor profesional. Este logro también es para ti, porque eres la razón que impulsa mis sueños y fortalece mi compromiso con el futuro.

A toda mi familia, por su cariño, apoyo y confianza permanente. Gracias por sus consejos, palabras de aliento y por acompañarme durante este camino académico. De una u otra manera, cada uno de ustedes contribuyó a que este objetivo se hiciera realidad y me motivó a no rendirme ante las dificultades.

Con profundo agradecimiento, dedico este trabajo a todas las personas que formaron parte de este importante capítulo de mi vida.

Luis Edison Hancco Huanca.

AGRADECIMIENTO

Damos las gracias a Dios por ser tan bueno con nosotros, por acompañarnos siempre, dándonos fuerza cuando las cosas se ponían difíciles y ayudándonos a lograr esta meta tan importante en nuestra carrera.

A la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica, y de forma especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por darnos lo necesario para formarnos como profesionales y ser mejores en ingeniería.

Le damos las gracias de corazón a todos los profesores que nos enseñaron en la universidad. Ellos compartieron sus conocimientos, lo que vivieron y sus lecciones, y fueron clave para nuestra formación.

Mención especial al Dr. Ing. Gustavo Janqui Guzmán, quien nos asesoró en esta investigación. Gracias por su guía, dedicación, paciencia y por todo lo que aportó mientras desarrollábamos y terminábamos esta tesis. Sus consejos y su saber fueron fundamentales para cumplir lo que nos propusimos.

Finalmente, agradecemos a nuestros padres, familia y amigos por su apoyo total, por creer en nosotros y por animarnos siempre. Sus palabras de aliento y su respaldo fueron importantísimos para superar los retos y terminar con éxito este importante trabajo de investigación.

A todos ellos, de verdad, muchas gracias.

Los tesistas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN ..... **II**

DEDICATORIA ..... **III**

AGRADECIMIENTO ..... **V**

ÍNDICE DE CONTENIDO ..... **VI**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **IX**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XI**

RESUMEN ..... **XIV**

SIMBOLOGÍA ..... **XVI**

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **1**

1.1 Situación problemática 1

1.2 Formulación del Problema Objeto de Investigación 2

1.2.1 Problema General 2

1.2.2 Problemas Específicos 2

1.3 Justificación 2

1.3.1 Justificación Tecnológica 2

1.3.2 Justificación Social 3

1.3.3 Justificación Económica 4

1.3.4 Justificación Ambiental 5

1.4 Objetivo General y Específicos 6

1.4.1 Objetivo General 6

1.4.2 Objetivos Específicos 6

CAPITULO II MARCO TEÓRICO **8**

2.1 Antecedentes Nacionales e Internacionales 8

2.1.2 Antecedentes Nacionales 8

2.1.3 Antecedentes Internacionales 11

2.2 Marco Teórico 13

2.2.1 Aceros Estructurales 13

2.2.2 Ventajas de los Aceros Estructurales 14

2.2.3 Desventajas de los Aceros Estructurales 16

2.4. Acero Estructural ASTM A36 19
2.5 Diagrama de hierro – Carburo de Hierro (Fe-Fe3C) 31
2.6 Diagrama Hierro – Carburo de Hierro y la Soldadura 36
2.7 Propiedades Mecánicas de los Aceros 37
2.8 Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (SMAW) 38
2.8.1 Definición y Antecedentes 38
2.9 Metalurgia de la Soldadura 51
2.101. Velocidad de Enfriamiento 64
2.10.2 Ecuación de la velocidad de enfriamiento para chapas gruesas y delgadas 66
2.10.3 Absorción de Gas por el Metal Fundido 69
2.11 Ensayos Destructivos y no Destructivos 72
2.11.1 Ensayos no Destructivos 72
2.11.2 Ensayos Destructivos 76
2.12 Las discontinuidades en soldadura 78
2.13 Calificación del Procedimiento 88

CAPITULO III HIPÓTESIS Y VARIABLES 90

3.1 Hipótesis General y Especificas 90
3.1.1 Hipótesis general 90
3.1.2 Hipótesis Específicas 90
3.1.3 Variables Independientes y Dependientes 90
Variables Independientes 90
Variable Dependiente 90
Variables Interviniente o Externa 90

CAPITULO IV: MÉTODO 93

4.1 Ámbito de estudio: localización política y geográfica 93
4.2 Enfoque, Tipo, alcance y diseño de Investigación 94
4.2.1 Enfoque, Tipo y diseño de Investigación 94
4.3 Población y Muestra 95
4.3.1 Población de estudio 95
4.3.2 Muestra 96
4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 96

CAPITULO V PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 102

5.1 Maquinaria y Equipos 102
5.2 Materiales para la Investigación 106
5.3 Material Base 106
5.4 Material de Aporte 107
5.5 Probetas Objeto de Investigación 109
5.6 Características de las Probetas 109
5.7 Preparación de las Probetas para la Soldadura 109
5.8 Soldabilidad de las Probetas 110
5.9 Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para las probetas de investigación. 110
5.10 Cálculos Efectuados en la Investigación. 119
5.11 Cálculo del Aporte de Calor Neto 119
5.12 Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) 121
5.13 Cálculo de la temperatura máxima en la zona intermedia (50%) del ancho de la ZAC 123
5.14 Cálculo de la Velocidad de Enfriamiento 124
5.15 Control de Calidad de las Probetas 126
5.16 Inspección Visual de las Probetas Soldadas 126
5.17 Ensayo de Doblado 127
5.18 Ensayo por Líquidos Penetrantes 135
5.19 Tipo de microestructura que muestran las probetas en el depósito. 138

CAPITULO VI ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 140

6.1 Análisis de la microestructura obtenida 140
6.2 Análisis de la Velocidad de enfriamiento al 50% de la ZAC 142
6.3 Prueba de Dureza 142

CONCLUSIONES 146

RECOMENDACIONES 148

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 149

ANEXOS 152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los aceros estructurales....18

Tabla 2 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36....30

Tabla 3 Composición química del acero ASTM A36....31

Tabla 4 Comparación entre corriente continua y corriente alterna. 48

Tabla 5 Eficiencia térmica de los procesos de arco 60

Tabla 6 Concentración de hidrogeno para distintos materiales y electrodos. 71

Tabla 7 Criterios de aceptación para ensayo visual. 73

Tabla 8 Criterio de aceptación para el ensayo de cara y raíz según el código AWS D1.1....77

Tabla 9 Composición química del acero ASTM A36....107

Tabla 10 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36....107

Tabla 11 Análisis químico de metal depositado del electrodo E-7018....108

Tabla 12 Propiedades mecánicas del electrodo E 7018 108

Tabla 13 Características de las probetas 109

Tabla 14 Nomenclatura de la junta 110

Tabla 15 Codificación de probetas pareadas.....110

Tabla 16 Probeta 1 (1A +1B)....111

Tabla 17 Probeta 2 (2A +2B)....112

Tabla 18 Probeta 3 (3A +3B)....114

Tabla 19 Probeta 4 (4A +4B)....115

Tabla 20 Probeta 5 (5A +5B)....117

Tabla 21 Valores de calor neto....121

Tabla 22 Ancho de la ZAC 123

Tabla 23 Temperaturas máximas calculadas a un 50% del ancho de la ZAC. 124

Tabla 24 Velocidad de enfriamiento 125

Tabla 25 Velocidad de enfriamiento en el 50% del ancho de la ZAC. 126

Tabla 26 Resultados del ensayo de inspección visual 127

Tabla 27 Cantidad de probetas para los ensayos según norma AWS D1.1. 128

Tabla 28 Doblez probeta 1 129

Tabla 29 Doblez probeta 2 130

Tabla 30 Doblez probeta 3 131

Tabla 31 Doblez probeta 4 132

Tabla 32 Doblez probeta 5 133

Tabla 33 Resultados del ensayo de doblado 134

Tabla 34 Resultados de la prueba de líquidos penetrantes 138

Tabla 35 Microestructuras obtenidas a diferentes velocidades de enfriamiento de las probetas estudiadas. 139

Tabla 36 Velocidad de enfriamiento a 50% del ancho de la ZAC. 142

Tabla 37 Dureza de las probetas en el deposito 143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ángulo estructural en forma de “L” 21

Figura 2 Vigas “H” 23

Figura 3 Vigas en forma de “H” 24

Figura 4 Perfil en “T”.....25

Figura 5 Barra redonda lisa y pulida.....26

Figura 6 Pletina 26

Figura 7 Barra cuadrada.....28

Figura 8 Barra hexagonal.....28

Figura 9 Chapas 30

Figura 10 Diagrama de Equilibrio Hierro – Carburo de Hierro.....32

Figura 11 Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita 400X....33

Figura 12 Fotomicrografía de la microestructura de cementita en un acero al carbono. 33

Figura 13 Fotomicrografía de la microestructura de perlita en un acero al carbono. .34

Figura 14 Microestructura de la austenita a 325X 35

Figura 15 Microestructura de la martensita 35

Figura 16 Diagrama de hierro – Carbono adaptado a la soldadura.....37

Figura 17 Soldadura por arco con electrodo revestido 39

Figura 18 Diagrama del proceso SMAW.....41

Figura 19 Gas ionizado como conductor de corriente. 43

Figura 20 Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones. ...44

Figura 21 Posiciones de soldadura.....50

Figura 22 Tipos de junta 51

Figura 23 Zonas metalúrgicas producidas en una junta soldada.....53

Figura 24 Sección transversal de los cordones de soldadura en los que se aprecian inclusiones de escoria.....57

Figura 25 Modelos de crecimiento competitivo en función del gradiente Térmico: Pileta de fusión en forma elíptica.....59

Figura 26 Modelos de crecimiento competitivo en función del gradiente Térmico: Pileta de fusión en forma de gota.....59

Figura 27 Temperatura máxima de la ZAC a una distancia Y 63

Figura 28 Curva TTT de un acero AISI 4140, donde se muestran curvas típicas de enfriamiento y la región de temperaturas considerada para determinar la velocidad de enfriamiento de un ciclo térmico de soldadura. 65

Figura 29 Influencia del oxígeno en las propiedades mecánicas de un acero de bajo contenido de carbono 70

Figura 30 Depósito de soldadura en cara y raíz.....77

Figura 31 Exceso de penetración 78

Figura 32 Falta de penetración.....79

Figura 33 Concavidad externa 79

Figura 34 Concavidad interna.....80

Figura 35 Socavaduras o mordeduras de borde 80

Figura 36 Quemado.....81

Figura 37 Salpicaduras de metal. 81

Figura 38 Falta de continuidad del cordón.....82

Figura 39 Fisuras longitudinales.....82

Figura 40 Fisuras transversales 83

Figura 41 Fisura de interrupción.....83

Figura 42 Fisuras en la zona afectada por el calor. 84

Figura 43 Falta de penetración....84

Figura 44 Falta de fusión 84

Figura 45 Falta de fusión 85

Figura 46 Porosidad agrupada 86

Figura 47 Porosidad alineada....86

Figura 48 Inclusiones no metálicas. 86

Figura 49 Inclusión de escoria aisladas....87

Figura 50 Escorias alineadas....87

Figura 51 Desalineado 88

Figura 52 Fuente de poder 103

Figura 53 Equipo de doblez 104

Figura 54 Durómetro portatil 104

Figura 55 Microscopio digital portátil 105

Figura 56 Kit de tintes penetrantes 106

Figura 57 Probetas de acero ASTM A36 106

Figura 58 Probetas para el estudio plenamente identificadas 109

Figura 59 Tipo de junta....110

Figura 60 Probetas soldadas....119

Figura 61 Preparación de probetas....128

Figura 62 Doblado de las probetas....129

Figura 63 Limpieza química del depósito de soldadura. 136

Figura 64 Rociado con tinte penetrante 136

Figura 65 Limpieza del exceso de penetrante. 137

Figura 66 Aplicación del tinte revelador....137

Figura 67 Visualización de posibles discontinuidades. 138

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la influencia de la velocidad de enfriamiento en la dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) del acero ASTM A36 soldado mediante el proceso de Soldadura por Arco Metálico Protegido (SMAW). El estudio correspondió a una investigación aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Para el desarrollo de la investigación se utilizaron cinco probetas de acero ASTM A36, las cuales fueron soldadas empleando electrodos AWS E7018 y sometidas posteriormente a diferentes condiciones de enfriamiento. La evaluación de las uniones soldadas comprendió inspección visual, ensayo por líquidos penetrantes, medición de dureza mediante el método Brinell y análisis metalográfico de las muestras. Los resultados obtenidos evidenciaron que la velocidad de enfriamiento influye de manera directa en las características microestructurales y en la dureza de la Zona Afectada por el Calor. Las mayores velocidades de enfriamiento favorecieron la formación de microestructuras más duras, alcanzando valores de hasta 470 HB, mientras que las menores velocidades generaron estructuras con menor dureza y mayor ductilidad. Se concluye que el control de la velocidad de enfriamiento constituye un factor determinante para modificar las propiedades mecánicas del acero ASTM A36, contribuyendo a la obtención de uniones soldadas de mejor calidad y desempeño en aplicaciones industriales.

Palabras clave: Acero ASTM A36, soldadura SMAW, velocidad de enfriamiento, dureza, microestructura.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the influence of cooling rate on the hardness of the Heat-Affected Zone (HAZ) in ASTM A36 steel welded using the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process. The study was applied in nature, with a quantitative approach and an experimental design. Five ASTM A36 steel specimens were welded using AWS E7018 electrodes and subjected to different cooling conditions. The evaluation included visual inspection, liquid penetrant testing, Brinell hardness testing, and metallographic analysis. The results showed that the cooling rate directly influences the microstructural characteristics and hardness of the HAZ. Higher cooling rates promoted the formation of harder microstructures, reaching hardness values of up to 470 HB, whereas lower cooling rates produced microstructures with lower hardness and greater ductility. It was concluded that controlling the cooling rate is an important factor in modifying the mechanical properties of ASTM A36 steel and contributes to obtaining higher-quality welded joints.

Keywords: ASTM A36 steel, SMAW welding, cooling rate, hardness, microstructure.

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 revestivo)
- AWS= Sociedad americana de soldadura (American Welding Society)
- mm = Milímetro.
- MIG = Soldadura gas inerte. (Metal inert gas)
- MAG = Soldadura gas active
- TIG = Tunsteng inerte gas
- 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 = Voltio
- A = Amperio
- v = Velocidad de soldeo.
- Tmax = Temperatura máxima
- To = Temperatura inicial de la chapa.
- Tm = Temperatura de fusión o temperatura del liquidus del metal a soldar.
- C = Calor especifico del metal sólido.

- Hnet = Energía neta aportada.
- t= Espesor de la chapa a soldar.
- ρ = Densidad del material
- ρC = Calor especifico volumétrico.
- Y= Ancho de la zona afectada térmicamente.
- R = Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura
- k= Conductividad térmica del metal
- r = Espesor relativo de la chapa.
- St = Tiempo de solidificación.
- L = Calor de fusión
- C= Carbono equivalente.
- e = Espesor de la pieza.
- T p = Temperatura de precalentamiento.
- CE = Carbono equivalente.
- % = Porcentaje.
- CDEN = Corriente directa electrodo al polo negativo.
- CDEP = Corriente directa electrodo al polo positivo.
- HB = Dureza Brinell
- h = Altura.
- SFA = Especificación de análisis de relleno.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

La soldadura es uno de los procesos más utilizados en la fabricación, montaje y mantenimiento de estructuras metálicas debido a que permite obtener uniones permanentes con adecuada resistencia mecánica. Entre los diversos procedimientos existentes, la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) continúa siendo ampliamente empleada en la industria por su versatilidad, facilidad de aplicación y bajo costo operativo.

Durante la ejecución de este proceso, el material base experimenta ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento que producen modificaciones en la microestructura del acero, especialmente en la Zona Afectada por el Calor (ZAC). Estas transformaciones pueden alterar propiedades mecánicas importantes como la dureza, la resistencia y la ductilidad, influyendo directamente en la calidad y confiabilidad de la unión soldada.

Uno de los factores que ejerce mayor influencia sobre estas modificaciones es la velocidad de enfriamiento posterior a la soldadura. Un enfriamiento acelerado puede generar zonas endurecidas y con mayor susceptibilidad al agrietamiento, mientras que velocidades más lentas favorecen estructuras más dúctiles. Por ello, el control de esta variable resulta fundamental para garantizar un adecuado comportamiento mecánico del material soldado.

El acero ASTM A36 es ampliamente utilizado en estructuras metálicas, puentes, equipos industriales y componentes de uso general debido a sus buenas propiedades mecánicas y facilidad de soldadura. Sin embargo, en muchas aplicaciones industriales no se controla adecuadamente la velocidad de enfriamiento después de la soldadura, situación que puede originar defectos metalúrgicos, disminución de la calidad de la unión y fallas prematuras durante el servicio.

A pesar de la importancia de este fenómeno, existe limitada información experimental sobre la influencia de la velocidad de enfriamiento en la dureza de la Zona Afectada por el Calor del acero ASTM A36 soldado mediante el proceso SMAW. En consecuencia, surge la necesidad de evaluar técnicamente esta relación con la finalidad de establecer criterios que contribuyan a mejorar los procedimientos de soldadura, optimizar la calidad de las uniones y reducir los riesgos asociados a defectos metalúrgicos.

1.2 Formulación del Problema Objeto de Investigación

1.2.1 Problema General

¿Cómo influye la velocidad de enfriamiento en la dureza de la ZAC en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW?

1.2.2 Problemas Específicos

Problema Específico 1

¿Cómo influye la intensidad de corriente en la velocidad de enfriamiento en la dureza de la ZAC, en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW?

Problema Específico 2

¿Cómo influye la velocidad de soldeo en la dureza de la ZAC en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW?

Problema Específico 3

¿Cómo influye la temperatura inicial de la chapa en la velocidad de enfriamiento en la dureza de la ZAC, en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW?

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Tecnológica

La presente investigación posee una importante justificación tecnológica debido a que contribuirá al conocimiento y optimización de los procedimientos de soldadura aplicados a

los aceros al carbono estructurales, particularmente al acero ASTM A36 mediante el proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW). El estudio de la influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) permitirá comprender el comportamiento metalúrgico del material durante y después de la soldadura, facilitando el diseño de procedimientos más seguros y eficientes.

Asimismo, esta investigación permitirá establecer parámetros técnicos relacionados con el control térmico y metalúrgico de la unión soldada, contribuyendo a minimizar defectos como fisuras, endurecimiento excesivo, fragilidad o pérdida de propiedades mecánicas. En ese sentido, los resultados obtenidos podrán servir como referencia para mejorar los procedimientos de fabricación y mantenimiento en estructuras metálicas utilizadas en la industria metalmecánica, minera y de construcción.

Diversos investigadores peruanos sostienen que el adecuado control de las variables térmicas durante la soldadura influye directamente en la calidad metalúrgica de las uniones soldadas y en su comportamiento en servicio. Según Rodríguez y Quispe (2021), “el control de la velocidad de enfriamiento permite reducir la formación de microestructuras frágiles en la ZAC, mejorando la resistencia mecánica y la confiabilidad estructural de los componentes soldados”. Del mismo modo, Huamán (2020) señala que “el estudio de las transformaciones metalúrgicas durante la soldadura constituye una herramienta fundamental para optimizar procesos industriales y disminuir fallas operativas”.

En consecuencia, esta investigación aportará información técnica y experimental que fortalecerá el desarrollo tecnológico en el área de metalurgia de la soldadura, permitiendo generar procedimientos más eficientes y adecuados para las condiciones industriales nacionales.

1.3.2 Justificación Social

Desde el punto de vista social, la presente investigación contribuirá al fortalecimiento del conocimiento técnico y científico de profesionales, docentes, estudiantes y técnicos dedicados a las actividades de fabricación, mantenimiento y control de calidad por soldadura. El estudio de la influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la soldabilidad del acero ASTM A36 permitirá ampliar los conocimientos relacionados con el comportamiento metalúrgico de las uniones soldadas y las condiciones necesarias para obtener soldaduras seguras y de alta calidad.

En el contexto peruano, muchas empresas metalmecánicas y talleres de mantenimiento aún presentan limitaciones técnicas en el control de parámetros térmicos durante la soldadura, lo que incrementa el riesgo de fallas estructurales y accidentes laborales. Por ello, la generación de nuevos conocimientos en esta área contribuirá al fortalecimiento de las competencias técnicas del recurso humano involucrado en procesos de soldadura.

Según Flores y Cárdenas (2022), “la capacitación y actualización tecnológica en procesos metalúrgicos permiten incrementar la competitividad laboral y mejorar las oportunidades de desarrollo profesional en el sector industrial”. Asimismo, Ramos (2019) “sostiene que la investigación aplicada en ingeniería favorece la formación de personal altamente calificado, capaz de responder a las exigencias de calidad y seguridad de la industria moderna”.

De esta manera, el presente estudio no solo tendrá impacto académico y técnico, sino también social, debido a que contribuirá indirectamente al mejoramiento de las condiciones laborales y socioeconómicas de los trabajadores relacionados con el área metalúrgica y de soldadura.

1.3.3 Justificación Económica

La investigación también posee una relevante justificación económica, debido a que el adecuado control de la velocidad de enfriamiento y de la dureza en la Zona Afectada por el Calor permitirá obtener uniones soldadas con mejores propiedades mecánicas y mayor confiabilidad estructural. Esto reducirá significativamente la aparición de defectos metalúrgicos, reparaciones frecuentes, desperdicio de materiales y fallas prematuras en servicio.

En los procesos industriales, las fallas por soldadura representan elevados costos económicos relacionados con paradas de planta, reposición de componentes, pérdidas de producción y riesgos operacionales. Por ello, la optimización de los procedimientos de soldadura mediante el control adecuado de variables térmicas constituye una alternativa técnica para reducir costos operativos y mejorar la productividad.

De acuerdo con Valdivia y León (2020), “la implementación de procedimientos metalúrgicos adecuados en procesos de soldadura industrial genera una reducción considerable en costos de mantenimiento correctivo y reprocesos de fabricación”. Del mismo modo, Paredes (2021) menciona que “las investigaciones aplicadas al control de calidad en soldadura contribuyen directamente a incrementar la vida útil de estructuras metálicas y disminuir pérdidas económicas en las empresas”.

En consecuencia, el presente estudio permitirá establecer criterios técnicos que favorezcan la eficiencia económica de los procesos de fabricación y mantenimiento industrial mediante la obtención de depósitos soldados de buena calidad y adecuado comportamiento en servicio.

1.3.4 Justificación Ambiental

La presente investigación también posee importancia ambiental, debido a que la obtención de uniones soldadas de buena calidad permitirá reducir la generación de residuos

metálicos y materiales descartados producto de defectos, reparaciones o fallas en las estructuras soldadas. Cuando las soldaduras presentan agrietamientos, discontinuidades o deficiencias metalúrgicas, es frecuente la necesidad de remover material, rehacer uniones o reemplazar componentes, generando desperdicios metálicos y consumo innecesario de recursos.

El adecuado control de la velocidad de enfriamiento durante la soldadura contribuirá a optimizar el uso de materiales y energía, promoviendo procesos más eficientes y sostenibles dentro de la industria metalmecánica. Además, al disminuir la cantidad de reprocesos y reparaciones, también se reducirá el consumo de electrodos, energía eléctrica y emisiones asociadas a las actividades de fabricación.

Según Mendoza y Torres (2022), “la aplicación de tecnologías metalúrgicas orientadas al control de calidad contribuye a reducir impactos ambientales derivados de residuos industriales y consumo excesivo de materiales”. Asimismo, Chávez (2020) sostiene que “los procesos industriales eficientes y técnicamente controlados favorecen el aprovechamiento racional de recursos y la disminución de contaminación generada por desperdicios metálicos”.

Por lo tanto, esta investigación aportará indirectamente al desarrollo de prácticas industriales más sostenibles, promoviendo la reducción de residuos y el uso eficiente de recursos en procesos de soldadura aplicados al acero ASTM A36.

1.4 Objetivo General y Específicos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de la velocidad de enfriamiento en la dureza de la ZAC en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW.

1.4.2 Objetivos Específicos

Objetivo Específico 1

Evaluar la influencia de la intensidad de corriente en la velocidad de enfriamiento en la dureza de la ZAC, en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW

Objetivo Específico 2

Evaluar la influencia de la velocidad de soldeo en la dureza de la ZAC en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW

Objetivo Específico 3

Evaluar la influencia de la temperatura inicial de la chapa en la velocidad de enfriamiento en la dureza de la ZAC, en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Nacionales e Internacionales

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Ramos (2019) “desarrolló una investigación en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión titulada “Influencia del tratamiento térmico post soldadura en las propiedades mecánicas del acero ASTM A335 mediante el proceso GTAW””. El estudio estuvo orientado a evaluar cómo los tratamientos térmicos aplicados después de la soldadura modifican el comportamiento mecánico del acero ASTM A335.

Para alcanzar dicho propósito, se trabajó con probetas soldadas bajo condiciones controladas de operación, considerando variables como corriente, voltaje y velocidad de avance. Una vez realizadas las uniones soldadas, las muestras fueron sometidas a tratamientos térmicos posteriores y posteriormente evaluadas mediante ensayos de dureza y análisis metalográficos en diferentes zonas de la unión, incluyendo el metal base, el cordón de soldadura y la Zona Afectada por el Calor (ZAC).

Los resultados evidenciaron que la ZAC presentó los mayores valores de dureza en comparación con las demás regiones analizadas. Este comportamiento fue atribuido a los cambios microestructurales producidos por los ciclos térmicos experimentados durante la soldadura y el posterior enfriamiento del material. Asimismo, se observó que determinadas condiciones térmicas favorecieron la formación de zonas con elevado endurecimiento.

El autor concluyó que el tratamiento térmico posterior a la soldadura ejerce una influencia significativa sobre las propiedades mecánicas del acero ASTM A335. En particular, destacó que el control adecuado de las condiciones térmicas permite reducir la

formación de regiones excesivamente endurecidas, disminuyendo el riesgo de agrietamiento y mejorando el comportamiento de la unión soldada.

Paredes y Gutiérrez (2021) “realizaron una investigación en la Universidad Nacional de Ingeniería denominada “Evaluación de la influencia del enfriamiento en la dureza de la zona afectada por el calor en aceros estructurales ASTM A36 soldados por SMAW” W. El propósito principal fue estudiar el efecto de diferentes velocidades de enfriamiento sobre la dureza y el comportamiento metalúrgico de la Zona Afectada por el Calor en aceros ASTM A36 sometidos al proceso de soldadura SMAW.

La investigación tuvo un enfoque experimental y contempló la preparación de probetas soldadas que posteriormente fueron sometidas a distintas condiciones de enfriamiento, incluyendo enfriamiento natural al aire, enfriamiento acelerado mediante agua y enfriamiento controlado utilizando aislamiento térmico. Para evaluar los efectos producidos por cada condición, se realizaron ensayos de dureza y análisis metalográficos de las muestras obtenidas.

Los investigadores encontraron que las probetas sometidas a enfriamiento acelerado desarrollaron mayores niveles de dureza en la Zona Afectada por el Calor, acompañados de estructuras microestructurales más susceptibles a la fragilización. En contraste, las muestras enfriadas de manera controlada mostraron una distribución más homogénea de dureza y mejores condiciones para el desempeño mecánico de la unión soldada.

Como conclusión, los autores señalaron que la velocidad de enfriamiento constituye una variable determinante en la evolución microestructural y en las propiedades mecánicas del acero ASTM A36. En consecuencia, recomendaron establecer controles adecuados sobre el ciclo térmico de soldadura con el fin de minimizar defectos metalúrgicos y garantizar una mayor confiabilidad de las estructuras fabricadas mediante este proceso.

Quispe (2020) “desarrolló una investigación en la Universidad Nacional del Altiplano titulada *“Análisis de la dureza y microestructura en juntas soldadas de acero ASTM A36 mediante el proceso SMAW””*. El estudio estuvo orientado a comprender los cambios microestructurales y las variaciones de dureza que se producen en las juntas soldadas de acero ASTM A36, especialmente en la Zona Afectada por el Calor (ZAC), como consecuencia de los ciclos térmicos generados durante la soldadura.

La investigación se ejecutó bajo un enfoque cuantitativo y un diseño experimental. Para ello, se fabricaron diversas uniones soldadas utilizando diferentes niveles de intensidad de corriente y condiciones de enfriamiento. Posteriormente, las muestras fueron evaluadas mediante ensayos de dureza Vickers y análisis metalográficos realizados en el metal base, el cordón de soldadura y la Zona Afectada por el Calor.

Los resultados mostraron que los mayores valores de dureza se registraron en la ZAC, fenómeno asociado a las transformaciones microestructurales originadas por la rápida pérdida de calor después de la soldadura. Asimismo, se observó que las variaciones bruscas de temperatura durante el enfriamiento favorecen la formación de estructuras más endurecidas, incrementando la susceptibilidad del material a la aparición de discontinuidades y fisuras.

Finalmente, el autor concluyó que el adecuado control de las variables térmicas involucradas en el proceso de soldadura, especialmente la velocidad de enfriamiento, resulta fundamental para conservar propiedades mecánicas favorables en el acero ASTM A36. De esta manera, es posible obtener uniones soldadas con mayor confiabilidad estructural, mejor desempeño mecánico y una mayor seguridad en aplicaciones industriales y de construcción metálica.

2.1.3 Antecedentes Internacionales

García y Méndez (2018) “desarrollaron en la Universidad Nacional Autónoma de México una investigación titulada “Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la dureza en la zona afectada por el calor de aceros estructurales soldados por SMAW””. El estudio estuvo orientado a comprender la influencia que ejercen las condiciones de enfriamiento sobre el comportamiento mecánico de los aceros estructurales después de ser sometidos a procesos de soldadura.

Para ello, los investigadores realizaron un trabajo experimental utilizando juntas soldadas sometidas a distintos medios de enfriamiento. Posteriormente, efectuaron evaluaciones de dureza y análisis metalográficos con el propósito de identificar las modificaciones producidas en la Zona Afectada por el Calor y establecer su relación con los ciclos térmicos generados durante la soldadura.

Los resultados obtenidos evidenciaron que las muestras sometidas a una rápida disipación del calor desarrollaron mayores niveles de dureza en la ZAC, acompañados de estructuras microestructurales con menor capacidad de deformación. Asimismo, se determinó que el incremento de la dureza estaba asociado a una mayor tendencia al agrietamiento y a una reducción de la soldabilidad del material.

Los autores señalaron que el control de la velocidad de enfriamiento constituye una variable de gran importancia dentro de los procedimientos de soldadura, debido a que influye directamente en la calidad metalúrgica de las uniones y en la reducción de defectos que pueden comprometer su desempeño durante el servicio.

Fernández (2020), “en la Universidad de Oviedo, llevó a cabo la investigación denominada *“Influencia del ciclo térmico de soldadura sobre las propiedades metalúrgicas del acero ASTM A36””*. El propósito de este trabajo fue analizar los cambios que

experimenta el acero ASTM A36 cuando es sometido a diferentes condiciones térmicas durante el proceso de soldadura SMAW.

La investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo de carácter experimental. Para ello, se fabricaron uniones soldadas aplicando distintos parámetros de corriente y diversas velocidades de enfriamiento. Posteriormente, las muestras fueron evaluadas mediante ensayos de dureza Vickers, observaciones metalográficas y pruebas mecánicas orientadas a determinar las variaciones ocurridas en la Zona Afectada por el Calor.

Los hallazgos permitieron identificar que los enfriamientos rápidos favorecen el incremento de la dureza en la ZAC, acompañado por modificaciones microestructurales que reducen la ductilidad del material. Por otro lado, las probetas sometidas a enfriamientos más controlados presentaron un comportamiento mecánico más estable y una menor incidencia de discontinuidades asociadas al proceso de soldadura.

Como resultado de la investigación, el autor concluyó que el ciclo térmico y la velocidad de enfriamiento desempeñan un papel determinante en la calidad de las uniones soldadas, influyendo tanto en la evolución microestructural del acero como en su comportamiento durante las condiciones reales de trabajo.

Silva y Torres (2019) “realizaron una investigación en la Universidade Federal de Minas Gerais titulada *“Análisis de la dureza y soldabilidad de aceros al carbono soldados mediante proceso SMAW””*. El estudio estuvo enfocado en evaluar la relación existente entre las condiciones de enfriamiento posteriores a la soldadura y la formación de zonas endurecidas en aceros estructurales al carbono.

La metodología empleada consistió en ejecutar soldaduras mediante el proceso SMAW bajo diferentes condiciones térmicas, para posteriormente realizar ensayos de dureza Rockwell y análisis microestructurales en las regiones afectadas por el calor. Asimismo, se

comparó el comportamiento mecánico de las probetas obtenidas bajo cada condición de enfriamiento.

Los investigadores observaron que las mayores concentraciones de dureza se desarrollaron en la Zona Afectada por el Calor cuando el material fue sometido a velocidades elevadas de enfriamiento. De igual manera, identificaron que los cambios térmicos bruscos favorecen la generación de tensiones residuales capaces de afectar negativamente la soldabilidad y la integridad estructural del acero.

Finalmente, los autores concluyeron que el control adecuado de las condiciones térmicas durante y después de la soldadura permite mejorar significativamente la calidad de las uniones, minimizar la aparición de defectos metalúrgicos y aumentar la confiabilidad de las estructuras sometidas a servicio.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Aceros Estructurales

Los aceros para estructurales, son materiales más utilizados en la fabricación de estructuras metálicas y componentes industriales, por sus buenas propiedades mecánicas, facilidad de fabricación y adecuado comportamiento frente a diferentes condiciones de carga. Este tipo de acero ha sido diseñado especialmente para soportar esfuerzos mecánicos en construcciones civiles, puentes, edificaciones, maquinarias, equipos industriales y estructuras sometidas a trabajos continuos.

De manera general, son aceros estructurales aquellos aceros al carbono y de baja aleación que poseen propiedades adecuadas de resistencia, ductilidad y soldabilidad, permitiendo su empleo en elementos estructurales donde se requiere seguridad y estabilidad mecánica. Según Callister y Rethwisch (2020), “los aceros estructurales presentan una

combinación favorable entre resistencia mecánica y deformabilidad, razón por la cual continúan siendo ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y de ingeniería".

Dentro de los aceros estructurales más empleados se encuentra el acero ASTM A36, material que destaca por su facilidad de soldadura, buena resistencia mecánica y amplio uso en estructuras metálicas. Este acero es utilizado frecuentemente en vigas, columnas, placas, puentes, soportes y componentes soldados debido a su comportamiento estable durante los procesos de fabricación y mantenimiento.

Asimismo, Gómez y Salazar (2019) mencionan que "los aceros estructurales poseen una gran importancia dentro de la industria metalmecánica debido a que permiten construir estructuras resistentes, económicas y relativamente fáciles de fabricar." Del mismo modo, Fernández (2020) señala que las propiedades metalúrgicas y mecánicas de estos aceros pueden modificarse durante procesos térmicos como la soldadura, especialmente en la Zona Afectada por el Calor (ZAC), donde ocurren cambios microestructurales importantes".

2.2.2 Ventajas de los Aceros Estructurales

Gran resistencia mecánica

La principal ventaja del acero estructural es elevada resistencia en relación con su peso. Esta característica permite diseñar estructuras más ligeras sin comprometer su capacidad de carga. En puentes, edificios y estructuras de grandes dimensiones, esta propiedad resulta fundamental debido a que reduce el peso total de la construcción y mejora la eficiencia estructural. Según Hibbeler (2018), "la alta relación resistencia-peso del acero permite soportar grandes esfuerzos mecánicos utilizando menores secciones estructurales en comparación con otros materiales tradicionales".

Estabilidad de sus propiedades

Otra característica importante es que las propiedades mecánicas del acero se mantienen relativamente estables con el paso del tiempo. Cuando el material trabaja bajo condiciones adecuadas y recibe mantenimiento periódico, conserva su resistencia y comportamiento estructural durante largos periodos.

Esta estabilidad permite que muchas estructuras metálicas tengan una vida útil prolongada y mantengan condiciones seguras de operación incluso después de varios años de servicio.

Durabilidad

Los aceros estructurales presentan buena durabilidad cuando son protegidos adecuadamente contra fenómenos de corrosión y desgaste. Para alargar la durabilidad de las estructuras de metal, se suelen emplear pinturas, recubrimientos o tratamientos especiales tanto en la industria como en construcciones. De acuerdo con Torres y Mendoza (2021), el mantenimiento preventivo constituye un factor importante para conservar sus propiedades mecánicas y disminuir deterioros prematuros ocasionados por ambientes agresivos.

Ductilidad

Es una propiedad muy importante en los aceros estructurales, debido a que permite que el material pueda deformarse antes de fracturarse. Esta capacidad resulta favorable en estructuras sometidas a cargas dinámicas, vibraciones o impactos, ya que disminuye el riesgo de fallas repentinas. En términos sencillos, un acero dúctil puede absorber energía y deformarse sin romperse inmediatamente, lo cual brinda mayor seguridad estructural.

Tenacidad

La tenacidad representa la propiedad que posee el acero para resistir esfuerzos e impactos sin fracturarse fácilmente. Los aceros estructurales combinan resistencia y ductilidad, permitiendo soportar condiciones severas de trabajo y cargas variables.

Esta propiedad es especialmente importante en estructuras sometidas a esfuerzos cíclicos, vibraciones o condiciones de servicio exigentes.

2.2.3 Desventajas de los Aceros Estructurales

Susceptibilidad a la corrosión

Una de las desventajas de estos aceros es su tendencia a la corrosión cuando se encuentra expuesto al aire, humedad o ambientes agresivos. La corrosión provoca deterioro progresivo del material y disminución de sus propiedades mecánicas.

Por esta razón, las estructuras metálicas requieren mantenimiento periódico mediante pinturas, recubrimientos protectores o tratamientos anticorrosivos.

Pérdida de resistencia sometido al fuego

El acero es un material no combustible, sus propiedades mecánicas disminuyen considerablemente cuando es sometido a temperaturas elevadas durante incendios. A medida que la temperatura auementa, el acero pierde resistencia y rigidez, pudiendo deformarse o colapsar si no cuenta con protección adecuada. Según Segui (2017), “las estructuras metálicas expuestas al fuego pueden experimentar reducciones importantes en su capacidad resistente, motivo por el cual muchas construcciones incorporan sistemas de protección térmica”.

Aun con estas restricciones, el acero para construcción sigue siendo de los materiales más empleados en ingeniería y obras por su adaptabilidad, sencillez de fabricación, dureza y buen desempeño estructural. Su aplicación abarca desde pequeñas estructuras industriales

hasta grandes edificaciones, puentes y equipos mecánicos utilizados en diferentes sectores productivos.

La Tabla 1, presenta la clasificación general de aceros estructurales y sus principales características mecánicas, ahí se encuentra el acero ASTM A36, material utilizado en la presente investigación.

Tabla 1

Clasificación de los aceros estructurales

Designación de la ASTM	Tipo de Acero	Formas	Usos Recomendados	Esfuerzo mínimo de fluencia Fy, en ksi	Resistencia mínima especificada a la tensión Fu, en ksi
A36	Al carbono	Perfiles, barras y placas	Edificios, puentes y otras estructuras atornilladas soldadas	36, pero 32 si su espesor es mayor de 8 pulg	58-80
A529	Al carbono	Perfiles y placas hasta ½ pulg	Similar al A36	42-50	60-100
A572	Columbio-vanadio de alta resistencia y baja aleación	Perfiles, placas y barras hasta de 6 pulg.	Construcciones soldada o atornillada, No para puentes soldados con Fy grado 55 o menor.	42-65	60-80
A242	De alta resistencia, baja aleación y resistente a la corrosión.	Perfiles, placas y barras hasta de 5 pulg.	Construcciones atornilladas, soldadas o remachadas; técnica de soldado muy importante.	42-50	63-70
A588	De alta resistencia baja aleación y resistente a la corrosión atmosférica	Placas y barras hasta de 4 pulg.	Construcción atornillada	42-50	63-70
A852	Aleación templada y revenida	Placas solo de 2.5 a 6 Pulg.	Construcción soldada o atornillada, principalmente para puentes y edificios soldados. Proceso de soldadura de importancia fundamental.	70	90-110
A514	Baja aleación templada y revenida	Placas solo de 2.5 a 6 Pul.	Estructura soldada con gran atención a la técnica; no se recomienda si la ductilidad es importante.	90-100	100-130

*Nota***:** Acaronare (2024). Placa A36: Propiedades y especificaciones.

2.3 Acero Estructural ASTM A36

El acero ASTM A36 forma parte del grupo de los aceros para construcción de carbono y es uno de los materiales más comunes en las industrias de edificación, metalmecánica y la creación de estructuras de metal. Su uso extendido se debe a que cuenta con un buen equilibrio entre sus propiedades mecánicas, es fácil de trabajar y su precio es razonable, lo cual lo hace una opción efectiva para muchas tareas industriales.

Entre sus puntos fuertes se encuentran su buena resistencia, su flexibilidad, que se puede moldear fácilmente y que se suelda muy bien. Gracias a esto, el material se puede usar para hacer partes que soportan diversas clases de peso y que están bajo distintas condiciones de uso, ofreciendo siempre un buen rendimiento estructural.

Además, como el acero ASTM A36 se encuentra fácilmente en el mercado y no es muy caro, se usa mucho en obras grandes donde se necesita un material seguro y fácil de conseguir. Por estas razones, se emplea bastante en la construcción de edificios, puentes, plataformas de metal, maquinaria para la industria y todo tipo de estructuras para mover cosas y producir energía.

De igual modo, este acero se usa en muchos sistemas dentro de los sectores del automóvil, trenes, barcos y aviones, además de para hacer torres de alta tensión, maquinaria pesada y otras partes estructurales que necesitan ser seguras, fuertes y aguantar el paso del tiempo.

1.1.1 Aplicaciones del acero ASTM A36.

Gracias a que combina bien resistencia, flexibilidad, que se suelda fácil y que no cuesta mucho hacerlo, el acero ASTM A36 se usa mucho en muchas industrias y en la construcción. Sirve para estructuras ligeras y para partes que se usan en condiciones más difíciles. Aquí decimos dónde se usa más este material:

Se usa para construir estructuras de metal en casas, negocios y fábricas.

Sirve para hacer naves industriales, bodegas, lugares para deportes y otras construcciones grandes.

Se usa para hacer puentes de metal, ya sean soldados, atornillados o con remaches, y las partes que los sostienen.

Se utiliza para hacer plataformas en la industria del petróleo y la energía.

Sirve para fabricar tanques, recipientes, carcasas, moldes y otras partes para la industria.

Se usa para hacer láminas dobladas para techos y bardas de metal.

Se utiliza para hacer mallas soldadas para obras y para reforzar estructuras.

Sirve para fabricar chasis, soportes, estructuras, equipos de transporte y maquinaria industrial.

Se usa para construir torres para cables eléctricos y estructuras de telecomunicaciones.

Se utilizan partes de este acero en las industrias minera, del tren, naval y de autos.

Como se consigue fácil en las tiendas y se trabaja bien, el acero ASTM A36 sigue siendo uno de los materiales más usados en ingeniería, cuando se necesita una buena mezcla de fuerza, seguridad y buen precio.

Formas de presentación del acero estructural ASTM A36.

El acero ASTM A36 se produce en amplia gama de formas e incluyen:

-Planchas

-Perfiles estructurales con diferentes secciones.

-Tubos

-Barras

-Láminas

-Tienen las siguientes presentaciones:

a) Ángulos en forma de "L"

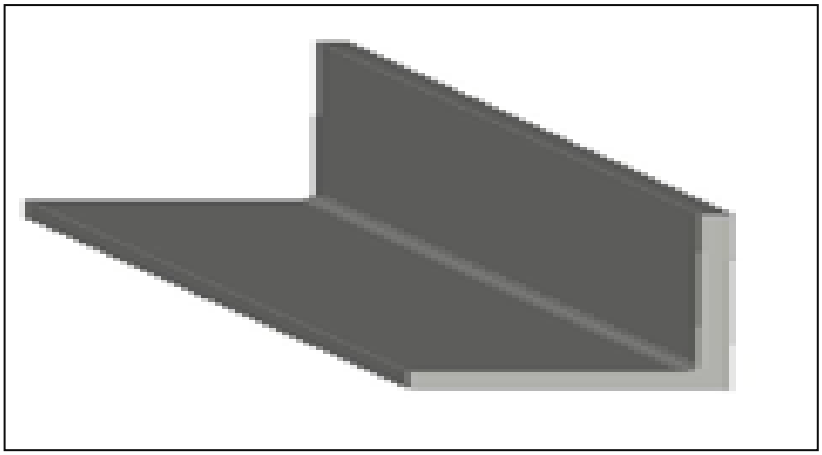
Los perfiles angulares en forma de "L" corresponden a elementos estructurales obtenidos mediante procesos de laminación en caliente. Su geometría se caracteriza por la unión de dos alas dispuestas perpendicularmente, formando un ángulo de 90°. Debido a su resistencia, versatilidad y facilidad de ensamblaje, estos perfiles son ampliamente utilizados en la construcción y fabricación de estructuras metálicas.

Entre sus principales aplicaciones destacan la elaboración de estructuras para edificaciones, componentes de la industria automotriz, grúas, puertas metálicas, trabajos de cerrajería, soportes estructurales, sistemas de techado, torres de transmisión eléctrica, marcos de ventanas y elementos de señalización, entre otros usos industriales y civiles.

En la Figura 1 se presenta un perfil angular tipo "L", mostrando su configuración geométrica característica.

Figura 1

Ángulo estructural en forma de "L"



Nota: Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos.

b) Vigas en forma de "H"

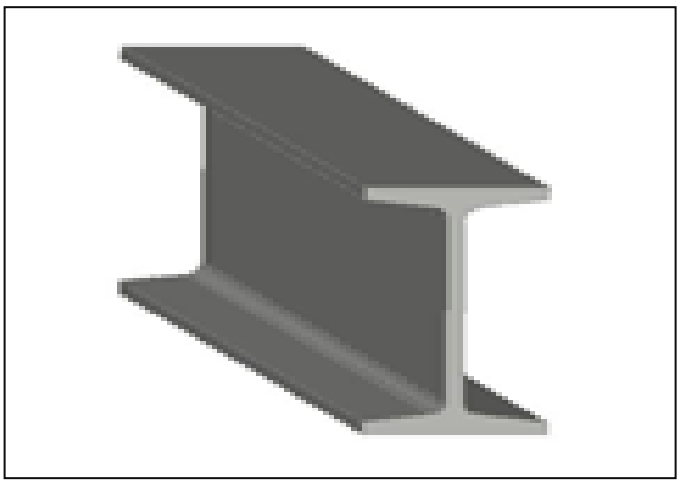
Las vigas estructurales son perfiles metálicos fabricados mediante procesos de laminación en caliente y se caracterizan por presentar una sección transversal en forma de "H" o "I". Su diseño geométrico les permite soportar elevadas cargas y resistir eficientemente esfuerzos de flexión, lo que las convierte en uno de los elementos estructurales más importantes en la ingeniería y la construcción.

Debido a su alta capacidad portante y estabilidad estructural, las vigas son ampliamente utilizadas en la construcción de edificios, puentes, naves industriales y otras obras de infraestructura. Asimismo, encuentran aplicación en instalaciones industriales, plataformas metálicas, sistemas de soporte y estructuras destinadas a maquinaria y equipos de gran tamaño.

En la Figura 2 se muestra la presentación típica de una viga estructural laminada, destacando su configuración geométrica característica.

Figura 2

Vigas "H"



Nota: Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos.

c) Canales U

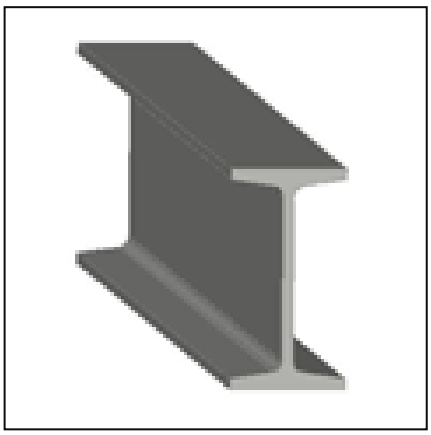
Los perfiles tipo canal son elementos estructurales obtenidos mediante procesos de laminación en caliente y se distinguen por presentar una sección transversal con forma de la letra "U". Esta configuración les proporciona una adecuada capacidad para resistir esfuerzos mecánicos, por lo que son ampliamente utilizados en diferentes aplicaciones estructurales e industriales.

Entre sus usos más frecuentes se encuentran la fabricación de vigas secundarias, viguetas, cerchas metálicas, carrocerías para vehículos, marcos estructurales, canales de soporte y diversos componentes empleados en obras civiles e instalaciones industriales. Gracias a su versatilidad y facilidad de ensamblaje, estos perfiles constituyen una alternativa eficiente para la construcción de estructuras livianas y de mediana capacidad de carga.

En la Figura 3 se presenta un perfil tipo canal, donde se aprecia su característica sección transversal en forma de "U".

Figura 3

Vigas en forma de "H"



*Nota***:** Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

d) Perfiles en forma de "T"

Los perfiles estructurales en forma de "T" son elementos metálicos obtenidos generalmente mediante procesos de laminación en caliente. Su sección transversal presenta una configuración semejante a la letra "T", compuesta por un ala horizontal y un alma vertical, lo que les proporciona una adecuada capacidad para resistir esfuerzos de compresión, flexión y cargas combinadas.

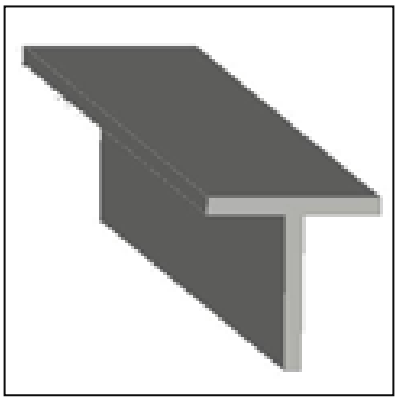
Debido a sus características geométricas, estos perfiles son ampliamente utilizados como elementos de soporte y refuerzo en estructuras metálicas, especialmente en sistemas de techado, cerchas, plataformas, puentes, marcos estructurales y diversas aplicaciones industriales. Asimismo, son empleados en la fabricación de maquinaria, carrocerías, equipos de transporte y componentes que requieren una distribución eficiente de cargas.

Entre sus principales ventajas destacan su facilidad de unión mediante soldadura, atornillado o remachado, así como su capacidad para integrarse a diferentes configuraciones estructurales. Estas características permiten que los perfiles en "T" sean utilizados tanto en proyectos de construcción civil como en instalaciones industriales donde se requiere resistencia, estabilidad y durabilidad.

En la Figura 4 se muestra la presentación característica de un perfil estructural en forma de “T”.

Figura 4

Perfil en “T”



Nota: Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

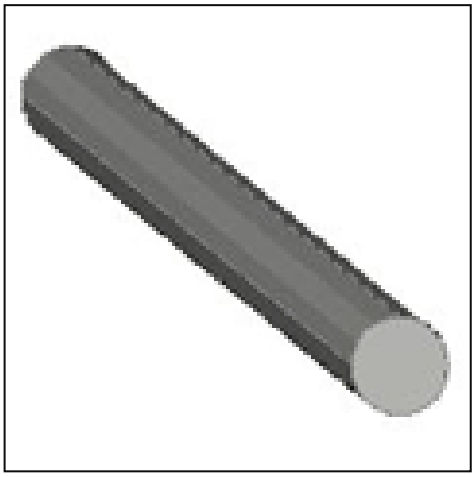
e) Barras redondas lisas y pulidas

Las barras redondas lisas y pulidas son productos metálicos de sección transversal circular, fabricados mediante procesos de laminación en caliente y sometidos posteriormente a tratamientos de acabado superficial que les proporcionan una apariencia uniforme y una mejor calidad de superficie. Estas características favorecen su utilización en aplicaciones donde se requiere precisión dimensional y buen comportamiento mecánico. Gracias a su versatilidad y facilidad de mecanizado, estas barras son ampliamente empleadas en la fabricación de componentes para estructuras metálicas, tales como puertas, ventanas, rejas y cercos. Asimismo, constituyen materia prima para la elaboración de diversos elementos mecánicos, entre ellos ejes, pernos, tuercas, pasadores, pines y piezas obtenidas mediante procesos de forjado o mecanizado. De igual manera, son utilizadas en la construcción y mantenimiento de maquinaria, equipos industriales y sistemas de transmisión mecánica, donde se requiere resistencia, durabilidad y confiabilidad en servicio. Debido a estas propiedades, las barras redondas lisas y pulidas tienen una amplia aplicación en los sectores metalmecánico, industrial y de la construcción.

En la Figura 5 se presenta la forma característica de una barra redonda lisa y pulida.

Figura 5

Barra redonda lisa y pulida



*Nota***:** Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

f) Pletinas

Las pletinas son productos metálicos obtenidos mediante procesos de laminación en caliente y se caracterizan por presentar una sección transversal rectangular, con un ancho considerablemente mayor que su espesor. Debido a su simplicidad geométrica, facilidad de fabricación y versatilidad, constituyen uno de los elementos más utilizados en la industria metalmecánica y en la construcción de estructuras metálicas.

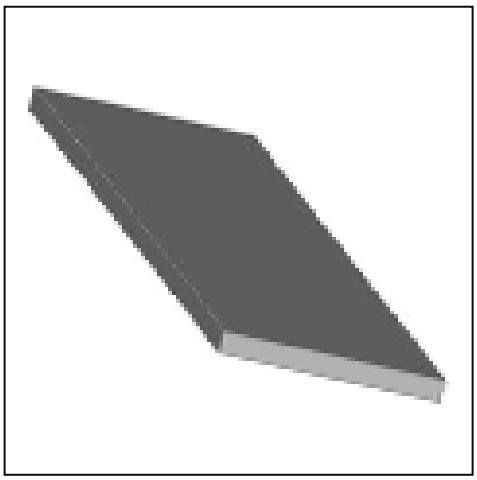
Estos productos son ampliamente empleados en la fabricación de puertas, ventanas, rejas, cercos, marcos estructurales y diversos elementos de soporte. Asimismo, sirven como materia prima para la elaboración de piezas forjadas, componentes mecánicos, uniones estructurales y accesorios utilizados en equipos industriales y obras civiles.

Las pletinas destacan por su facilidad para ser cortadas, perforadas, dobladas y soldadas, lo que permite adaptarlas a una gran variedad de aplicaciones.

En la Figura 6 se muestra la presentación característica de una pletina laminada en caliente.

Figura 6

Pletina



*Nota***:** Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

g) Barras cuadradas

Las barras cuadradas son productos metálicos obtenidos mediante procesos de laminación en caliente y se distinguen por presentar una sección transversal de forma cuadrada. Gracias a su geometría uniforme y a sus adecuadas propiedades mecánicas, son ampliamente utilizadas en la fabricación de componentes estructurales y elementos de uso industrial.

Estas barras tienen aplicación en trabajos de carpintería metálica, fabricación de rejas, portones, cercos, ventanas y estructuras ligeras. Asimismo, son empleadas en la elaboración de piezas mecánicas, herramientas, ejes, soportes y diversos componentes destinados a la industria metalmecánica.

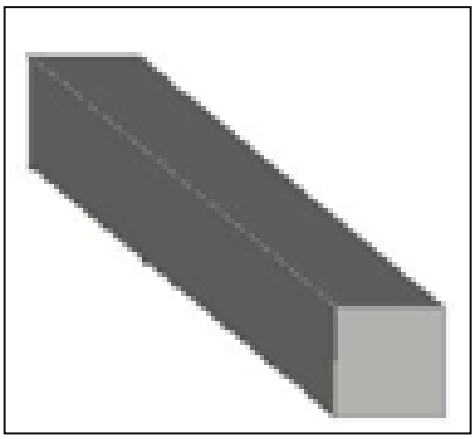
Una de sus principales ventajas radica en su facilidad para ser cortadas, soldadas, dobladas y mecanizadas, lo que permite adaptarlas a diferentes requerimientos de diseño y fabricación. Debido a ello, las barras cuadradas son utilizadas tanto en proyectos de construcción como en la producción y mantenimiento de equipos industriales.

En la Figura 7 se presenta la forma característica de una barra cuadrada laminada

en caliente.

Figura 7

Barra cuadrada



*Nota***:** Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

h) Barras hexagonales

Las barras hexagonales son productos metálicos fabricados mediante procesos de laminación en caliente y se caracterizan por presentar una sección transversal de seis lados iguales. Esta configuración geométrica facilita su sujeción y mecanizado, razón por la cual son ampliamente utilizadas en la industria metalmecánica para la fabricación de diversos componentes mecánicos y elementos de fijación.

Entre sus principales aplicaciones destaca la producción de pernos, tuercas, espárragos, ejes y otros elementos de ensamblaje empleados en estructuras y equipos industriales. Asimismo, son utilizadas en la fabricación de herramientas manuales, tales como cinceles, barretas y otros accesorios que requieren una adecuada resistencia mecánica y durabilidad durante su uso.

Las piezas elaboradas a partir de barras hexagonales pueden ser sometidas a tratamientos térmicos como el temple y el revenido, con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas, incrementar su resistencia al desgaste y optimizar su desempeño en condiciones de servicio exigentes.

Debido a su versatilidad, facilidad de mecanizado y capacidad para responder favorablemente a tratamientos térmicos, las barras hexagonales constituyen un material ampliamente utilizado en los sectores metalmecánico, industrial y de manufactura. En la Figura 8 se presenta la forma característica de una barra hexagonal laminada en caliente.

Figura 8

Barra hexagonal



*Nota***:** Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

i) Perfiles obtenidos por soldadura o unión de elementos estructurales

Los perfiles soldados son elementos estructurales fabricados mediante la unión de dos o más componentes metálicos a través de procesos de soldadura. A diferencia de los perfiles laminados convencionales, estos pueden ser diseñados y construidos con dimensiones y configuraciones específicas para satisfacer requerimientos particulares de resistencia, rigidez y capacidad de carga.

Generalmente, estos perfiles presentan secciones rectangulares o configuraciones especiales obtenidas a partir del ensamblaje de planchas, pletinas, ángulos u otros perfiles estructurales. Su fabricación permite optimizar el diseño de estructuras sometidas a diferentes condiciones de servicio, adaptándose a las exigencias establecidas en los cálculos y análisis estructurales.

Los perfiles soldados son ampliamente utilizados en la construcción de puentes, edificios, naves industriales, torres, plataformas metálicas y diversas estructuras de gran

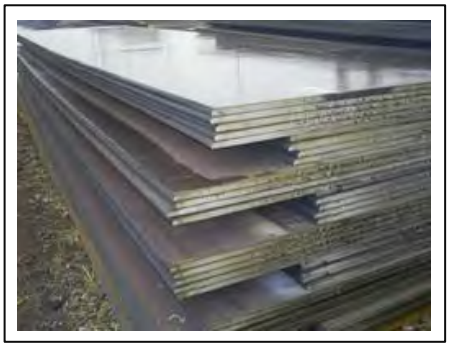
envergadura, donde se requieren elementos con dimensiones o características que no pueden obtenerse directamente mediante procesos de laminación comercial.

Una de sus principales ventajas radica en la flexibilidad de diseño, ya que permiten fabricar secciones estructurales adaptadas a las necesidades específicas de cada proyecto, contribuyendo a mejorar la eficiencia estructural y el aprovechamiento de los materiales.

Este producto se observa en la figura 9.

Figura 9

Chapas



*Nota***:** Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

2.4 Propiedades mecánicas y composición química

En la Tabla N.º 2, se muestra las propiedades mecánicas y en la Tabla N° 3 la composición química.

Tabla 2

Propiedades mecánicas del acero ASTM A36

Límite de fluencia mínimo		**Resistencia a la tracción**			
Mpa	Psi	Psi		Mpa	
		Min	Max	Min	Max
250	36000	58000	80000	400	550

*Nota***:** Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

Tabla 3

Composición química del acero ASTM A36

Carbono (C)	**0,26% máx.**
Manganeso (Mn)	No hay requisito
Fósforo (P)	0,04% máx.
Azufre (S)	0,05% máx.
Silicio (Si)	0,40% máx.
* Cobre (Cu)	0,20% mínimo

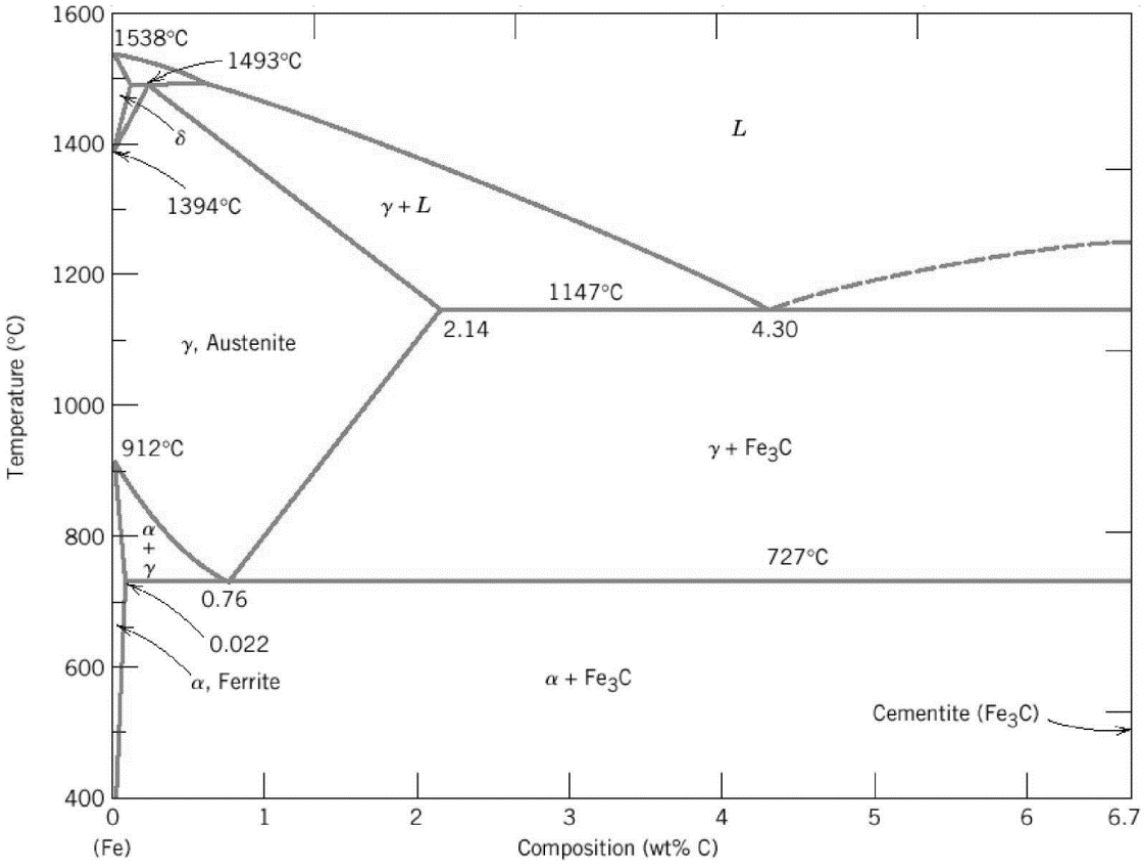
Nota: Aceros Arequipa (2020). Catálogo de productos

2.5 Diagrama de hierro – Carburo de Hierro (Fe-Fe3C)

Los cambios en cómo se organiza el hierro dependen mucho de los otros materiales que se mezclan con él, y el carbono es el más importante. La combinación de hierro y carbono, como se muestra en la figura 10, es fundamental cuando hay entre un 0. 008% y un 6. 67% de carbono. Si cambias la proporción de estos elementos o la temperatura, ocurren diferentes cambios. Todo esto se explica en un gráfico llamado diagrama de equilibrio hierro carburo de hierro. Gracias a este diagrama, podemos entender muchas de las características y las pequeñas estructuras de los aceros y las fundiciones de hierro al carbono. No obstante, en realidad no es un equilibrio perfecto, porque eso significaría que las fases no cambian con el tiempo. Se sabe que, a temperatura normal, el carburo de hierro tardaría muchísimo tiempo en separarse en hierro y carbono en forma de grafito, por eso se considera una fase que puede cambiar. Por eso, aunque el diagrama hierro carburo de hierro muestra un sistema que puede cambiar, es útil para entender los cambios que ocurren cuando se calienta y se enfría a una velocidad moderada, lo que da tiempo a que todo se mezcle y se distribuya bien.

Figura 10

Diagrama de Equilibrio Hierro – Carburo de Hierro



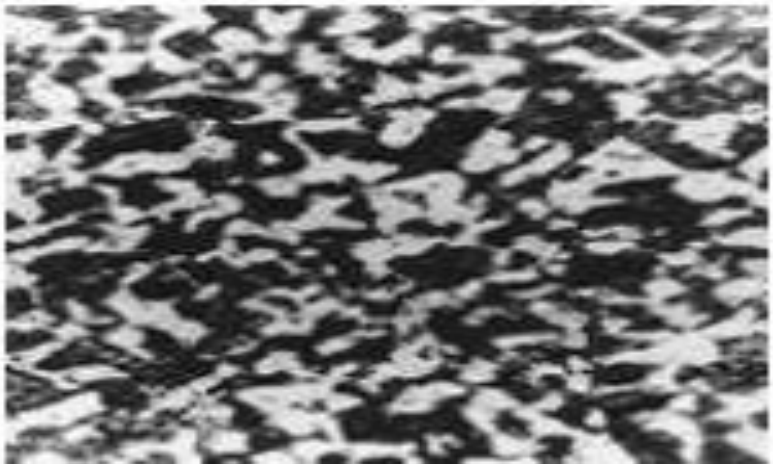
A continuación, se describen los microconstituyentes:

a) Ferrita

La ferrita, también llamada hierro alfa, solo puede albergar trazas de carbono; su capacidad para disolverlo es de apenas 0. 008% en peso a temperatura ambiente. En aceros de aleación, la ferrita puede incorporar cantidades considerables de ciertos elementos, como cromo, molibdeno, wolframio, silicio, aluminio y vanadio, que se agrupan como elementos alfa. Esta variante de ferrita ofrece una resistencia mecánica cercana a los 280 MPa (28 kg/mm²) y una gran flexibilidad, permitiendo extensiones de hasta el 35%. Su dureza ronda los 90 HB (Brinell). (Criado, 2008, pág. 69)

Figura 11

Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita 400X



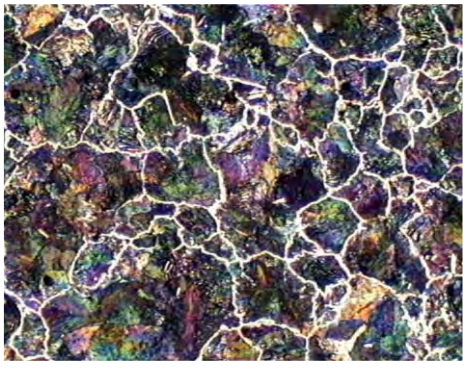
b) Cementita

La cementita, que es un carburo de hierro y se representa como Fe3C (ver figura 10), se forma a partir de un 6. 67% de carbono y un 93. 33% de hierro en peso.

Este es el componente más duro de los aceros al carbono, registrando una dureza superior a 68 en la escala HRC (unidades Rockwell C), lo que a su vez la vuelve bastante quebradiza. Su estructura cristalina se asemeja a un paralelepípedo ortorrómbico con medidas de 4. 5 x 5 x 6. 7 Å. La cementita conserva sus propiedades magnéticas hasta alcanzar los 218 °C (Criado, 2008, pág. 67).

Figura 12

Fotomicrografía de la microestructura de cementita en un acero al carbono.



c) Perlita

Esta es una estructura eutectoide formada por láminas intercaladas de ferrita y cementita. Tiene una composición precisa, con seis porciones de hierro por cada porción de carbono, lo que significa cerca de un 88% de ferrita y un 12% de cementita.

Su resistencia es de unas 250 HB (escala Brinell), si bien esto puede cambiar dependiendo de la distancia entre láminas, la cual depende de qué tan rápido se enfríe: más o menos 200 HB si se enfría en el horno y 250 HB si se enfría al aire (con un proceso de normalizado) (Criado, 2008, pág. 35).

Figura 13

Fotomicrografía de la microestructura de perlita en un acero al carbono.

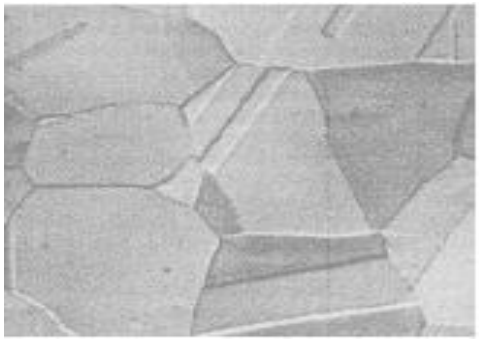


d) Austenita

La austenita es, básicamente, hierro gama con carbono disuelto, pudiendo albergar hasta un 2. 06% de carbono en peso a 1147 °C. Su dureza es de 300 HB y su resistencia oscila entre 88 y 105 kg/mm² (88 a 1050 MPa), con una elongación del 30% al 60%. Estas cifras son válidas si la austenita se mantiene a temperatura ambiente, como ocurre en aceros con mucho carbono o aleados. Si está caliente, la austenita se vuelve blanda, muy maleable, resistente y no es magnética. “Destaca por su gran resistencia al desgaste y es la fase más compacta que se encuentra en los aceros“(Criado, 2008, pág. 48).

Figura 14

Microestructura de la austenita a 325X



e) Martensita

La martensita forma los aceros templados. Se compone de una solución sólida supersaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita. Se consigue enfriando rápidamente los aceros desde su estado austenítico caliente. El nivel de carbono normalmente va de muy poco a un 1%. Sus características físicas cambian con la cantidad de carbono hasta un máximo de 0. 7 %C.

Figura 15

Microestructura de la martensita



La martensita alcanza una dureza de 50 a 68 HRc, una resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm2 y se extiende del 0. 5 al 2. 5 por ciento. Es bastante frágil y se ve en forma de agujas, formando grupos en zigzag a 60 grados. Los aceros templados comúnmente resultan muy duros y frágiles; este problema se arregla con el revenido. Esto implica calentar el acero por debajo de los 727°C, la temperatura crítica inferior, según la dureza que se quiera, y luego enfriarlo al aire o en cualquier medio.

f) Troostita

Se trata de una mezcla muy fina de cementita y ferrita. Se forma al enfriar la austenita un poco más lentamente que la velocidad crítica de temple, o al someter la austenita a una transformación isotérmica entre 500 y 600 grados Celsius, o al recalentar a 400 grados. Sus características físicas se encuentran a medio camino entre la martensita y la sorbita, ofreciendo una dureza de 400 a 500 HB, una resistencia a la tracción de 140 a 175 kg/mm2 y un alargamiento del 5 al 10%.

g) Sorbita

Este también es un conjunto muy fino de cementita y ferrita. Se logra enfriando la austenita a una velocidad bastante menor que la crítica de temple, o mediante una transformación isotérmica de la austenita entre 600 y 650 grados Celsius, o al recalentar a 600 grados. Su dureza varía de 250 a 400 HB, su resistencia a la tracción va de 88 a 140 kg/mm2, y su alargamiento se sitúa entre el 10 y el 20%. Podríamos decir que tanto la troostita como la sorbita son en realidad perlita con un grano extremadamente fino.

h) Bainita

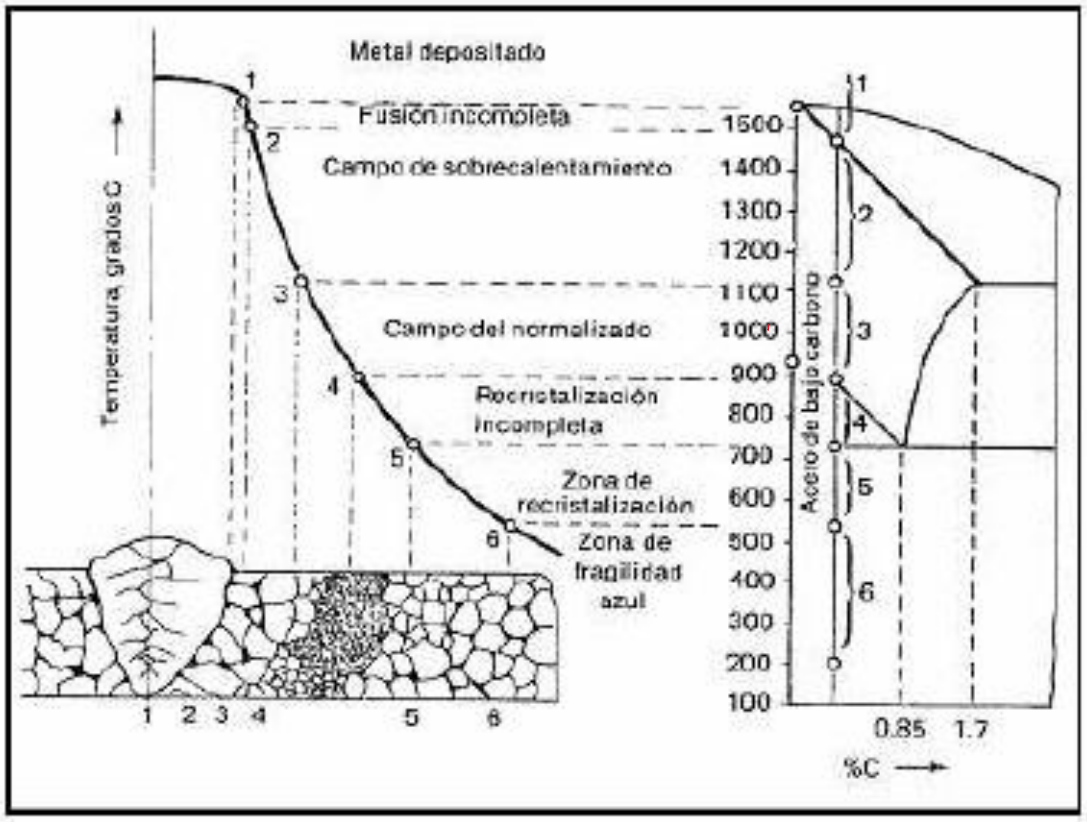
Es lo que se forma al calentar la austenita a una temperatura constante, cuando el agua de enfriamiento está entre 250 y 500°C. Hay dos tipos de estructuras: la bainita superior, que parece un árbol y se forma entre 500 y 580°C, con ferrita y carburos. La bainita inferior, que se forma entre 250 y 400°C, se ve como la martensita, con agujas de ferrita y finas láminas de carburos. La bainita es dura, entre 40 y 60 HRc, más que la perlita, pero menos que la martensita.

2.6 Diagrama Hierro – Carburo de Hierro y la Soldadura

La figura 16 contiene una gráfica que ilustra la conexión entre el diagrama de fases hierro carburo de hierro y las diversas áreas encontradas en la soldadura de aceros hipoeutectoides.

Figura 16

Diagrama de hierro – Carbono adaptado a la soldadura



2.7 Propiedades Mecánicas de los Aceros

Las características mecánicas y físicas del acero pueden diferir significativamente según su composición y la cantidad de impurezas presentes, como fósforo o sulfuro. “Por lo tanto, para obtener mejores propiedades mecánicas y físicas en relación con otras, se pueden añadir elementos como cromo, cobalto, cobre, molibdeno, níquel, nitrógeno, selenio, tántalo, titanio, tungsteno o vanadio al acero” (Esquivias, 2018, pág. 78).

a) Plasticidad

Se entiende como la capacidad del acero de mantener su forma tras haber sido sometido a una presión. “Los aceros que contienen pequeñas proporciones de carbono presentan una mayor plasticidad” (Esquivias, 2018, pág. 78).

b) Fragilidad

La fragilidad se refiere a la propensión del acero a romperse cuando se le aplica una carga. “Un acero aleado con un alto contenido de carbono tiende a ser más frágil (Esquivias, 2018, pág. 79).

c) Maleabilidad

La maleabilidad se define como la capacidad del acero para ser estirado en láminas. “Algunas mezclas de acero inoxidable son más maleables que otras” (Esquivias, 2018, pág. 79).

d) Dureza

La dureza representa la capacidad de un metal para resistir el desgaste por materiales abrasivos. “Cuanto mayor es la cantidad de carbono en una aleación de acero, mayor será su dureza” (Esquivias, 2018).

e) Tenacidad

La tenacidad se refiere a la habilidad del acero para soportar fuerzas externas sin fracturarse. “Para los aceros con un contenido medio de carbono, la tenacidad suele ser más elevada” (Esquivias, 2018).

2.8 Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (SMAW)

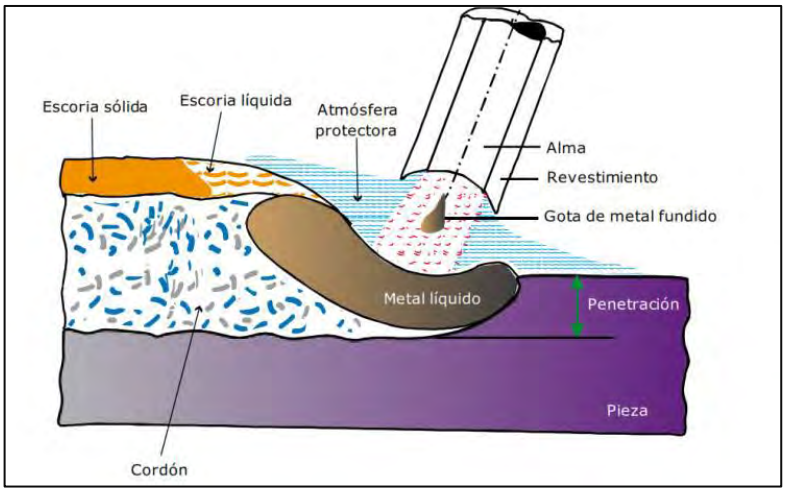
2.8.1 Definición y Antecedentes

Según AWS, este procedimiento se conoce como SMAW. La técnica de soldadura manual es la más común de todos los métodos de soldadura. La soldadura eléctrica, que se

refiere a la soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido, es un proceso que fusiona piezas de metal. Esto se logra al crear un circuito eléctrico cerrado al conectar la pinza que sostiene el electrodo, la cual está unida a un generador de corriente y al metal de base. En la figura 17 se puede ver la soldadura por arco con electrodo revestido junto con sus otros componentes (Rodríguez Pérez, 2013, pág. 37).

Figura 17

Soldadura por arco con electrodo revestido



Nota: Alonso (2012, pág. 39)

Usos y Ventajas del Soldeo por Arco con Electrodos Revestidos

En la soldadura manual mediante arco con electrodos revestidos es posible unir no solo acero al carbono, sino también aceros aleados, aceros inoxidables, fundiciones de hierro y otros metales como aluminio, cobre y níquel.

Ventajas:

- Se puede realizar tanto en exteriores (siempre que no haya lluvia o viento fuerte) como en naves cerradas o talleres.
- El equipo necesario no resulta demasiado costoso y su tamaño compacto lo hace muy práctico en comparación con otros métodos manuales.

- Gracias a la protección que ofrece el revestimiento, se puede evitar el uso de gases y otros sistemas auxiliares. Las mejoras en las características del electrodo permiten su uso en soldaduras de mayor calidad, como en recipientes y tuberías de alta presión.
- Es apto para usar con grosores que van desde 1,5 hasta 2 milímetros y su eficacia se mantiene hasta un poco más de 30 milímetros.
- Este método es adaptable gracias a la variedad y disponibilidad de electrodos.
- Se puede utilizar en cualquier orientación, tanto en espacios abiertos como cerrados, incluso en áreas con limitaciones de espacio. “No requiere sistemas de refrigeración a base de agua, ni tuberías o cilindros de gases protectores, lo que permite su uso en lugares relativamente distantes de la fuente de energía”. (Society, 2012)

Limitaciones:

- No se pueden unir metales que sean muy sensibles al oxígeno, ya que los gases que emite el recubrimiento no son suficientes para protegerlos. Ejemplos de estos son el titanio, circonio y tántalo.
- La soldadura de metales con bajo punto de fusión (usando electrodo) no es viable, como ocurre con el plomo, estaño y zinc.
- Este método es lento debido a su baja tasa de deposición y a la necesidad de eliminar la escoria, por lo que en ciertas aplicaciones ha sido sustituido por otros métodos.
- Se requiere un alto nivel de destreza por parte del operador de soldadura.
- No se puede aplicar en materiales con un grosor menor a 1. 5 mm.
- La tasa de deposición es menor que la de los métodos que emplean electrodo continuo, como el soldeo con alambre tubular o el procedimiento MIG/MAG. Esto se debe a que el electrodo solo puede consumirse hasta una longitud mínima

(aproximadamente 50 mm), y cuando alcanza esta longitud, el soldador debe quitar la parte no consumida del electrodo e insertar uno nuevo.

- Aunque teóricamente se puede unir cualquier grosor que supere los 1. 5 mm en este proceso (Society, 2012).

Principios del Proceso

Para conseguir la fusión, se concentra la energía térmica de un arco eléctrico creado entre los bordes de las piezas a unir y una varilla de metal, llamada electrodo, lo que genera una zona de fusión que al enfriarse forma una unión duradera.

El circuito se cierra por un instante al tocar la punta del electrodo en la pieza de trabajo y luego se retira rápidamente a una altura determinada, de 1,5 a 3 mm, lo que genera un arco. La temperatura provoca que una parte del material base y la punta del electrodo se fundan, creando pequeñas gotas de metal recubiertas por escoria líquida, que son transferidas al metal base mediante fuerzas electromagnéticas, resultando en la fusión de dos metales que se solidifican a medida que avanza el arco. Según Soldexa (2011), “esto se puede observar en la figura 18. Al establecerse el arco al raspar el electrodo (como encender una cerilla) sobre el metal, salta la chispa”. La temperatura que se produce alcanza cerca de 5000 °C, fundiendo tanto la punta del electrodo como el área afectada de la pieza. A medida que el electrodo se consume, el soldador desplaza el baño de fusión a lo largo de la junta a soldar.

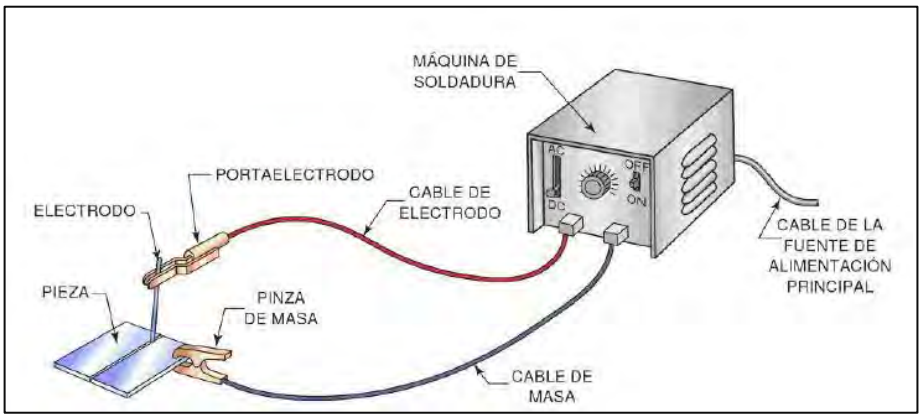
Mientras tanto, el calor se distribuye por el metal base, bajando la temperatura por debajo del punto de fusión, lo que hace que la parte del baño que queda fuera del arco se solidifique, formando lo que conocemos como cordón de soldadura.

Durante el proceso de soldadura, el electrodo se funde en pequeñas gotas que se añaden al baño de fusión hasta que se agota por completo. Cuando una corriente eléctrica atraviesa un material conductor, se genera calor en su interior. Los gases que se liberan del

recubrimiento protegen el baño de fusión del oxígeno y nitrógeno presentes en el aire. Dentro del recubrimiento se encuentra el núcleo o alma, una varilla que siempre debe tener la misma composición que el metal base y cuya longitud y diámetro pueden variar (Society, 2012).

Figura 18

Diagrama del proceso SMAW

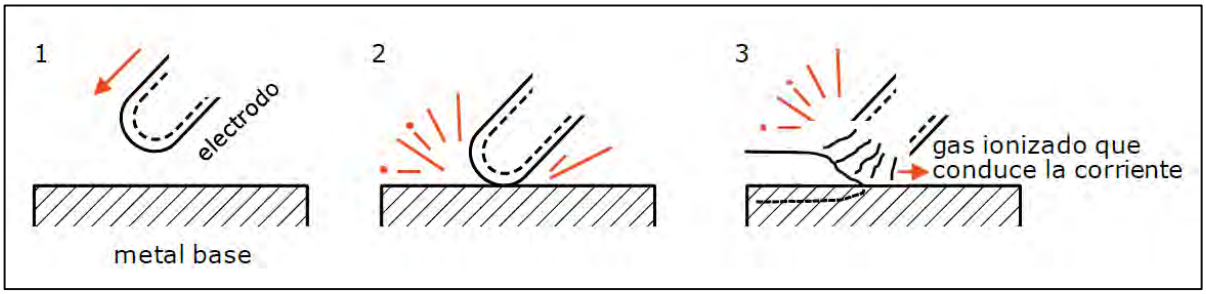


Nota: Jeffus (2009 , pág. 10)

El arco es la fuente de calor empleada en numerosos procedimientos de soldadura, ya que brinda elevadas concentraciones de calor y radiación. Se puede describir como una descarga de corriente, generalmente intensa, que fluye desde el electrodo hacia la pieza a través de los gases generados por el revestimiento del electrodo. Este fenómeno ocurre cuando se raspa el electrodo sobre la pieza, lo que provoca un calentamiento que ioniza el gas, convirtiéndolo en un buen conductor. Al alejar el electrodo, el gas ionizado permite la circulación de la corriente, dando lugar al arco. La presencia de materiales que ionizan con facilidad, como el sodio y el potasio en el revestimiento, favorece esta reacción. “El gas ionizado y conductor se denomina columna de plasma, y la corriente está formada por electrones que constituyen un flujo que va del polo negativo del equipo de soldadura (cátodo) hacia el polo positivo (ánodo)“ (Society American Welding, 2012). Esto se puede ver en la figura 19.

Figura 19

Gas ionizado como conductor de corriente.



Nota: Marcos (2015, pág. 2).

Transferencia Metálica

Cuando el electrodo se funde, se generan una serie de gotas de metal líquido junto con el recubrimiento, las cuales varían en tamaño dependiendo del tipo de electrodo y del tipo de corriente utilizada. El tamaño de estas gotas es crucial para determinar la calidad de la soldadura realizada con el electrodo. Las gotas más pequeñas crean cordones de soldadura más uniformes y, a medida que son más delgadas, el arco se vuelve más estable. Esto es especialmente relevante en la soldadura con corriente alterna. Los electrodos que se consumen en formas de gotas delgadas se funden más rápido, lo que mejora los tiempos de soldadura. Por el contrario, las gotas más grandes quedan más tiempo suspendidas en la punta del electrodo, lo que retrasa su fusión. Esta cualidad sugiere que es recomendable usar electrodos de este tipo para soldar espacios anchos o realizar soldaduras verticales en sentido descendente.

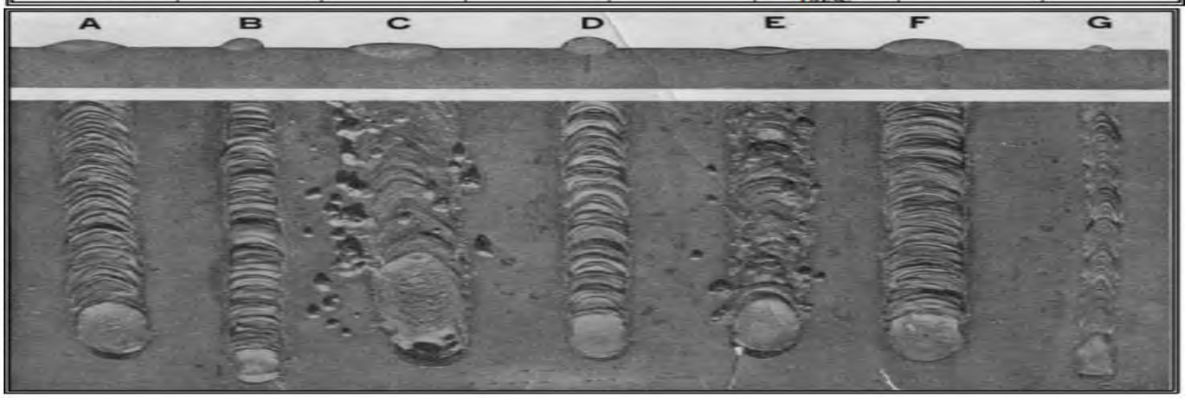
Variables del Proceso

Las variables en la soldadura son aquellos elementos que se pueden modificar para regular el proceso de soldadura. Para conseguir los resultados óptimos en este procedimiento, es imprescindible entender cómo cada variable influye en las diferentes características o propiedades del proceso de soldadura, como se ilustra en la figura 20.

Figura 20

Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones.

	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



*Nota***:** Oerlikon (2008, pág. 71).

Caraballo (2014) "señala que algunas variables pueden ser constantemente ajustadas o fácilmente evaluadas, lo que las convierte en mejores controles que aquellas que son difíciles de medir o que solo pueden ser alteradas de forma indirecta". Para comenzar el proceso de soldadura, es fundamental establecer previamente algunas de estas variables, que llamaremos:

- Variables Preseleccionadas: Incluyen el grosor del alambre-electrodo y su composición química. Los factores que permiten una adecuada elección de estas variables son: el tipo de material a soldar, su grosor, la posición de soldadura, el tipo de transferencia de metal que se busca y las propiedades mecánicas requeridas.
- Variables Primarias: Estas son las que regulan el proceso una vez que las Variables Preseleccionadas han sido establecidas, ya que influyen en la forma del cordón, la estabilidad del arco, el ritmo de soldadura (cantidad de metal añadido y velocidad de aporte) y la calidad de la soldadura." Estas variables comprenden la tensión del arco, la corriente de soldadura y la rapidez de avance" (Caraballo, 2014, pág. 2).

2.9 Efecto de las variables en el proceso SMAW

Para poder realizar correctamente una soldadura hay que considerar muchas variables

que se deben ajustar antes de su realización.

a) Diámetro del electrodo

Por lo general, se buscará seleccionar el tamaño más grande posible considerando el grosor del material a unir, la posición y el tipo de conexión, que son los factores clave en la elección del tamaño del electrodo. Esto permite un mayor suministro de material.

El aporte de calor depende de manera directa de la intensidad, la tensión del arco y la velocidad de desplazamiento, todos ellos influenciados por el tamaño del electrodo; en este sentido, el aporte térmico aumenta con el tamaño del electrodo. Cuando se necesita un aporte térmico reducido, es recomendable utilizar electrodos más delgados. Como regla general, se aconsejan:

- Electrodos delgados (2, 2. 5, 3. 25, 4 mm) para: puntos de soldadura, uniones de piezas delgadas, primeras capas, soldaduras en posición de cornisa, vertical y en techo, y cuando se necesite un bajo aporte térmico.
- Electrodos de mayor tamaño para: uniones de materiales de espesores medios y gruesos, soldaduras en plano y recubrimientos.
- El uso de electrodos de gran tamaño puede resultar en un cordón de soldadura excesivo, innecesario y costoso, además de poder actuar como un concentrador de tensiones debido a un perfil inadecuado (Lincoln Electric, 2013, pág. 15).

b) Intensidad de soldeo

Esta variable es clave porque influye en la cantidad de calor que se aporta. Por ejemplo, en diámetros reducidos se requieren menores intensidades, lo que conlleva a un aporte térmico reducido. La intensidad varía según el tipo de junta y la ubicación de la soldadura. Una vez que el arco ha comenzado, es posible regular la intensidad según el tipo de baño que se forme:

- Si el baño es grande, indica un exceso de intensidad, por lo que se debe disminuir.
- Si el baño es pequeño, significa que falta intensidad, la cual debe aumentarse (Alonso, 2012, pág. 70).

Cada electrodo, en relación a su diámetro, tiene un rango específico de intensidades para su uso; nunca se deben manejar intensidades superiores a este rango, ya que podrían generar mordeduras, proyecciones, aumento de los efectos del soplo magnético e incluso fracturas (Lincoln Electric, 2013, pág. 15).

a) Longitud de arco

La longitud del arco se refiere a la distancia entre la punta del electrodo y el metal que se pretende unir. La longitud del arco que se debe utilizar varía según el tipo de electrodo, su grosor, la posición de soldadura y la corriente. Por lo general, esta longitud debe coincidir con el grosor del electrodo, salvo en el caso de los electrodos de tipo básico, cuya longitud debe ser la mitad de su grosor.

Es recomendable mantener una longitud de arco constante para prevenir fluctuaciones en la tensión y la corriente, lo que podría ocasionar una penetración irregular. Un arco que sea demasiado corto puede generar problemas y causar cortocircuitos durante el proceso de transferencia del metal, mientras que un arco excesivamente largo puede perder hacia dónde apunta y su fuerza. Además, los gases y el fundente creados por el recubrimiento no serán tan efectivos para proteger el arco y el metal de soldadura, lo que podría dar lugar a porosidad y contaminación del metal de soldadura con oxígeno e hidrógeno.

b) Velocidad de soldeo

No existe una regla matemática para regular la velocidad de desplazamiento ya que depende de la habilidad del soldador que debe equilibrar su velocidad de soldadura con el resto de los parámetros. No obstante:

- Cuanto mayor es la velocidad, menor es la anchura del cordón y menor su penetración, menor es el aporte térmico y más rápidamente se enfriará la soldadura, afectando su estructura metalúrgica final y como consecuencia directa a sus propiedades mecánicas finales (carga, rotura, impacto y durezas) (Alonso, 2012, pág. 70).
- Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases (produciéndose poros) (Lincoln Electric, 2013, pág. 18).
- Con una baja velocidad el cordón será ancho y convexo y poca penetración, debido a que el arco reside demasiado tiempo sobre el metal depositado, (efecto "colchón"), en vez de concentrarse sobre el metal base.

"En la práctica, hay que intentar que el arco vaya ligeramente adelantado al baño, pero depende de la posición de soldadura" (Alonso, 2012, pág. 70).

d) Corriente de soldadura

La elección del tipo de corriente para realizar soldadura se basa en gran medida en el tipo de electrodo que se empleará y en la disponibilidad de corriente en el área de trabajo. Aunque la corriente continua (CC) es la más comúnmente utilizada, se está viendo un incremento en la utilización de electrodos que son compatibles con corriente alterna (CA). Aunque la CA resulta ser más asequible, este aspecto no tiene un impacto considerable en el gasto total de soldadura y no afecta de manera significativa la decisión sobre el tipo de corriente a usar (Alonso, 2012, pág. 70).

Tabla 4
Comparación entre corriente continua y corriente alterna.

Parámetro	Corriente Alterna	Corriente Continua
Cebado de acero	No es fácil especialmente en diámetros pequeños, se debe añadir sustancias para facilitar el cebado.	Fácil
Mantenimiento del arco	Debido al cambio de polaridad es más difícil de mantener estable el arco.	Fácil de mantener el arco.
Tipo de electrodo	No se puede utilizar con todos los electrodos. El revestimiento debe contener sustancias que restablezcan el arco.	Válida para todo tipo de electrodos.
Caída de tensión en los cables	La caída de tensión es pequeña por lo que es especialmente adecuada para el punto de soldadura esté alejado de la fuente de alimentación.	Los cables han de ser tan cortos como sea posible por la gran caída de tensión.
Posiciones de soldeo	Especialmente adecuada para todas las posiciones con el electrodo adecuado.	Es de fácil uso en posición para secciones gruesas.
Salpicaduras	Es más abundante.	Escasas
Soplo magnético	Prácticamente inexistente.	El efecto es muy acusado, especialmente cerca de los bordes o de más. Aumenta con la intensidad.

Nota: Alonso, C. (2012). Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto. Cano Pina Ceysa (pág. 56)

De manera más general, las principales ventajas y desventajas de cada tipo de corriente son las siguientes:

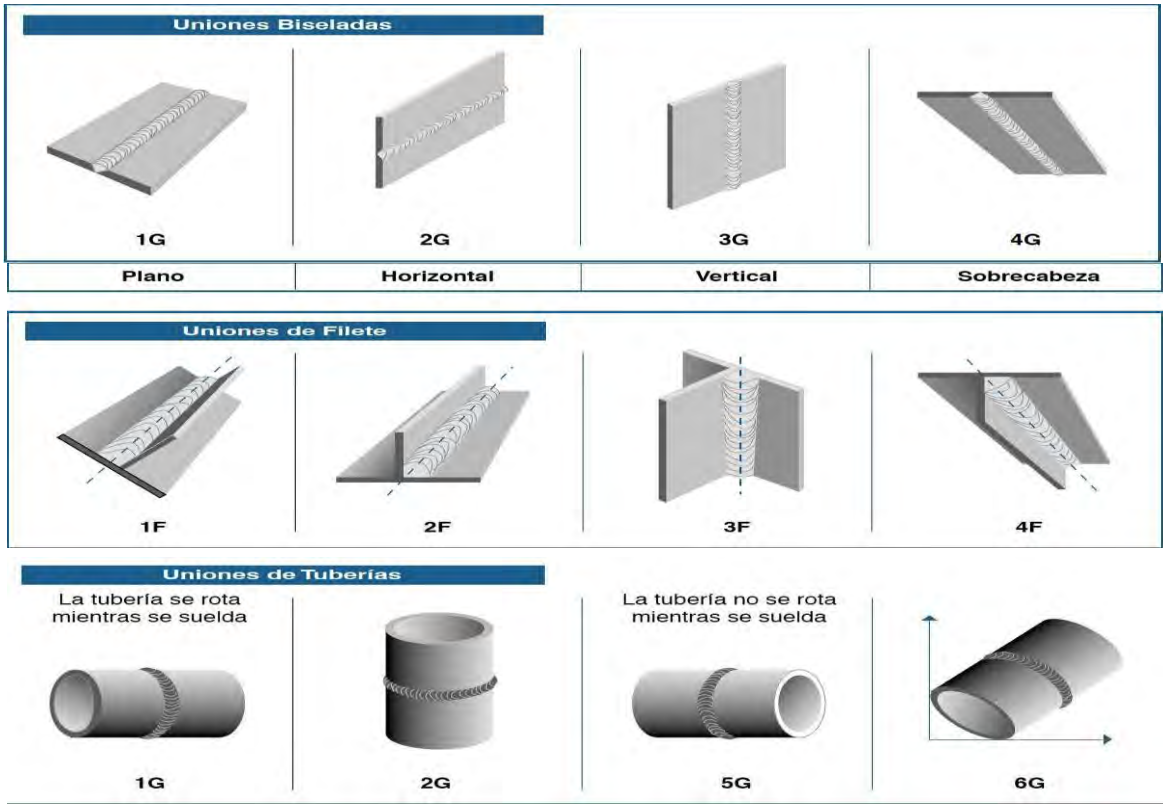
- Se pueden utilizar todos los tipos de electrodos con corriente continua, a diferencia de los de corriente alterna.
- La soldadura de láminas delgadas resulta más complicada con corriente alterna.
- El costo del transformador es inferior al de un rectificador correspondiente. Su eficiencia es superior a la del convertidor o rectificador, y las pérdidas en vacío son mínimas.
- En corriente alterna, el efecto del soplo magnético es casi nulo. “Hoy en día, hay electrodos en los que, excepto a altas intensidades, este efecto es relativamente menor” (Soldexa, 2011, pág. 23).

Posiciones de Soldadura

De acuerdo a la designación por ANSI/AWS A 3.0-85, estas posiciones se muestran en la figura 21.

Figura 21

Posiciones de soldadura



Tipos de junta

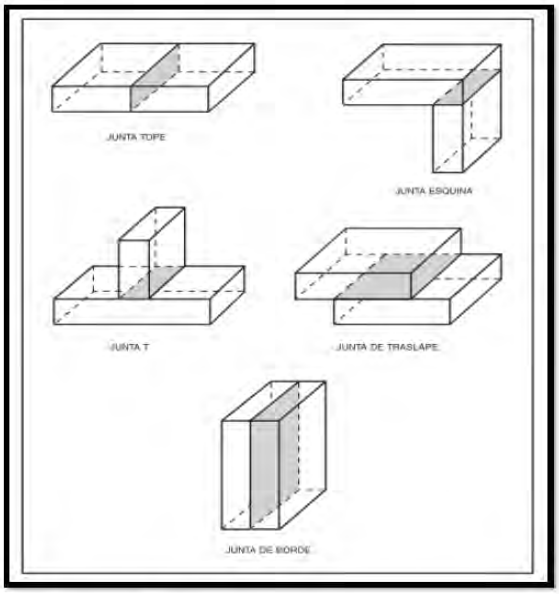
Se encuentra los siguientes tipos:

- A tope
- En T
- Solape
- Borde
- Esquina" (Arce, 2020).

A continuación, en la figura 22 se ilustra los tipos de uniones soldadas:

Figura 22

Tipos de junta



Nota: AWS D.2.4 2012

2.9 Metalurgia de la Soldadura

En la actividad industrial de la soldadura, el material de adición raramente es igual al metal base. Esta variación en la composición y las propiedades de la distribución del calor en la unión soldada dan lugar a una estructura heterogénea que puede incluir hasta seis áreas metalúrgicas diferentes. (Pastor, 2002).

Hay un consenso general entre los diversos autores en la literatura técnica actual de que una soldadura típica está compuesta por:

- La zona compuesta (zona derretida)
- La zona sin mezclar
- La interfaz de la soldadura
- La zona parcialmente derretida
- La zona afectada por el calor

• El metal base sin alteraciones

Zonas metalúrgicas de la soldadura

En la figura 23 se observan las Zonas metalúrgicas producidas en una junta soldada, las cuales se describen a continuación:

a) La región compuesta. - Es el área donde el metal de soldadura y el metal base se combinan al estar fundidos, creando lo que se conoce como zona de fusión. Por ejemplo, al soldar hierro fundido usando electrodos de níquel, el charco de soldadura se forma por una mezcla líquida uniforme de níquel disuelto en el hierro gris.
b) La región no mezclada. - Se trata de un área muy delgada que rodea la región compuesta. Está formada por una capa de metal base fundido que solidifica antes de que ocurra cualquier combinación en la zona compuesta. El grosor de esta región normalmente varía entre unas pocas decenas de micrones y 2. 5 mm, dependiendo del tipo de soldadura y la velocidad de enfriamiento. La composición del metal en esta área es bastante similar a la del metal base. Aunque la región no mezclada está presente en todas las soldaduras, se puede observar claramente solo en aquellas en las que el metal de aporte es muy diferente al metal base.
c) La interfaz de la soldadura. - En esta área se establece un límite claro entre el metal base que no ha sido fundido y el metal de soldadura. Esta región puede ser analizada a través de un ataque químico en soldaduras donde hay un alto contenido de aleación y un amplio rango de solidificación entre líquidos y sólidos.
d) La zona de fusión parcial. - Se localiza en el material base. Es el área que se encuentra justo al lado de la interfaz de soldadura donde puede tener lugar una fusión localizada. Este tipo de fusión sucede frecuentemente porque muchas aleaciones cuentan con inclusiones de bajo punto de fusión o segregaciones en los

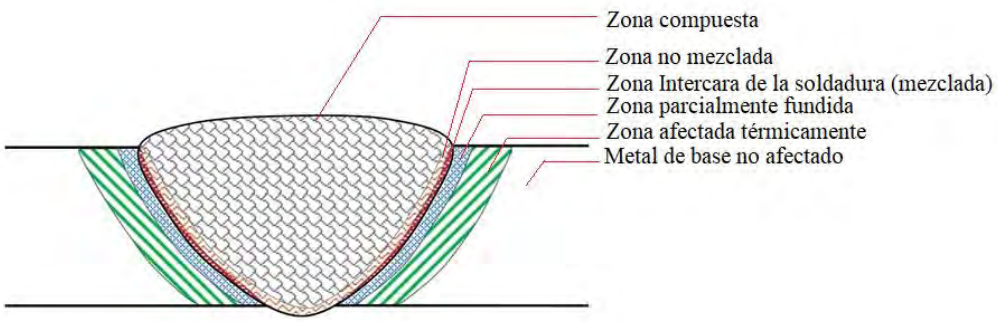
límites de grano. Cuando esas pequeñas áreas se funden, se extienden desde la interfaz de soldadura hacia la zona de fusión parcial.

e) La zona influenciada térmicamente. - Es el área de la soldadura que sufre temperaturas máximas lo suficientemente altas para generar cambios microestructurales en estado sólido, aunque no al punto de provocar fusión.

f) El metal base sin alterar. - Es la parte de la pieza soldada donde no se han presentado cambios en la microestructura. A pesar de que en esta área no ocurren alteraciones microestructurales, el ciclo térmico generado por la soldadura puede provocar importantes tensiones residuales de contracción tanto en dirección longitudinal como transversal (Pastor, 2002).

Figura 23

Zonas metalúrgicas producidas en una junta soldada



Nota: nuevo esquema de regiones de la unión soldada

Zona Fundida

A) Formación de la Costura

El material que forma la zona derretida puede poseer la misma composición química que el material base, como sucede en las soldaduras realizadas en bordes rectos sin el uso de material añadido en métodos de soldadura por arco, por llama, por resistencia eléctrica, etc. , o puede presentar una composición química que surge de la mezcla del material base con el material de aporte si este se utiliza durante el proceso.

Hay factores que contribuyen a una variación en la composición química final de la zona de fusión o costura, tales como: las temperaturas elevadas del proceso, los fundentes y los recubrimientos, el tipo de técnica empleada, entre otros. No obstante, estas circunstancias están reguladas con el fin de lograr una zona fundida que cumpla con los estándares de calidad requeridos.

En la zona de fusión donde el metal transita del estado líquido al sólido, se producen varias transformaciones físico-químicas o estructurales que se abordarán a continuación y que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Cambios químicos.

- Absorción de gases.

- Formación de compuestos de la solución sólida.

- Transformaciones eutécticas.

- Cambios estructurales.

B) Modificaciones Químicas

En la región fundida se llevan a cabo diversas reacciones químicas que generan cambios en esta, tales como la reducción de elementos valiosos como el carbono en el acero o el silicio en los metales fundidos; la absorción de grandes cantidades de carbono, azufre o fósforo a través de la llama o el recubrimiento del electrodo, así como la incorporación de elementos especiales provenientes del revestimiento en la piscina de metal fundido a través de procesos micro metalúrgicos, con el fin de mejorar las cualidades mecánicas o químicas de la unión. También hay alteraciones químicas en el área fundida debido a la absorción de gases como oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, sin embargo, dado que este tema es relevante, se analizará más a fondo en un capítulo separado más adelante (Burgos, 1987).

Las alteraciones químicas en la región fundida se pueden clasificar en tres categorías: pérdida de elementos por oxidación, absorción de elementos nocivos y incorporación de elementos beneficiosos.

C) Pérdida de Elementos por Oxidación

En lo que respecta a los aceros, las pérdidas ocasionadas por oxidación surgen debido a la reducción del óxido de hierro causada por los elementos que lo componen, como el silicio, el manganeso y el carbono, tal como se analiza en las ecuaciones (6), (7) y (8). Los óxidos de silicio y manganeso no se integran al metal fundido y se trasladan a la escoria, además, los óxidos de manganeso y hierro pueden interactuar con óxidos ácidos, formando silicatos como 2 FeO. SiO2; 2 MnO. SiO2 y titanatos del tipo 2 FeO. TiO2, los cuales también son trasladados a la escoria. El óxido de carbono no se mezcla con el metal líquido y se escapa de este, aunque una parte puede quedar atrapada en la soldadura y dar lugar a la formación de poros.

D) Fijación de Elementos Perjudiciales

La captura de grandes cantidades de carbono, fósforo o azufre en la zona fundida, ya sea por la llama o el recubrimiento del electrodo, provoca deterioro en las propiedades mecánicas de esta área. La incorporación de carbono en la soldadura realizada con llama oxiacetilénica se produce por un mal ajuste de la llama, lo que resulta en que la unión se realice con una llama rica en carbono. En la soldadura por arco eléctrico, la adición de carbono proviene de ferroaleaciones en el revestimiento que incluyen este elemento. En ciertas ocasiones, la adición de carbono no es perjudicial, como sucede en la soldadura de los hierros fundidos, donde el mantenimiento de este elemento es crucial para asegurar la grafitización de los materiales durante el proceso (CIME, 1993).

El incremento en los niveles de fósforo y azufre en la soldadura con llama oxiacetilénica proviene de impurezas en el acetileno, tales como el sulfuro de hidrógeno (SH2) y el fosfuro de hidrógeno (PH3). En la soldadura por arco eléctrico, esta presencia se atribuye a las ferroaleaciones del recubrimiento que contienen estos elementos.

E) Fijación de Elementos Favorables

Los recubrimientos de los electrodos presentan como una de sus ventajas la capacidad de aportar elementos aleantes a la zona de unión, con el fin de optimizar sus características mecánicas o químicas; estos aleantes se integran al recubrimiento en forma de ferroaleaciones en granos y es posible, por ejemplo, conseguir una unión de un acero aleado utilizando un electrodo cuyo núcleo metálico sea de acero con bajo contenido de carbono.

Desde una perspectiva teórica, es posible lograr cualquier tipo de aleación en la unión, pero en la práctica, estas opciones son limitadas, debido a factores que afectan al electrodo, como la alta afinidad de ciertos componentes de la aleación por el nitrógeno, la reducción en la fluidez del metal fundido, la aparición de poros en la unión, entre otros.

F) Estructura del Grano

La configuración de la zona de fusión está determinada principalmente por la estructura del metal base y por las condiciones durante la soldadura. El inicio del crecimiento sucede de manera epitaxial junto a los granos del metal base que están parcialmente fundidos. La selección preferente de los granos durante la soldadura favorece la creación de una estructura en columnas.

Las transformaciones que se presentan en el proceso de soldadura son de dos tipos; las que impactan la estructura del grano y las que ocasionan cambios estructurales o variaciones de fase asociados a la templabilidad del acero. Los granos empiezan a formarse en la línea de

fusión, donde la temperatura es más baja y su crecimiento es desigual, ya que al aumentar de tamaño y presionarse entre sí, cada cristal se comporta según su estado de desarrollo.

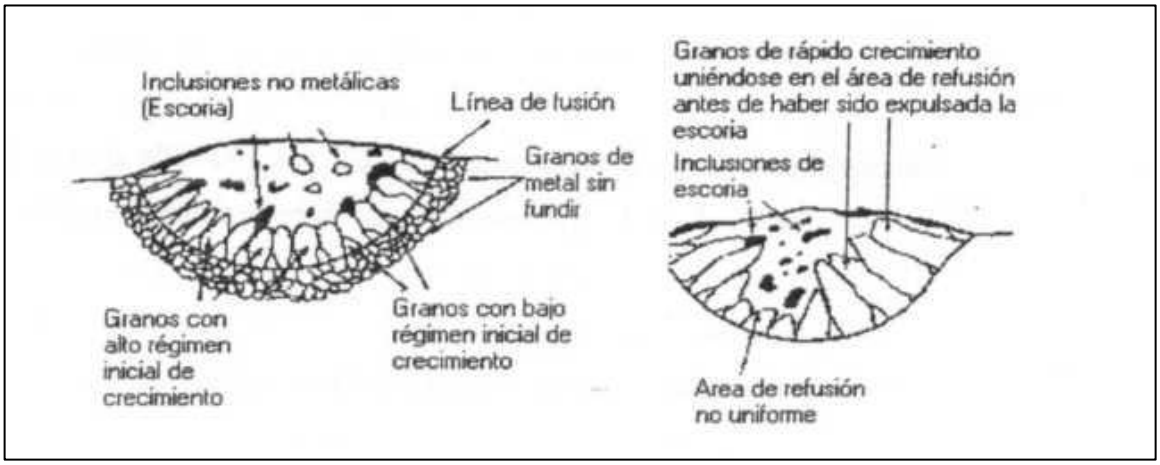
Cuando se realizan soldaduras en múltiples pasadas, la estructura de solidificación del área de soldadura se ve afectada por refusión y recristalización ocasionadas por las pasadas posteriores. La estructura del metal soldado y la correcta solidificación del área del metal dependen, en parte, de la relación existente entre el ancho de la soldadura y su profundidad de penetración.

G) Forma del Pozo de Soldadura

La configuración del pozo de soldadura es un factor clave, ya que determina la formación del grano. Los granos se desarrollan de manera epitaxial desde el metal de base en dirección al arco. Esto ocurre porque la dirección del mayor gradiente térmico varía continuamente desde cerca de 900 °C en relación con la interfase. Por lo tanto, los granos que están mejor alineados tienen una mayor probabilidad de expansión y bloquearán el desarrollo de otros granos que tengan orientaciones menos ideales.

Figura 23

Sección transversal de los cordones de soldadura en los que se aprecian inclusiones de escoria



*Nota***:** Fosca (2005)

Efecto de la Geometría de la Pileta Líquida.

La configuración de la piscina de metal fundido o piscina de fusión está influenciada por la rapidez con la que avanza el cordón de soldadura, así como por la relación entre el calor generado y las circunstancias de enfriamiento. Si la velocidad es baja, la piscina tiende a adoptar una forma ovalada; en cambio, si la velocidad aumenta, esta se alarga en forma de gota.

En síntesis, la configuración de la piscina de metal fundido afecta la dirección del crecimiento de los granos, la velocidad a la que crecen y el gradiente de temperatura en el líquido.

Cuando la piscina de fusión toma la forma de gota, el gradiente de temperatura máximo se mantiene prácticamente constante en su dirección en todos los puntos de la frontera de solidificación, desde el borde hasta el centro del cordón. Como resultado, cualquier grano que esté orientado de manera favorable puede crecer a una velocidad ideal y expandirse a expensas de aquellos que están orientados de manera menos favorable, lo que provoca que en el centro del cordón haya un número relativamente limitado de granos.

Por otro lado, cuando la piscina de fusión tiene un contorno elíptico, la dirección del gradiente máximo varía constantemente desde el borde hasta el centro del cordón. Por lo tanto, muchos granos, aunque solo por breves momentos, se encuentran en condiciones propicias para su crecimiento y logran llegar hasta la línea central del cordón.

Figura 24

Modelos de crecimiento competitivo en función del gradiente Térmico: Pileta de fusión en forma elíptica



*Nota***:** Fosca (2005)

Figura 25

Modelos de crecimiento competitivo en función del gradiente Térmico: Pileta de fusión en forma de gota.



*Nota***:** Fosca (2005)

Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura por arco

Los factores que influyen son:

Aporte de Calor (heat input).

"La energía térmica es la cantidad de energía que contribuye un proceso de soldadura al crear un cordón por cada milímetro de longitud, y se mide en Joules por milímetro (J/mm). En el caso de los procesos de soldadura mediante arco eléctrico, se calcula el input térmico utilizando la ecuación 2". (Fosca, 2005)

$$Hnet = \frac{V\ x\ I}{v}\ \text{Ec. 1}$$

Hnet = Calor suministrado (j/mm)

I = Intensidad de corriente (A)

V = Tensión eléctrica (V)

v = Velocidad de soldeo (mm/seg)

La fórmula 1 facilita el entendimiento de la energía total que genera la máquina (H). No obstante, una porción de esta energía se pierde antes de que alcance la soldadura, debido a fenómenos como la radiación, la convección y la conducción tanto en el arco como en la pieza (A. Garcia, 2010). Por consiguiente, resulta relevante calcular la energía neta suministrada (Hnet), que se obtiene multiplicando la entrada térmica bruta por la eficiencia del procedimiento de soldadura, tal como se detalla en la fórmula 2 (Fosca, 2005).

$$Hnet = \frac{VxI}{v} \times f\ Ec. 2$$

Donde:

f: Eficiencia térmica

La eficiencia térmica de los diferentes procesos se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5
Eficiencia térmica de los procesos de arco

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

*Nota***:** García, 2010:84

Temperatura Inicial de la Chapa (o Temperatura de Precalentamiento)

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

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.

Características Térmicas del Material

Está vinculado a la capacidad del material para conducir calor.

• A menor conductividad térmica, más marcada será la variación de las temperaturas máximas. En otras palabras, el área sometida a calor será más reducida.

• Si la conductividad térmica del metal es mayor, el enfriamiento tras la soldadura será más rápido.

• A mayor conductividad térmica, el tiempo que el material estará expuesto a altas temperaturas será más breve.

Diámetro del electrodo.

Para fundir un diámetro de electrodo más grande, se necesita más calor. Este factor es poco relevante, pero tiene un impacto en el tamaño de la fuente de calor.

Por último, es importante considerar que ciertas temperaturas generan cambios microestructurales en el metal que inciden en las propiedades mecánicas de la unión soldada. Por lo general, en el caso de los aceros, los cambios metalúrgicos ocurren después de ser expuestos a temperaturas que oscilan entre la temperatura crítica inferior (723 °C) y la de fusión (1480 °C). Las partes de la pieza que alcancen valores entre los límites mencionados en la parte superior, al llevarse a cabo una soldadura, sufrirán alteraciones importantes en su microestructura y, por ende, en sus propiedades mecánicas (Fosca, 2005).

Cálculo del Ancho de la ZAC

Uno de los usos más fascinantes de la fórmula que nos proporciona la temperatura más alta en un punto es la determinación del ancho de la ZAC a través de la soldadura. No obstante, para obtener esta anchura con precisión, es imprescindible localizar el extremo de la ZAC que se encuentra más distante de la soldadura, utilizando un valor máximo de temperatura en ese punto; este valor térmico debe estar vinculado a un cambio en la estructura o en las propiedades del material que se está soldando.

A pesar de que la fórmula que describe la temperatura máxima resulta muy valiosa, no debemos pasar por alto las limitaciones que conlleva su uso. Esta fórmula se emplea en procesos de una sola pasada con penetración completa, tanto en soldadura como en corte térmico, sin considerar el grosor del material. De hecho, también se aplica a cualquier soldadura de arco que logre una penetración total y contenga menos de cuatro pasadas. La ecuación puede utilizarse en función de una pasada, sin embargo, la temperatura que se registra entre pasadas, es decir, la temperatura a la que la zona de soldadura se enfría entre cada pasada, puede ser interpretada como un valor de T0 en la fórmula de la temperatura máxima.

$$Y = \left[\left(\frac{1}{Tmax - T_o}\right) - \left(\frac{1}{Tfusion - T_o}\right)\right] \; Ec.3$$

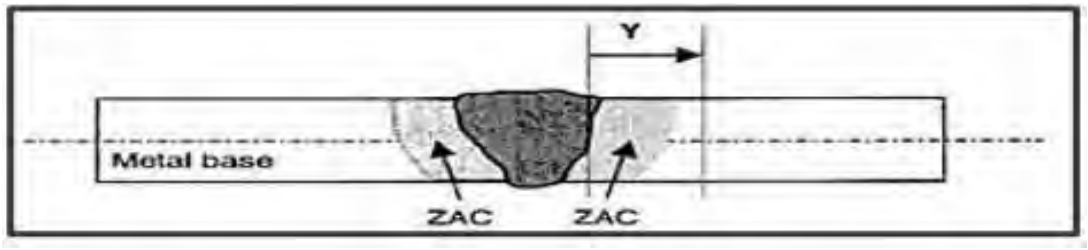
Ecuación de la temperatura máxima en cada punto de la ZAC

En esta sección, se muestran ciertas ecuaciones que facilitan la comprensión del impacto de varias variables en las diferentes propiedades del ciclo térmico durante un procedimiento de soldadura.

En la ilustración 27, la soldadura a tope con penetración total y un solo pase realizada en chapa, la repartición de las temperaturas más elevadas, en el metal base cercano a la soldadura, está descrita por la ecuación 5.

Figura 26

Temperatura máxima de la ZAC a una distancia Y



La temperatura máxima en cualquier punto de la ZAC, viene dada por la ecuación:

$$\frac{1}{T_{max} - T_0} = \frac{4.13 * \rho * C * t * Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_{fusion} - T_0} \; Ec.4$$

Donde:

- Tmax = Temperatura máxima (°C) a una distancia Y (mm) del extremo o contorno del metal fundido.
- To = Temperatura inicial de la chapa. (°C)
- Tfusion = Temperatura de fusión (°C) (Temperatura del liquidus del metal a soldar)
- C = Calor especifico del metal sólido (J/g.°C)
- Hnet = energía aportada neta (J/mm) t= Espesor de la chapa a soldar (mm)
- ρ = Densidad del material (g/mm3)
- $\boldsymbol{\rho C}$ = Calor especifico volumétrico (J/mm3°C) Y=Ancho de la zona afectada térmicamente en mm

La ecuación del máximo de temperatura se puede utilizar con diferentes propósitos, entre los que se encuentran:

- La determinación de la temperatura máxima en puntos determinados de la ZAC.
- La estimación del ancho de la ZAC.
- La demostración del efecto causado por el precalentamiento sobre el ancho de la ZAC.

Una de las aplicaciones más fascinantes de la ecuación de Tmáx. es la estimación del tamaño de la Zona Afectada por el Calor, conocida como ZAC, a consecuencia de la soldadura. No obstante, para poder calcular el tamaño de la ZAC, es esencial primero determinar el rango de temperaturas que la define. Es evidente que el borde de la ZAC más cercano al área de soldadura está limitado por la temperatura de fusión del material base (Tfusión), ya que la ZAC constituye la zona de metal sólido más cercana al charco de metal líquido. El límite más distante de la ZAC se establece por la temperatura mínima donde ocurren cambios microestructurales en estado sólido en el material base, que alteran *Nota*blemente las características de la unión soldada. Por ejemplo, en el caso de los aceros al carbono o de baja aleación, el contorno queda definido por los puntos que han alcanzado una temperatura máxima de 723 °C.

Así, el ancho de la ZAC se determina mediante la ecuación 5.

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_0}\right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_0}\right)\right]\left[\frac{H_{net}}{4.13 * \rho * C * t}\right] \; Ec.5$$

Fuente: introducción a la metalurgia de la soldadura

2.101. Velocidad de Enfriamiento

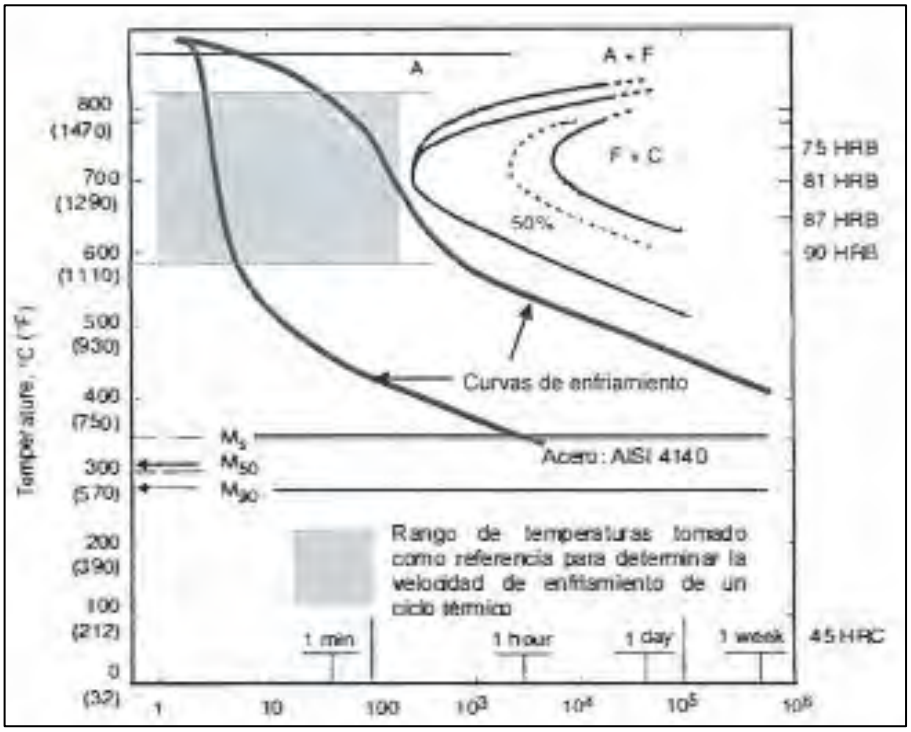
Después de determinar el ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en una unión soldada, un aspecto clave del ciclo térmico es la velocidad de enfriamiento de la soldadura. Una vez que un punto en el metal fundido o cercano a él alcanza su temperatura máxima, la rapidez con la que se enfría puede influir considerablemente en la estructura metalúrgica y en las propiedades mecánicas de la ZAC, lo cual es especialmente relevante en aceros tratados térmicamente.

Al analizar el ciclo térmico de un punto específico en la ZAC, no existe una única velocidad de enfriamiento, sino varias, dependiendo de la temperatura a la que se encuentra el acero durante el enfriamiento.

En realidad, la región de temperaturas críticas que nos interesa para conocer la velocidad de enfriamiento del acero se encuentra entre los 800ºC y los 500ºC. Este rango corresponde a la parte superior de la curva en "S", como se observa en la figura 28, que muestra una curva TTT de un acero AISI 4140 (aleado con Cr-Mo), donde se han superpuesto dos curvas de enfriamiento derivadas de un ciclo térmico.

Figura 27

Curva TTT de un acero AISI 4140, donde se muestran curvas típicas de enfriamiento y la región de temperaturas considerada para determinar la velocidad de enfriamiento de un ciclo térmico de soldadura.



*Nota***:** Fosca (2005)

La importancia de calcular la tasa de enfriamiento en función de los parámetros de soldadura reside en identificar si dicho enfriamiento provocará microestructuras quebradizas,

como las producidas por la transformación a martensita. Para que la austenita se convierta en martensita, es fundamental enfriar el acero sin atravesar la "nariz" de la curva TTT o curva en "S", que se relaciona con la velocidad crítica de enfriamiento (VCE).

Por lo tanto, el enfriamiento veloz del acero debe ejecutarse en un intervalo de temperaturas cercanas a la "nariz" de la curva (800ºC-500ºC). Así, la tasa de enfriamiento que se emplea para definir el ciclo de enfriamiento durante la soldadura se encuentra en este intervalo. La martensita es uno de los componentes sumamente quebradizos que puede surgir en una unión soldada. Sin embargo, también hay otros microcomponentes o sus combinaciones que pueden causar fragilidad en la soldadura, y por ende, se deben evitar.

Todos estos microcomponentes, además de provocar fragilidad, se generan a partir de enfriamientos rápidos desde las temperaturas de austenización. Por esta causa, los aceros al carbono y de baja aleación, en términos generales, deben ser soldados siguiendo un método que prevenga altas velocidades de enfriamiento tras la soldadura. Las condiciones requeridas para conseguirlo dependerán del tipo de acero, el grosor de la chapa, el proceso de soldadura y el calor de aporte utilizado.

2.10.2 Ecuación de la Velocidad de Enfriamiento para Chapas Gruesas y Delgadas

Los análisis y comparaciones de las tasas de enfriamiento demandan una meticulosa descripción de las condiciones en las que ocurren. Limitarse a mencionar "tasa de enfriamiento" de una unión soldada no resulta suficiente, puesto que dicha tasa fluctúa, al igual que el gradiente térmico, dependiendo del lugar y el tiempo. El enfoque más eficaz consiste en calcular la tasa de enfriamiento a lo largo de la soldadura en el instante en que el metal alcanza una temperatura específica de interés, Tc. A temperaturas inferiores a la de fusión, la tasa de enfriamiento en la soldadura y en la inmediata zona afectada térmicamente es considerablemente independiente de la ubicación.

En los aceros de carbono y aquellas aleaciones de baja composición, la temperatura de interés se encuentra cerca de la "nariz" perlítica del gráfico de tiempo-temperatura-transformación (diagrama TTT). La temperatura exacta no es fundamental, pero debe permanecer constante en todos los cálculos y comparaciones. Un valor de Tc = 550 °C resulta adecuado para la mayoría de los aceros.

El uso más relevante de manera práctica de la fórmula de la tasa de enfriamiento es en el cálculo de las necesidades de precalentamiento. Por ejemplo, cuando las chapas son bastante gruesas y se requieren múltiples pasadas, más de seis para finalizar la unión, la tasa de enfriamiento, R, se determina mediante la ecuación 6.

$$R = \frac{2\pi K(Tc - To)^2}{Hnet} \; Ec.6$$

Donde:

- R = Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura (C/seg) en el momento justo en que el punto se está enfriando a la temperatura de interés Tc.
- K = Conductividad térmica del metal (J/mm, x seg, x ºC)
- Hnet = Entrada neta de calor
- Tc = Temperatura de la soldadura o alta temperatura
- To = Temperatura de ambiente

Si las chapas son relativamente delgadas, requiriendo menos de cuatro pasadas, la fórmula es la mostrada en la ecuación 7.

$$R = 2\pi K\rho C \left[\frac{t}{Hnet}\right]^2 .(Tc - To)^3 \; Ec.7$$

El estudio y la evaluación de las velocidades de enfriamiento requieren una detallada explicación de las circunstancias en las que se producen. Simplemente mencionar "velocidad

de enfriamiento" de una soldadura no es suficiente, ya que esta velocidad varía, al igual que el gradiente de temperatura, dependiendo del momento y la ubicación. La estrategia más efectiva es calcular la velocidad de enfriamiento durante la soldadura en el momento en que el metal alcanza una temperatura específica que es relevante, Tc. Cuando las temperaturas son menores que el punto de fusión, la velocidad de enfriamiento en la soldadura y en la zona afectada térmicamente adyacente no depende significativamente del lugar.

En el caso de los aceros de carbono y aleaciones con baja composición, la temperatura que se considera relevante se sitúa cerca de la "nariz" perlítica en el gráfico de tiempo-temperatura-transformación (diagrama TTT). La temperatura precisa no es crítica, pero debe mantenerse constante en todos los análisis y comparaciones. Un valor de Tc = 550 °C es adecuado para la mayoría de los aceros.

La aplicación más significativa de la fórmula de la velocidad de enfriamiento en la práctica es para calcular las exigencias de precalentamiento. Por ejemplo, cuando las placas son bastante gruesas y se requieren múltiples pasadas, más de seis para completar la soldadura, la velocidad de enfriamiento, R, se calcula usando la ecuación 6.

$$r = t\sqrt{\frac{\rho C(Tc - To)}{Hnet}} \quad \text{Ec. } 8$$

La fórmula para placas gruesas se utiliza cuando el valor de r supera 0,9, mientras que la fórmula para placas delgadas se emplea si r es inferior a 0,6. En el caso en que r esté entre 0,6 y 0,9, la fórmula para placas gruesas genera una tasa de enfriamiento excesivamente alta, y la fórmula para placas delgadas produce una tasa que resulta ser muy baja. No obstante, si se realiza una separación arbitraria a un valor de r igual a 0,75, considerando los valores más altos como placas gruesas y los inferiores como placas delgadas, el margen de error máximo

rara vez excede el 15% en los cálculos de la tasa de enfriamiento, siendo el error incluso menor al utilizar las fórmulas para determinar las necesidades de precalentamiento.

2.10.3 Absorción de Gas por el Metal Fundido

"El área de fusión está rodeada de gases atmosféricos que son dañinos para lograr una unión soldada de buena calidad. Entre estos gases se encuentran: oxígeno, hidrógeno y nitrógeno" (Chevenard y Azcue, 1965).

Debido a las altas temperaturas que se generan en los procesos de soldadura, la captación de estos gases por el material del cordón se incrementa significativamente, lo que provoca cambios químicos relevantes y, por ende, una reducción en las propiedades mecánicas de la unión soldada resultante.
Seguidamente, se llevará a cabo un análisis sobre cómo la absorción de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno afecta la zona de fusión en los aceros.

Absorción de oxígeno

Se ha establecido que la cantidad de oxígeno en el área fundida se relaciona principalmente con las reacciones de reducción de los óxidos de hierro, influenciadas por elementos como el carbono, manganeso y silicio. No obstante, en los métodos de soldadura hay otros aspectos que también afectan la absorción de oxígeno en la zona fundida, y estos incluyen: el tipo de proceso de soldadura, las características del material de aporte, el tipo y grosor del recubrimiento y la naturaleza de los gases que envuelven la región fundida (Taipe, 2013).

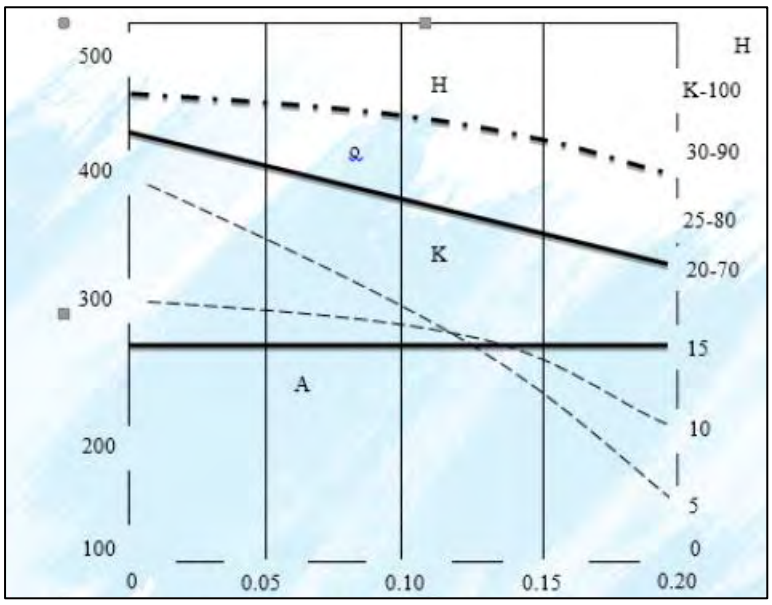
En la soldadura realizada con llama oxiacetilénica, el máximo de oxígeno que se incorpora en la junta es de 0,05 %, cifra considerada baja; esto sucede porque la reducción se realiza casi por completo gracias a los gases de la llama reductora y en muy pequeña medida por el manganeso y el silicio.

Por otro lado, en la soldadura por arco eléctrico, la cantidad de oxígeno presente en el área fundida es mayor, pudiendo alcanzar hasta un 0,3 %, como óxido de hierro (FeO). Sin embargo, al utilizar recubrimientos que liberan elementos reductores durante la fusión, la concentración de oxígeno en esta área puede reducirse hasta un 0,07 %.

La Figura 29 muestra cómo el oxígeno afecta las propiedades mecánicas, tales como la resistencia (s), elasticidad (S1), dureza (H), alargamiento (A) y viscosidad de impacto (K1). Al comparar los resultados de la soldadura con llama oxiacetilénica, donde se reporta una fijación máxima de oxígeno de 0,05 %, con los procesos de soldadura con arco, que pueden superar el 0,2 % de oxígeno, se observa que todas las propiedades mecánicas se ven considerablemente afectadas en estos últimos, salvo en el caso del alargamiento (A), que no presenta influencia por el oxígeno en la junta.

Figura 28

Influencia del oxígeno en las propiedades mecánicas de un acero de bajo contenido de carbono



*Nota***:** Granjon, H. (1993)

Los materiales de soldadura necesitan bastante manganeso y silicio. Esto ayuda a quitar el oxígeno. Así, el oxígeno no se quita usando carbono. Quitar el oxígeno con carbono

baja la fuerza del metal. También puede hacer burbujas en la soldadura. Esto se sabe desde 1968.

Los recubrimientos ácidos quitan oxígeno. Los óxidos ácidos reaccionan con óxidos de hierro básicos. Esto forma silicatos y titanatos de óxido de hierro. Estos van a la escoria. En recubrimientos básicos, se quita oxígeno con aleaciones de silicio y titanio. Estas se ponen en el recubrimiento. El recubrimiento suelta gases que quitan oxígeno. Los recubrimientos gruesos evitan que el oxígeno del aire llegue al metal fundido.

Absorción de Hidrógeno

El hidrógeno que entra en el metal fundido es malo. Daña las uniones soldadas. Baja su fuerza. Solo se permite 6,5 cm3 de hidrógeno por cada 100 g de metal. Así la unión soldada queda bien hecha. La tabla 6 muestra cuánto hidrógeno hay. Se da en cm3 por cada 100 g de metal. Esto es para diferentes materiales y electrodos.

Tabla 6

Concentración de hidrogeno para distintos materiales y electrodos.

Muestra	C	Mn	Si	O_2	N_2	H_2 (cm^3/100g)
Hierro dulce ordinario	0.03	0.12	0.01			1-1.2
Hierro dulce enriquecido en H_2 en estado fundido.	0.03	0.12	0.01			2-5
Acero fundido laminado.	0.2	0.48	0.3		0.006	1-1.25
FUSION POR ARCO						
Electrodo desnudo	0.04	0.07	0.02	0.22	0.12	1.35
Electrodo con revestimiento Fino.	0.04	0.27	0.03	0.17	0.11	2.25
Electrodo con revestimiento grueso tipo A	0.1	0.48	0.05	0.09	0.016	6-8
Electrodo con revestimiento grueso tipo B	0.08	0.56	0.06	0.08	0.015	8-10
Electrodo con revestimiento grueso tipo C	0.11	0.65	0.56	0.09	0.015	22-25[1]
Electrodo con revestimiento grueso tipo D	0.13	1.12	0.15	0.06	0.022	31-32[1]
Electrodo con revestimiento grueso tipo E	0.12	0.6	0.22	0.09	0.008	17.9[1]

*Nota***:** Granjon, H. (1993)

2.11 Ensayos Destructivos y no Destructivos

2.11.1 Ensayos no Destructivos

a) Inspección visual

Son métodos que no dañan. Sirven para saber si algo está bien. Miden cosas de un objeto. No cambian las piezas que se prueban. Tampoco cambian su tamaño ni su uso. Se sabe esto por Destructivos (A. d. 2009).

Revisar la calidad de las uniones soldadas se hace con pruebas no dañinas. Estas pruebas son para metales como acero, titanio y aluminio. Ayudan a ver si hay fisuras. También ven si hay huecos, si la unión no está completa, si hay cosas extrañas o fallos. Estos problemas pueden hacer que la unión no sea fuerte.

Las formas más comunes de pruebas no dañinas para hallar fallos en soldaduras son:

- Ver con los ojos
- Usar líquidos especiales
- Emplear partículas magnéticas
- Usar rayos X
- Utilizar sonido de alta frecuencia

Se hace en todas las partes de la producción. Esto cubre todo el proceso. Empieza cuando recibimos las cosas. Su meta es asegurar que las uniones soldadas sean buenas. Mirar para ver es una de las pruebas más usadas. Estas pruebas no dañan nada. Soldar los perfiles de metal huecos necesita mirar para ver si está bien. (Destructivos, 2009). Lo que se acepta

en la inspección visual está en la norma AWS D1.1. Esto se explica en este texto. Los puntos para aprobar la inspección visual están en la tabla 7.

Tabla 7

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: AWS D1.1: 2015

b) Inspección por líquidos penetrantes

Este trabajo sirve para hallar fallas en la superficie de los objetos revisados. Es uno de los ensayos no destructivos más usados para encontrar imperfecciones superficiales en materiales sólidos que no tienen poros. Es, casi seguro, el ensayo no destructivo más común hoy día. Se puede usar en cualquier material, ya sea magnético o no magnético. Los líquidos

penetrantes dan a la industria muchas opciones de sensibilidad y métodos. Esto los hace servir para distintos tamaños y formas. Son muy útiles para revisiones en sitios lejanos por su flexibilidad. También sirven para producir piezas pequeñas en poco tiempo.

La diferencia clave entre los dos tipos es:

- Los líquidos penetrantes fluorescentes tienen un tinte que brilla con luz negra o ultravioleta.
- Los líquidos penetrantes no fluorescentes tienen un tinte que resalta con luz blanca.

Ambos líquidos se aplican igual. El proceso tiene estas etapas:

- Lavar la pieza al principio.
- Poner el líquido penetrante.
- Esperar el tiempo para que penetre.
- Quitar el líquido que sobra.
- Poner el líquido revelador.
- Revisar la pieza.
- Lavar la pieza al final.

a) Preparación de la pieza

Las piezas deben estar limpias. Deben quitarse grasas, óxidos, aceites, escorias y pinturas. Para esto se usan varios limpiadores y disolventes. Después de limpiar, la pieza debe estar completamente seca.

b) Uso del líquido penetrante

El líquido se aplica de tres formas. Se puede sumergir la pieza en un baño. También se puede rociar sobre la pieza. O se puede usar una brocha para extenderlo. Usualmente se usa un color rojo. El mejor líquido penetrante tiene estas cualidades:

- No se evapora rápido.

- Es fácil de aplicar en la superficie.

- Entra en grietas pequeñas y estrechas.

- Permanece en aberturas grandes.

- Mantiene su color o brilla con luz especial.

- Es difícil de sacar de las grietas.

- Se extiende en capas finas.

- Lo absorben bien las grietas.

- No es tóxico, no tiene color, no daña el metal. No se inflama fácil. Es estable al guardarlo. Y su precio es justo.

c) Medir el tiempo de penetración

Se debe dar tiempo para que el líquido penetre. Debe entrar en las fallas de la parte. Es importante vigilar el tiempo. El tiempo está en los paquetes del producto.

d) Quitar el líquido extra

Se puede limpiar la parte de varias maneras. Se puede meter en un líquido. Se puede rociar con un líquido. Se puede duchar la parte con un líquido de limpieza.

e) Poner el líquido revelador

El líquido revelador suele ser blanco. Se pone por inmersión. Se rocía o se pulveriza. Se debe hacer con cuidado. Estos líquidos se evaporan rápido. Las partes con líquido penetrante se verán. Serán fáciles de ver.

f) Mirar la parte

Las fallas se ven claras. Se ven exactas en la parte. Se mira la parte. Si el líquido es fluorescente, se usa una luz especial. Si el líquido es normal, se usa luz normal. Aparecerán puntos rojos. Estos puntos marcan las fallas.

g) Limpiar la parte al final

"Hay que quitar todo rastro de líquidos. Los líquidos penetrantes o reveladores. Se

limpian con disolventes o detergentes." (Destructivos, A. d. 2009).

2.11.2 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 micro penetración 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 (Radeva, 2014).

a) Ensayo de doblado

Este escrito busca ver la flexibilidad y el buen estado del material de soldadura. Se hace doblando una muestra en forma de “U”. Luego, se mira la parte doblada. Este examen sirve para aprobar el proceso y la destreza de los soldadores y quienes manejan máquinas de soldar.

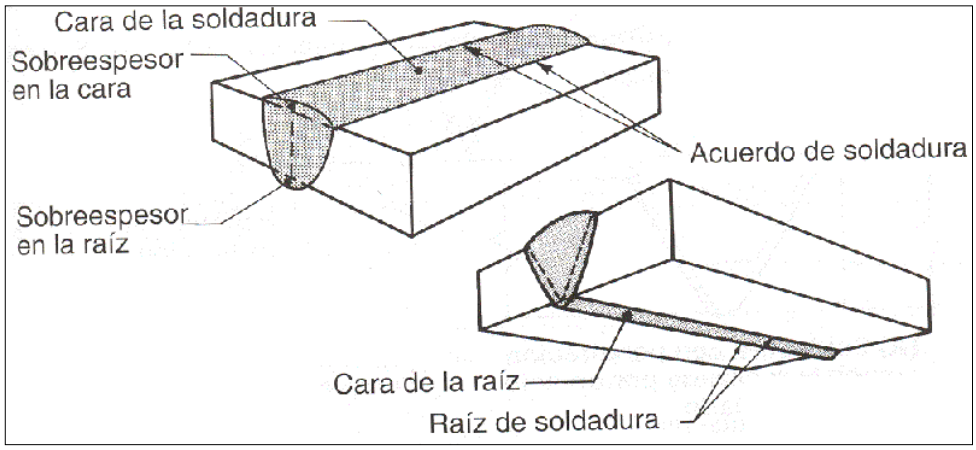
Los exámenes de doblez pueden ser:

- Doblez la muestra de lado.
- Doblez la muestra por la raíz.
- Doblez la muestra por la cara.
- Doblez la muestra a lo largo por la cara.
- Doblez la muestra a lo largo por la raíz (CESOL, 2013).

En la imagen 30, se ve el esquema del examen de doblez y el doblez de cara y raíz.

Figura 29

Depósito de soldadura en cara y raíz



Nota: Walteros Larrotta (2010)

Este ensayo es de tipo cualitativo. Buscamos que las muestras no tengan grietas. Para que sea aceptado, se deben cumplir estas reglas: Las partes rotas en la superficie, en cualquier sentido, no deben ser mayores a 3 mm. La suma de todas las partes rotas entre 1 mm y 3 mm no debe ser más de 10 mm en total. Las reglas para aceptar este ensayo, que concuerdan con el código AWS D1.1, están en la tabla 8.

Tabla 8

Criterio de aceptación para el ensayo de cara y raíz según el código AWS D1.1

N°	Criterios
1	El tamaño de las discontinuidades superficies no debe de exceder 3 mm en cualquier dirección.
2	La suma de todas las discontinuidades que se encuentre en el rango de 1 mm a 3 mm no debe exceder a 10 mm.
3	La grieta de borde tendrá una dimensión máxima de 6 mm, excepto cuando se derive de una discontinuidad de fusión o una evidente inclusión de escoria donde tendrá un valor de 3 mm.

4	Las probetas con grietas de borde que excedan 6 mm sin evidencia de inclusiones de escoria u otra discontinuidad de fusión deben descartarse y de debe ensayar una probeta de reemplazo de la soldadura original.

2.12 Las discontinuidades en soldadura

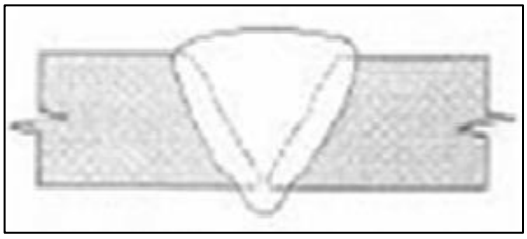
En soldadura, las discontinuidades se clasifican en: superficiales e internas

Discontinuidades superficiales

Exceso de penetración: Un movimiento empuja el electrodo hacia las áreas con biseles. El material fluye adentro. Puede quedar escoria atrapada o no. “Este problema aparece en soldaduras de gaseoductos. Puede causar desgaste por erosión” (Echevarria, 2002). La radiografía muestra un centro más claro. Esto se ve a lo largo de la soldadura o en puntos redondos. Dentro puede haber una mancha negra y malformada, figura 31.

Figura 30

Exceso de penetración



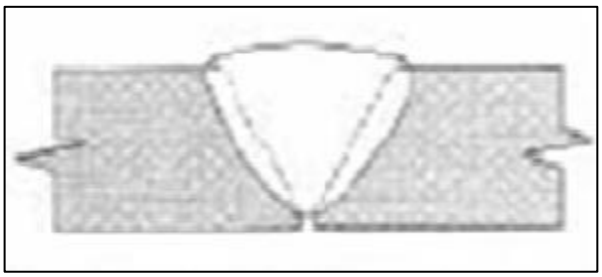
Falta de penetración:

Las uniones en U o en V muestran su parte trasera. Por eso, este error puede verse como algo poco importante. Con frecuencia, la raíz de la soldadura no se llena bien con metal. Queda un hueco. Esto se verá en la radiografía. Parecerá una línea negra. Será oscura, marcada y gruesa. Puede ser seguida o tener cortes. Reemplaza la primera pasada del cordón. Esto pasa si el espacio de la raíz es muy pequeño. También si el electrodo es muy grueso. O si la corriente es poca. O si se avanza muy rápido. O si no se penetra bien en el corte. Este problema no suele

ser aceptado. Hay que quitar el cordón anterior. Hay que soldar de nuevo. Figura 32.

Figura 31

Falta de penetración



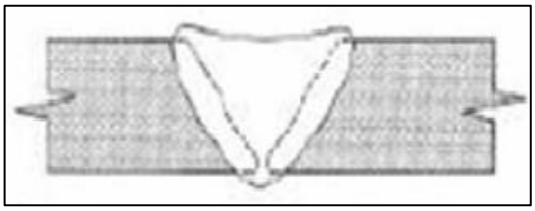
Concavidades

Estas discontinuidades se presentan de dos tipos:

- **Concavidad externa o falta de relleno**: "muestra una reducción en el refuerzo externo debido a un escaso suministro de material de aporte para rellenar el cordón" (Echevarria, 2002). La figura 33 revela una densidad de la soldadura que es más oscura que la de las piezas a soldar, abarcando todo el ancho de la imagen.

Figura 32

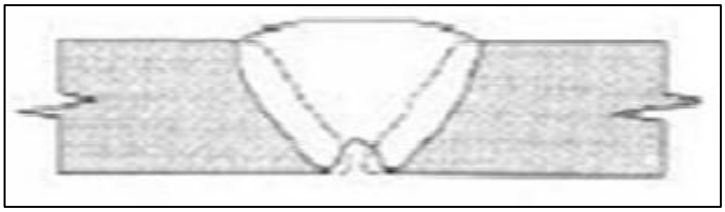
Concavidad externa



- **Concavidad interna:** "Refuerzo interno de la soldadura en su cordón de primera pasada que es insuficiente y que, al enfriarse, pierde espesor hasta ser inferior al del material base" (Echevarría, 2002).

Figura 33

Concavidad interna



Socavaduras o mordeduras de borde: La socavadura, según Echevarria (2002), “es una muesca que se encuentra en el metal base, junto a la raíz de una soldadura o a la sobre monta, y que no ha sido ocupada por el metal de soldadura”. Ilustración 35.

Motivos y rectificación

- Calor en exceso: Ajuste el amperaje de su máquina.
- Electrodo inapropiado - Sustituya el electrodo.
- Manipulación inadecuada - Mejore la manipulación manual
- Arco demasiado intenso: ajuste el arco.
- Velocidad insuficiente: Mejore la velocidad y ajuste el movimiento del electrodo.

Figura 34

Socavaduras o mordeduras de borde



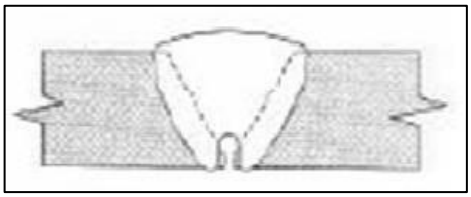
Quemado

Es un área de la raíz pasada en la que una penetración excesiva ha provocado que el aporte de soldadura se introduzca en ella, soplándose. “Se origina a partir de elementos que generan un calor excesivo en una zona específica, por ejemplo: corriente demasiado alta,

velocidad del electrodo muy baja o manejo inadecuado del electrodo. Los biseles han sido destruidos por completo" (Echevarria, 2002). La figura 36 muestra esta discontinuidad.

Figura 35

Quemado

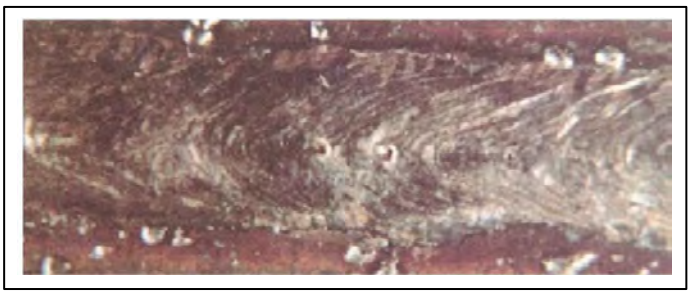


Salpicaduras

Son defectos que consisten en esferuelas de metal derretido que se colocan al azar sobre el cordón y sus alrededores. La humedad en el recubrimiento del electrodo puede provocarlas. Esta discontinuidad se puede ver en la figura 37.

Figura 36

Salpicaduras de metal.

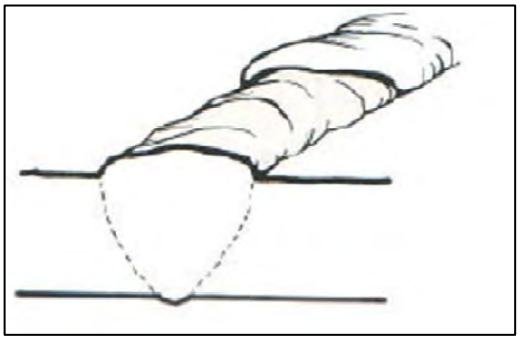


Falta de continuidad del cordón

Surge cuando el soldador corta el cordón y no logra una buena continuidad en la reanudación del trabajo. Su gravedad es muy variable, porque en los casos más graves pueden ser consideradas como auténticas faltas de fusión transversales y en otros casos son simplemente surcos que siguen el eje del cordón (Echevarría, 2002). Su apariencia radiográfica es la de una línea oscura o oblicua, que es relativamente nítida (figura 38).

Figura 37

Falta de continuidad del cordón.



Discontinuidades Internas

Pueden clasificarse en:

a) Fisuras longitudinales

Los cordones pueden presentar problemas en la parte central (usualmente debido a movimientos que ocurren durante o después de soldar) o en la zona interfase entre el material base y el de aporte (por enfriamiento repentino o ausencia de un adecuado precalentamiento en espesores grandes) (Echevarría, 2002). La figura 39 muestra esta discontinuidad.

Figura 38

Fisuras longitudinales

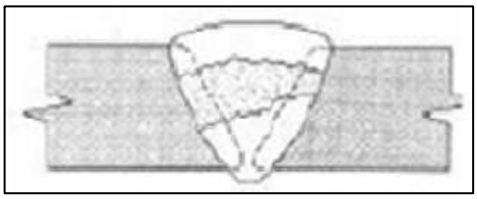


b) Fisuras transversales

"Realizadas normalmente en aceros duros, a partir de una combinación de elementos que forman fisuras al enfriarse a temperatura normal y que pueden o no extenderse al metal base" (Echevarría, 2002).

Figura 39

Fisuras transversales

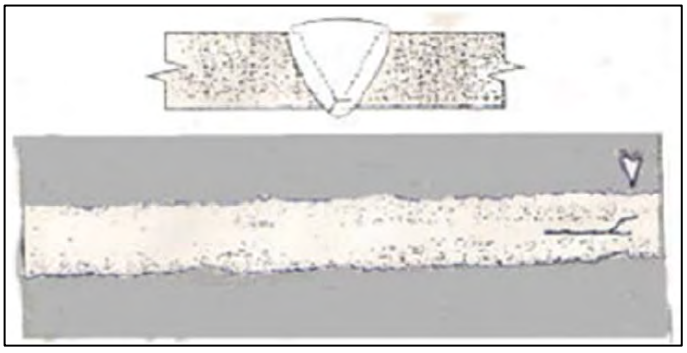


c) Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)

Según Echevarría (2002), cuando se inicia la soldadura por cambio de electrodo, puede haber grietas en forma de estrella debido al enfriamiento y recalentamiento repentino del material (son grietas en caliente).

Figura 40

Fisura de interrupción



d) Fisuras alrededor del cordón (ZAC)

Fisuras por frío: "Se origina debido a la ausencia de precalentamiento (indispensable para algunos tipos de acero), en aceros duros (con una estructura martensítica en ZAC como consecuencia del ciclo térmico del proceso de soldadura) o con un grosor elevado" (Echevarria, 2002).

Figura 41

Fisuras en la zona afectada por el calor.

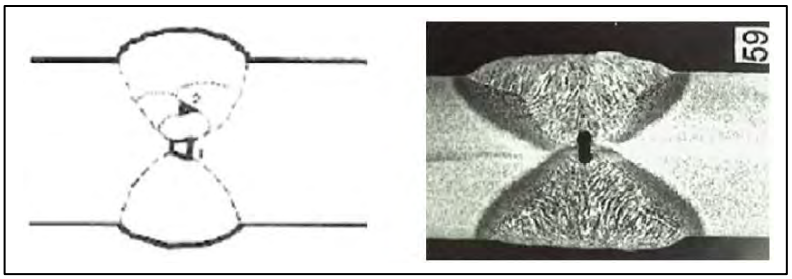


e) Falta de penetración

Sucede en la zona de raíz cuando el metal fundido no ha penetrado. Si la unión es en K o X, la raíz permanece dentro del cordón, y la ausencia de metal de aporte en esta región es estrictamente interna (Echevarria, 2002).

Figura 42

Falta de penetración

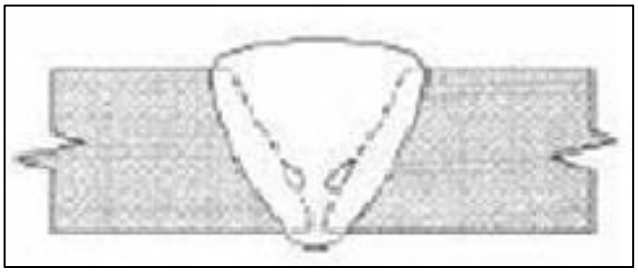


f) Falta de fusión

Normalmente, es causada por la ausencia de temperatura adecuada para fundir el metal base o el cordón anterior que ya está sólido (Echevarria, 2002).

Figura 43

Falta de fusión



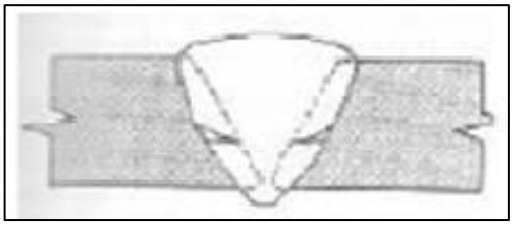
g) Falta de fusión entre pasadas

Sucede en las interfases de la soldadura, donde las capas vecinas del metal o el metal base y el metal de soldadura no se unen correctamente, típicamente a causa de una capa muy delgada de óxido que aparece en las superficies. Esta capa de óxido puede ser resultado de no calentar el metal base o de depositar una cantidad adecuada del metal de soldadura antes, que evita que cualquier capa de escoria, óxido, impurezas y demás alcance la superficie.

Además, puede ser por una corriente insuficiente o porque el arco eléctrico está mal posicionado dentro de los biseles; cuando ocurre lo primero, no se funde uno (Echevarría, 2002).

Figura 44

Falta de fusión



Discontinuidades como inclusiones

a) Inclusiones de gas

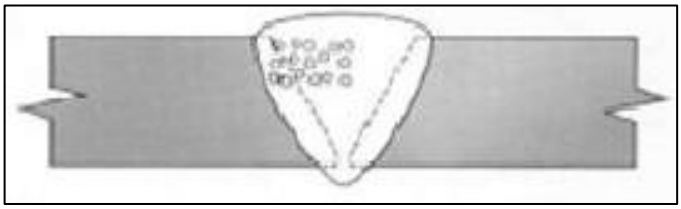
Por múltiples motivos, en el metal de soldadura fundido se generan gases que, si no tienen suficiente tiempo para escapar antes de que la soldadura se solidifique, pueden quedar atrapados. El gas que queda atrapado suele tener la forma de porosidades esféricas, que son agujeros redondos, o de porosidad tubular o vermicular, que tienen una forma más alargada.

b) Porosidad agrupada (nido de poros)

"Causada comúnmente por un agente oxidante o por una humedad excesiva en el revestimiento. También pueden hallarse capas de óxido sobre los biseles, las cuales liberan gas al fundirse" (Echevarria, 2002). Como se muestra en la figura 46, el tamaño de estos poros es uniforme en toda el área.

Figura 45

Porosidad agrupada

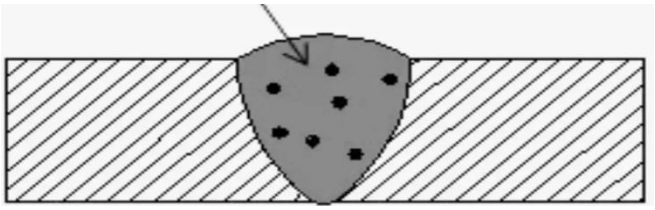


c) Porosidad alineada

"Por lo general, aparece en la pasada base del cordón soldado debido a la dificultad de penetrar con el electrodo, a una mala regulación eléctrica en relación con el fundente empleado por las máquinas automáticas y a la acumulación de ciertos elementos del mismo" (Echevarria, 2002).

Figura 46

Porosidad alineada

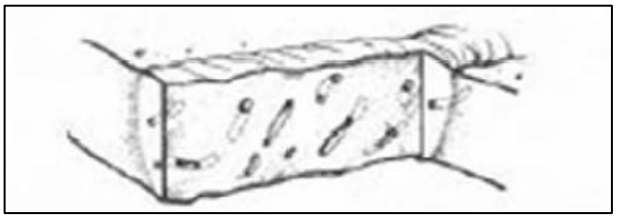


d) Inclusiones no metálicas

Proceden de agentes ajenos, como el material de aporte (Echevarria, 2002). La figura 48 muestra esta discontinuidad.

Figura 47

Inclusiones no metálicas.



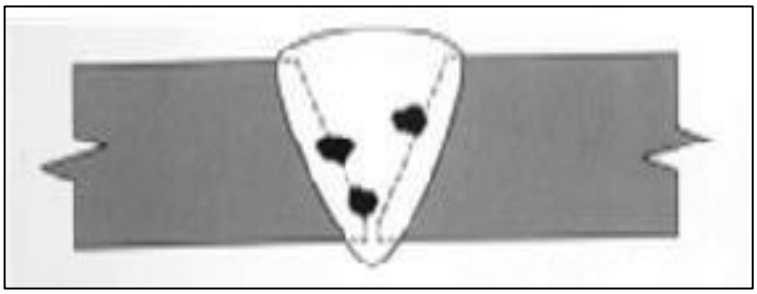
e) Inclusiones de escoria aisladas

La mayor parte de las soldaduras tienen escorias que quedaron atrapadas en el metal

depositado a lo largo del proceso de solidificación (Echevarria, 2002). Principalmente son depósitos de silicatos, óxidos metálicos y carbón, como se muestra en la figura 49.

Figura 48

Inclusión de escoria aisladas



Las escorias pueden originarse del revestimiento del electrodo o de la sustancia fundente utilizada. La escoria incluida a menudo está relacionada con una fusión deficiente, un talón de raíz inadecuadamente grande, soldadura en V muy angosta, la falta de penetración y poca habilidad del soldador.

f) Escorias alineadas

Son el resultado de movimientos incorrectos del electrodo realizados por el soldador. Se alinean sobre el lado del cordón soldado. En la soldadura automática, el fundente tiende a quedar atrapado debido a una regulación inadecuada de la máquina o a una limpieza insuficiente, aunque en este caso estará situado en el medio del cordón (Echevarria, 2002). Este tipo de defecto es sumamente agresivo, como se observa en la figura 50.

Figura 49

Escorias alineadas

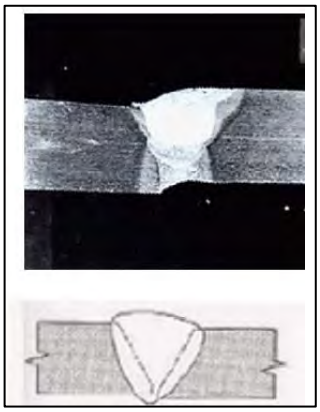


g) Desalineado (high low)

Desalineamiento de las partes a ser soldadas, figura 51.

Figura 50

Desalineado



2.13 Calificación del Procedimiento

Para asegurar que la soldadura tenga las propiedades adecuadas, se elaborará y calificará un documento detallado del procedimiento antes de comenzar una soldadura de producción. La calidad de la soldadura tiene que ser comprobada por medio de pruebas destructivas y no destructivas.

Determinación del procedimiento de soldadura (WPS)

WPS, que significa Welding Procedure Specification en inglés, es un documento técnico que incluye los parámetros y valores de las variables de soldadura requeridos para

llevar a cabo soldaduras de producción en un proceso específico o combinación de estos. El propósito es cumplir con las exigencias de una norma aplicable y garantizar la repetitividad del procedimiento de soldadura realizado por personal calificado.

Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)

Documento que avala y respalda el WPS. El PQR incluye tanto las variables reales de soldadura empleadas en la prueba como los resultados obtenidos durante el ensayo de soldadura con el fin de calificar las especificaciones del procedimiento. El PQR es un registro que documenta los resultados de las pruebas y soldaduras de las probetas.

Calificación de Soldadores (WPQ)

Documento que apoya y respalda el WPS. Para calificar las especificaciones del procedimiento, el PQR incluye las variables reales de soldadura utilizadas en la prueba y los resultados que se obtuvieron durante el ensayo de soldadura.

CAPITULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis General y Especificas

3.1.1 Hipótesis general

La velocidad de enfriamiento influye en la dureza de la ZAC y en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW

3.1.2 Hipótesis Específicas

Hipótesis específica 1

La intensidad de corriente influye en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW.

Hipótesis específica 2

La velocidad de soldeo influye en avance influye en la dureza de la ZAC en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW

Hipótesis específica 3

La temperatura inicial de la chapa influye en la velocidad de enfriamiento en la dureza de la ZAC, en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso SMAW

3.1.3 Variables Independientes y Dependientes

Variables Independientes

- Intensidad de corriente
- Velocidad de soldeo
- Temperatura inicial de la chapa

Variable Dependiente

Dureza en la ZAC en el acero ASTM A36.

Variables Interviniente o Externa

- Humedad ambiental y Temperatura ambiental.

3.1.4 Operacionalización de Variables

Variable	Definición teórica	Definición práctica	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Variable Independiente Velocidad de enfriamiento	La velocidad de enfriamiento corresponde a la rapidez con la que el material pierde calor después del proceso de soldadura. Esta variable influye directamente sobre las transformaciones microestructurales y propiedades mecánicas del acero.	Se evaluará mediante diferentes condiciones de enfriamiento aplicadas a las probetas soldadas de acero ASTM A36 después del proceso SMAW.	• Condición térmica • Tiempo de enfriamiento • Medio de enfriamiento	• Tiempo de descenso de temperatura • Tipo de enfriamiento • Variación térmica	• Cronómetro • Ficha de observación • Termómetro infrarrojo

Variable Dependiente: Dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC)	La dureza es la resistencia que presenta un material frente a la penetración o deformación superficial. En la ZAC esta propiedad depende de los cambios microestructurales ocasionados por el ciclo térmico de soldadura.	La dureza será determinada mediante ensayos realizados en la Zona Afectada por el Calor de las probetas soldadas, comparando los valores obtenidos bajo diferentes velocidades de enfriamiento.	• Propiedades mecánicas • Comportamiento metalúrgico • Soldabilidad	• Valores de dureza • Presencia de zonas endurecidas • Cambios microestructurales • Calidad de la unión soldada	• Durómetro • Microscopio metalográfico • Ficha de registro de datos

*Nota***:** Elaboración propia

CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Ámbito de estudio: localización política y geográfica

La Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, específicamente el Centro Fabril de Ingeniería Metalúrgica, se encuentra ubicado dentro de la Ciudad Universitaria de Perayoc, en el distrito, provincia y departamento del Cusco.

Localización Política

- Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
- Facultad: Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica
- Escuela Profesional: Ingeniería Metalúrgica
- Lugar: Centro Fabril de Ingeniería Metalúrgica
- Distrito: Cusco
- Provincia: Cusco
- Departamento: Cusco
- País: Perú

Localización Geográfica

El Centro Fabril de Ingeniería Metalúrgica se localiza en la Ciudad Universitaria de Perayoc, ubicada al noroeste del centro histórico de la ciudad del Cusco, aproximadamente entre las coordenadas geográficas:

- Latitud: 13°31' Sur
- Longitud: 71°58' Oeste
- Altitud aproximada: 3 400 m s.n.m.

Asimismo, el área presenta un clima templado frío característico de la sierra sur del Perú, con temperaturas promedio entre 8 °C y 20 °C durante el año.

4.2 Enfoque, Tipo, alcance y diseño de Investigación

4.2.1 Enfoque, Tipo y diseño de Investigación

El presente estudio tiene un enfoque cuantitativo ya que se basa en la medición y análisis de datos numéricos relacionados con el efecto de la dureza de la zona afectada por el calor (HAZ) y la velocidad de enfriamiento durante la soldadura SMAW en acero ASTM A36. Este enfoque permite obtener información objetiva y verificable a través de pruebas experimentales, que luego facilita el análisis estadístico y la interpretación de los resultados. Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), el enfoque cuantitativo utiliza la recopilación de datos para probar hipótesis y determinar relaciones entre variables mediante procedimientos estadísticos y mediciones controladas. En este estudio trabajaremos con valores de dureza obtenidos experimentalmente bajo diferentes condiciones de enfriamiento, que nos permiten evaluar el comportamiento mecánico del acero ASTM A36. Asimismo, la investigación corresponde al tipo tecnológica o aplicada, ya que tiene como finalidad crear conocimiento encaminado a resolver un problema técnico relacionado con la soldabilidad del acero estructural. En este caso, el objetivo del estudio es proporcionar criterios técnicos que permitan controlar adecuadamente la velocidad de enfriamiento y mejorar la calidad de las uniones soldadas. Por otro lado, el estudio presenta un diseño experimental ya que el investigador manipulará deliberadamente la variable independiente correspondiente a la velocidad de enfriamiento para observar su efecto sobre la variable dependiente relacionada con la dureza de la zona afectada por el calor.

4.2.2 Nivel o Alcance de la Investigación

El nivel de este estudio es explicativo ya que tiene como objetivo determinar la relación causal entre la velocidad de enfriamiento y la dureza de la zona afectada por el calor en el proceso de soldadura SMAW del acero ASTM A36. El propósito del estudio no es sólo describir el comportamiento de las variables, sino también explicar cómo las fluctuaciones

térmicas afectan directamente las propiedades mecánicas y metalúrgicas del material de soldadura. Esta publicación analizará cómo diferentes velocidades de enfriamiento producen cambios microestructurales que afectan la dureza y soldabilidad del acero estructural. Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) afirman que el propósito de la investigación explicativa es identificar las causas de los fenómenos y explicar por qué ocurren ciertos comportamientos entre las variables. De manera similar, Bernal (2016) sostiene que la investigación explicativa busca establecer relaciones causales a través de pruebas de hipótesis y análisis experimentales. En este estudio, el alcance de la explicación permitirá una comprensión técnica del comportamiento metalúrgico del acero ASTM A36 durante el proceso de soldadura, contribuyendo al logro de criterios que contribuyan a la mejora de la calidad de las uniones soldadas y al control de los defectos relacionados con el enfriamiento.

4.3 Población y Muestra

4.3.1 Población de estudio

La población de este estudio está formada por aceros al carbono utilizados en aplicaciones estructurales e industriales. Este grupo de materiales incluye varios tipos de aceros con diferentes porcentajes de carbono, los cuales son muy utilizados en la producción de estructuras metálicas, componentes mecánicos, contenedores, tuberías y elementos soldados en general. Los aceros al carbono se caracterizan por buenas propiedades mecánicas, fácil conformado y suficiente soldabilidad, por lo que se utilizan a menudo en procesos de fabricación mediante soldadura. Según Callister y Rethwisch (2020), este tipo de acero es uno de los materiales metálicos más utilizados en ingeniería debido a su resistencia mecánica, disponibilidad comercial y costo relativamente bajo. En este grupo, el acero ASTM A36 es uno de los aceros estructurales más utilizados en la industria metalmecánica y de la construcción, debido principalmente a su buena respuesta al proceso de soldadura SMAW y a sus favorables propiedades mecánicas para aplicaciones estructurales.

4.3.2 Muestra

La muestra para este estudio consistirá en cinco (5) especímenes de acero ASTM A36 preparados en dimensiones y condiciones controladas para pruebas de soldadura y evaluación de dureza. La elección del acero ASTM A36 se debe a que es uno de los materiales de construcción más utilizados en la producción de estructuras metálicas, puentes, soportes y componentes industriales, además de sus buenas propiedades de soldadura y comportamiento mecánico durante el proceso SMAW. Después del proceso de soldadura, las muestras se someterán a diferentes condiciones de enfriamiento para analizar el efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la dureza de la zona afectada por el calor (HAZ). Posteriormente se realizarán pruebas de dureza y observaciones metalúrgicas, que permitan evaluar el comportamiento del material en las condiciones determinadas por el estudio.

4.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La recopilación de datos en este estudio se llevará a cabo mediante procedimientos experimentales que evalúan el efecto de la velocidad de enfriamiento en la dureza de la zona afectada por el calor (HAZ) de muestras de acero ASTM A36 soldadas mediante el proceso SMAW (soldadura por arco metálico blindado). Se utilizarán técnicas e instrumentos para obtener información objetiva y confiable, directamente relacionada con las variables de la investigación.

4.4.1 Técnicas de Recolección de Datos

A. Técnicas de Observación y Registro

Observación experimental.

B. Técnicas de Evaluación Metalúrgica y Mecánica

Esta técnica permite registrar directamente las condiciones en las que se desarrolla el proceso de soldadura. Durante la fase experimental se seguirán aspectos relacionados con la

preparación de la muestra, parámetros de soldadura utilizados, condiciones de enfriamiento y comportamiento general del material. La observación experimental facilitará la recopilación de la información necesaria para garantizar la uniformidad del proceso. Esto garantiza que la diferencia en los resultados se deba únicamente a la velocidad de enfriamiento utilizada.

Registro documental

Consiste en un registro sistemático de toda la información obtenida durante el desarrollo experimental. Esta técnica registrará los datos obtenidos en cada prueba, permitiendo la adecuada organización y control de los resultados para su posterior análisis estadístico. El desarrollo de este estudio utilizará métodos y herramientas para obtener información confiable sobre el efecto de la velocidad de enfriamiento en la dureza de la zona afectada por el calor (HAZ) en acero ASTM A36 soldado mediante el proceso SMAW. La recolección de datos se realizará principalmente mediante procedimientos experimentales y observaciones técnicas durante el proceso de soldadura y evaluación metalúrgica de las muestras. La información obtenida permite analizar el comportamiento mecánico del material bajo diferentes condiciones de enfriamiento.

Ensayo de dureza

Este método permitirá cuantificar la dureza alcanzada en la zona afectada por el calor del cordón de soldadura y del metal base. Los valores obtenidos ayudan a comparar las diferentes condiciones de enfriamiento evaluadas. Según Callister y Rethwisch 2020, los ensayos de dureza son uno de los métodos más utilizados para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales porque proporcionan datos relacionados con la resistencia a la deformación permanente.

Análisis metalográfico

Se usará esta técnica para estudiar la microestructura creada tras el paso de soldar, enfriar Ver bajo el microscopio ayudará a ver si hay ferrita, perlita o algunos cambios microestructurales por la rapidez del enfriamiento. Los datos conseguidos completarán los hallazgos de dureza y facilitarán aclarar la conducta metalúrgica vista en las probetas.

4.4.2 Instrumentos de Recolección de Datos

A. Instrumentos de Registro

Ficha de registro de datos experimentales, Herramienta creada para reunir y sistematizar los datos hallados en el estudio. En dicha obra se anotarán:

- Código de la probeta.
- Parámetros de soldadura.
- Condición de enfriamiento aplicada.
- Tiempo de enfriamiento.
- Resultados de dureza.
- Observaciones experimentales.

B. Instrumentos y Equipos de Medición

Durómetro

Herramienta usada para medir la dureza en las muestras soldadas. Los datos conseguidos permitirán fijar la influencia que tiene la rapidez del enfriamiento sobre las características mecánicas del acero tipo ASTM A36.

Microscopio metalográfico

El equipo usado observa y analiza características microestructurales presentes en Zona Afectada por Calor y en el cordón de soldadura. Su uso permite relacionar cambios microestructurales con valores de dureza obtenidos.

Cronómetro digital

Herramienta usada para medir y a*Nota*r los tiempos de enfriamiento de las muestras en cada proceso experimental.

Termómetro infrarrojo o pirómetro digital

Herramienta usada para medir calor en superficie de las muestras mientras se enfrían y garantizar condiciones iguales entre ellas dentro del proceso experimental.

C. Equipos de Proceso

Equipo de soldadura SMAW

Compuesto por fuente eléctrica, hilos, pinzas porta electrodo, pinza de tierra y electrodos recubiertos. Dicho aparato posibilitará realizar las uniones soldadas dentro de parámetros controlados.

Equipos de preparación metalográfica

Se incluyen cortadora metalográfica, lijas abrasivas, pulidora y reactivos de ataque químico, usados para preparar las muestras destinadas al análisis microestructural.

De modo general, los métodos y herramientas expuestos facilitarán conseguir datos bastantes y seguros para juzgar el impacto que tiene la rapidez del enfriamiento respecto a la dureza de la Zona Influida Térmicamente en el acero tipo ASTM A36 unido usando el procedimiento SMAW.

4.5 Plan de Análisis de Datos

En primer lugar, se realizará la tabulación de los resultados correspondientes a cada probeta soldada, considerando las diferentes condiciones de enfriamiento aplicadas y los valores de dureza obtenidos en la Zona Afectada por el Calor.

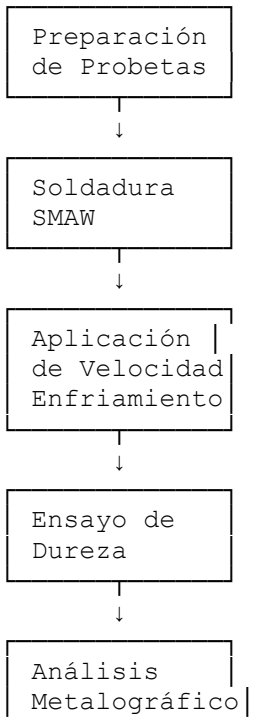
Asimismo, se elaborarán tablas y gráficos comparativos que faciliten la visualización de la relación existente entre la velocidad de enfriamiento y la dureza alcanzada en la ZAC.

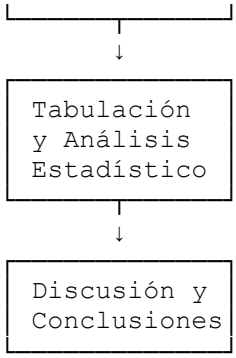
Finalmente, los resultados de dureza serán interpretados conjuntamente con las observaciones metalográficas realizadas en cada muestra, permitiendo establecer una explicación técnica sobre la influencia de la velocidad de enfriamiento en las propiedades mecánicas y microestructurales del acero ASTM A36 soldado mediante SMAW.

La interpretación de los resultados se realizará considerando los fundamentos teóricos de la metalurgia de la soldadura y los antecedentes científicos relacionados con el comportamiento térmico de los aceros al carbono.

Figura 4.1

Diagrama de flujo del análisis de datos





*Nota***.** Elaboración propia (2026).

CAPITULO V

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Maquinaria y Equipos

a) Máquina de soldar

Para la soldadura de las probetas se utilizó una máquina de soldar del taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, sus características son:

- Marca: MILLER
- Modelo: XMT 304 CC.
- Salida nominal de corriente: 300 Amperios
- Gama de Voltaje: 10 – 35 Voltios.
- Gama de Amperaje: 5 - 400
- Máx Voltaje de circuito abierto CD: 90 V.

En la figura 52, se puede observar la fuente de poder usada.

Figura 51

Fuente de poder



b) Equipo de ensayo de doblado guiado en U

Este equipo se encuentra en el taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. En la figura 53 se puede observar el equipo de ensayo de doblez, cuya presión de trabajo es de 20 toneladas.

Figura 52

Equipo de doblez



b) Durómetro portátil

En la figura 54 se observa el durómetro portátil.

Figura 53

Durómetro portatil



Características:

- Botón SNAP para una captura rápida de imágenes.
- Ajuste manual del enfoque de 50x a 1600x.
- 8 LED con ajuste de intensidad de brillo.
- Compatibilidad con sistemas Windows Vista, XP, 7, 8, 10 (32 y 64 bits).

- Resolución de imagen: estándar 1600*1200p, 1280*960p, 640*480p, 480*360.
- Resolución de vídeo: estándar 1600*1200p, 1280*960p, 640*480p, 480*360.
- Rango de ampliación: 20x - 1600x.
- Rango de enfoque: manual de 8 mm a 1000 mm.

b) Microscopio digital portátil

En la figura 55 se observa el microscopio digital.

Figura 54

Microscopio digital portátil



Características:

- Marca: Zhongruiheze
- Modelo: 1600X 2.0 MP.
- Tipo de cabezal: Monocular
- Uso recomendado: Profesional
- Tipo de zoom: Digital.

b) Material utilizado

- Kit de tintes penetrantes (en Spray)

En la figura 56 se observa el kit de tintes penetrantes

Figura 55

Kit de tintes penetrantes



Sus características son:

- Marca: Ambro-Sol
- Origen: Italia
- Presentaciones: 400 ml

Son productos de pulverización que permiten detectar discontinuidades como grietas, poros, etc.

- Revelador detector de color blanco con un volumen de 400 ml.
- Penetrante de color Rojo, también en un volumen de 400 ml
- Limpiador Cleaner, en un volumen de 400 ml

Materiales para la Investigación

Material Base

Para la soldadura se usaron probetas de acero ASTM A36. En la figura 57, se muestra 10 probetas, las que se han soldado en pares. Tienen las siguientes dimensiones: 200 x 200 x 6.15 mm

Figura 56

Probetas de acero ASTM A36



- **Composición química del acero ASTM A36:**

En la tabla 9, se indica la composición química del acero ASTM A36.

Tabla 9

Composición química del acero ASTM A36

Carbono (C)	0,26% máx.
Manganeso (Mn)	No hay requisito
Fósforo (P)	0,04% máx.
Azufre (S)	0,05% máx.
Silicio (Si)	0,40% máx.
* Cobre (Cu)	0,20% mínimo

Propiedades mecánicas

En la tabla 10 se indican sus propiedades mecánicas

Tabla 10

Propiedades mecánicas del acero ASTM A36

Límite de fluencia mínimo		Resistencia a la tracción			
Mpa	Psi	Psi		Mpa	
		Min	Max	Min	Max
250	36000	58000	80000	400	550

*Nota***:** Catalogo BHOLER – VOESTALPINE

Material de Aporte

Para el experimento de este trabajo de investigación se seleccionó el electrodo E-7018. AWS A5.1 (la hoja técnica se proporciona en el Apéndice 1) porque tiene una mayor resistencia a la tracción que el acero ASTM A36. Este es un electrodo de tipo básico con bajos niveles de hidrógeno con excelentes propiedades mecánicas y de soldabilidad. Tiene un arco muy suave, pocas salpicaduras y una eliminación de escoria muy sencilla. El contenido

de hierro en el polvo mejora su tasa de deposición. Es el producto con mejor resistencia a la tracción de su categoría.

Aplicaciones Típicas

- Aceros de baja aleación, alta resistencia y carbono medio a alto.
- Para aceros con alto contenido en azufre y de fácil fresado.
- Para aceros laminados en frío.
- Por sus propiedades de resistencia y facilidad de uso, es particularmente adecuado
- •Para: soldadura de tuberías de vapor, calderas de alta presión, piezas de maquinaria pesada, plantas petroleras, petroquímicas y mineras.

El análisis químico del metal depositado y sus propiedades mecánicas se muestran en las Tablas 11 y 12.

Tabla 11

Análisis químico de metal depositado del electrodo E-7018

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros.
0.06	0.9	0.30	Max.0.020	Min.0.020	0.5	---	5.00	------	-------

*Nota***:** Manual de bolsillo. Oerlikon S.A.

Tabla 12

Propiedades mecánicas del electrodo E 7018

Tratamiento térmico	**Resistencia la tracción [MPa (psi)]**	**a**	**Límite de fluencia [MPa (psi)]**	**Elongación en 2" [%]**	**Energía absorbida (+20°C) [J]**
Tratamiento Térmico (1)	600 – 700 (87000-	-	> 460 (66700)	> 19	[+20 °C (+68 °F)]

101500)	> 100 (74)

Probetas Objeto de Investigación

Características de las Probetas

Para la experimentación se usaron 10 probetas, las cuales se emparejaron y se codificaron para una mejor identificación de las mismas. En la figura 58 se observa las probetas objeto de investigación. Las características de las probetas se detallan en la tabla 13.

Figura 57

Probetas para el estudio plenamente identificadas

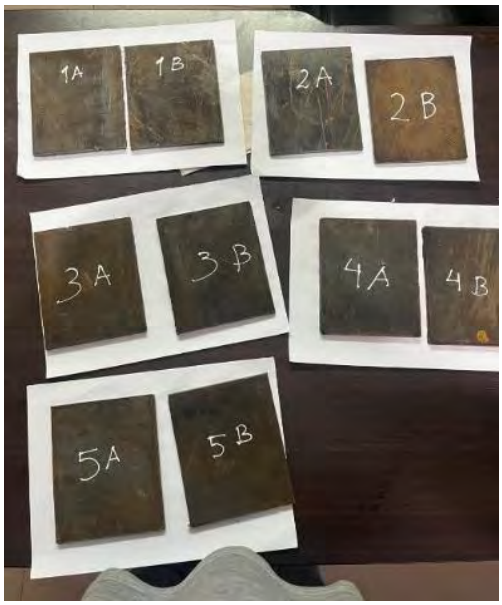


Tabla 13

Características de las probetas

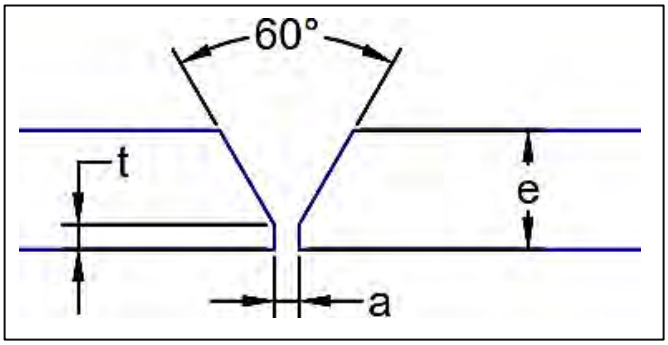
Denominación (por probeta individual)	Dimensión
Ancho (mm)	150
Longitud (mm)	200
Espesor (mm)	¼” (6.35 mm)

Preparación de las Probetas para la Soldadura

Por las características que tienen las probetas, estas se prepararon con una junta a tope, con bisel en “V” de 30° en cada probeta, como se observa en la tabla 59.

Figura 58

Tipo de junta



Nomenclatura de la junta a soldar se detalla en la tabla 14.

Tabla 14

Nomenclatura de la junta

Símbolo	Descripción	Probeta de experimentación
a	Separación entre placas	3 mm
e	Espesor de la probeta.	6.35 mm
t	Talón	2 mm

Para una mejor identificación de las probetas estas se codificaron individualmente en: 1A,1B; 2B, 2B; 3A,3B; 4A, 4B; 5A, 5B. para la soldabilidad de las probetas estas parearon, como se indica en la tabla 15.

Tabla 15

Codificación de probetas pareadas.

Probeta	Codificación
1	P1 (1A-1B)
2	P2 (2A-2B)
3	P3 (3A-3B)
4	P4 (4A-4B)
5	P5 (5A-5B)

Soldabilidad de las Probetas

Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para las probetas de investigación.

Para la soldadura de las probetas, primero se realiza la elaboración del WPS, este es un documento que ayuda a la mejor elaboración del cordón de soldadura, en este documento

se indica las variables y parámetros (ver tablas 15, 16, 17, 18 y 19) que debe seguir el soldador para un buen proceso.

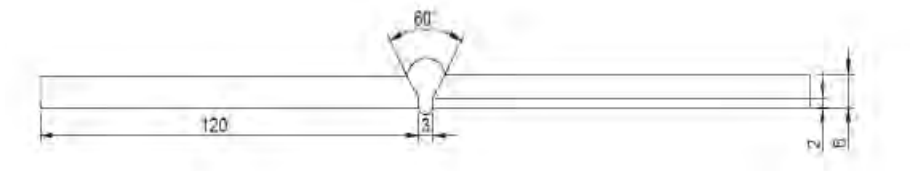
Tabla 16

Probeta 1 (1A +1B)

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA	

ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) WPS N° 001			
Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Según Norma: AWS DI.1/2020		WPS No.: PQR de Soporte No.: Fecha: Realizado por:	001 001 18/10/2024 Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno H.
JUNTA UTILIZADA		POSICIÓN DE SOLDADURA	
Tipo de junta:	A tope en “V”.	Posición de Soldadura:	1G
Abertura raíz (e):	3 mm		
Talón (c):	2 mm	Progresión:	
Angulo de ranura (β):	N/A		
Placa de respaldo:	sí: No: X		
Cordón de respaldo:	sí: No: X	Técnica:	Un pase
Preparar bisel:	sí: No: X		
METAL BASE		PRECALENTAMIENTO	
Especificación:	ASTM A 36	Temperatura:	N/A
Espesor (t):	6.35 mm	Temperatura entre pases:	N/A
METAL DE APORTE		TÉCNICA DE SOLDADURA	
Proceso:	SMAW	Soldadura de:	Tope
		Proceso de soldadura:	SMAW
Especificación (SFA)	5.5	Tipo de Soldadura:	Manual
Diámetro:	1/8” (3.175 mm).	Cordón de respaldo:	Si: No: x
Denominación AWS:	E 7018	Pase múltiples o simples (por lado)	simple
Marca:	PARACAS	Electrodos Múltiples o únicos	Único
Velocidad de soldeo (mm/ser)	2,0	Cordón Recto u Oscilante	recto

		Limpieza: cepillo metálico	
		Primer pase	Solo uno
GAS DE PROTECCIÓN		Pases siguientes:	N/A
Tipo: Caudal:		Pase de respaldo:	N/A
NOTAS			
Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta.			
DETALLE DE LA JUNTA			



CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

N° DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/min)	Progresión	Técnica desoldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto
1	E 7018	3.175 (1/8")	DC+	90	22	2.0	Plana	X	

Tabla 17

Probeta 2 (2A +2B)

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA	

ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

WPS N° 002

Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Según Norma: AWS DI.1/2020	WPS No.:	002
	PQR de Soporte No.:	002
	Fecha:	18/10/2024
	Realizado por:	Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno H.

JUNTA UTILIZADA		POSICIÓN DE SOLDADURA	
Tipo de junta:	A tope en "V".	Posición de Soldadura:	1G
Abertura raíz (e):	3 mm		
Talón (c):	2 mm		

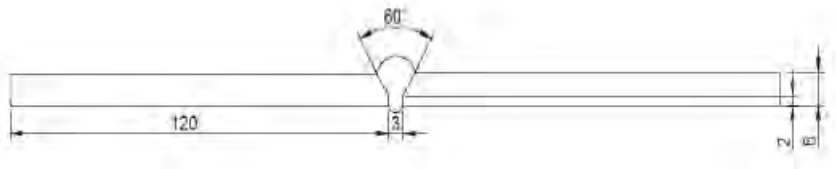
Angulo de ranura (β):	N/A		
Placa de respaldo:	sí: No: X	Progresión:	
Cordón de respaldo:	sí: No: X	Técnica:	Un pase
Preparar bisel:	sí: No: X		

METAL BASE		PRECALENTAMIENTO	
Especificación:	ASTM A 36	Temperatura:	N/A
Espesor (t):	6.35 mm	Temperatura entre pases:	N/A
METAL DE APORTE		TÉCNICA DE SOLDADURA	
Proceso:	SMAW	Soldadura de:	Tope
		Proceso de soldadura:	SMAW
Especificación (SFA)	5.5	Tipo de Soldadura:	Manual
Diámetro:	1/4" (3.175 mm).	Cordón de respaldo:	Si: No: x
Denominación AWS:	E 7018	Pase múltiples o simples (por lado)	simple
Marca:	PARACAS	Electrodos Múltiples o únicos	Único
Velocidad de soldeo (mm/ser)	2,90	Cordón Recto u Oscilante	recto
		Limpieza: cepillo metálico	
		Primer pase	Solo uno
GAS DE PROTECCIÓN		Pases siguientes:	N/A
Tipo: Caudal:		Pase de respaldo:	N/A

*NOTA*S

Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta.

DETALLE DE LA JUNTA



CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

N° DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/min)	Progresión	Técnica desoldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto
1	E 7018	3.175 (1/8")	DC+	115	23		Plana	X	

Tabla 18

Probeta 3 (3A +3B)

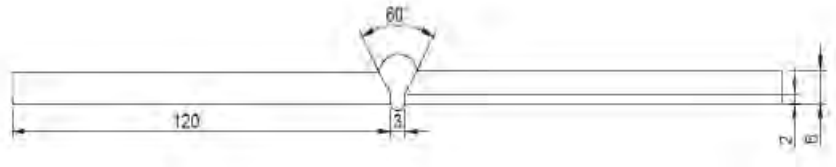
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA.** **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**	

ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

WPS N° 003

Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Según Norma: AWS DI.1/2020		WPS No.: PQR de Soporte No.: Fecha: Realizado por:	003 003 18/10/2024 Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno H.
JUNTA UTILIZADA		POSICIÓN DE SOLDADURA	
Tipo de junta:	A tope en “V”.	Posición de Soldadura:	1G
Abertura raíz (e):	3 mm		
Talón (c):	2 mm	Progresión:	
Angulo de ranura (β):	N/A		
Placa de respaldo:	sí: No: X		
Cordón de respaldo:	sí: No: X	Técnica:	Un pase
Preparar bisel:	sí: No: X		
METAL BASE		PRECALENTAMIENTO	
Especificación:	ASTM A 36	Temperatura:	N/A
Espesor (t):	6.35 mm	Temperatura entre pases:	N/A
METAL DE APORTE		TÉCNICA DE SOLDADURA	
Proceso:	SMAW	Soldadura de:	Tope
		Proceso de soldadura:	SMAW
Especificación (SFA)	5.5	Tipo de Soldadura:	Manual
Diámetro:	1/4” (3.175 mm).	Cordón de respaldo:	Si: No: x
Denominación AWS:	E 7018	Pase múltiples o simples (por lado)	Simple
Marca:	PARACAS	Electrodos Múltiples o únicos	Único
Velocidad de soldeo (mm/seg)	3.5	Cordón Recto u Oscilante	Recto
		Limpieza: cepillo metálico	
		Primer pase	Solo uno

GAS DE PROTECCIÓN		Pases siguientes:	N/A
Tipo: Caudal:		Pase de respaldo:	N/A
*NOTA*S			
Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta.			
DETALLE DE LA JUNTA			



CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

N° DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/min)	Progresión	Técnica desoldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto
1	E 7018	3.175 (1/8”)	DC+	135	25	3.5	Plana	X	

Tabla 19

Probeta 4 (4A +4B)

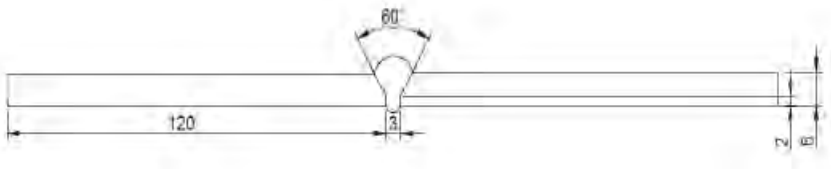
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA	
ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) WPS N° 004		
Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. **Según Norma**: AWS DI.1/2020	**WPS No.:** 004 **PQR de Soporte No.:** 004 **Fecha:** 18/10/2024 **Realizado por:** Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno H.	
JUNTA UTILIZADA	**POSICIÓN DE SOLDADURA**	

Tipo de junta:	A tope en “V”.	Posición de Soldadura:	1G
Abertura raíz (e):	3 mm		
Talón (c):	2 mm	Progresión:	
Angulo de ranura (β):	N /A		
Placa de respaldo:	No: Í: X		
Cordón de respaldo:	No: Í: X	Técnica:	Un pase
Preparar bisel:	No: Í: X		

METAL BASE		**PRECALENTAMIENTO**	
Especificación:	ASTM A 36	Temperatura:	N/A
Espesor (t):	6.35 mm	Temperatura entre pases:	N/A

METAL DE APORTE		**TÉCNICA DE SOLDADURA**	
Proceso:	SMAW	Soldadura de:	Tope
		Proceso de soldadura:	SMAW
Especificación (SFA)	5.5	Tipo de Soldadura:	Manual
Diámetro:	1/8” (3.175 mm).	Cordón de respaldo:	i: o: x
Denominación AWS:	E 7018	Pase múltiples o simples (por lado)	simple
Marca:	PARACAS	Electrodos Múltiples o únicos	Único
Velocidad de soldeo (mm/seg)	4,3	Cordón Recto u Oscilante	recto
		Limpieza: cepillo metálico	
		Primer pase	Solo uno
GAS DE PROTECCIÓN		Pases siguientes:	N/A
Tipo: Caudal:		Pase de respaldo:	N/A

*NOTA***S**
• Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta.
DETALLE DE LA JUNTA



CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN									
N° DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Escilado	ecto
1	E 7018	3 .175 (1/8")	C+	45	27	.3	Plana	X	

Tabla 20

Probeta 5 (5A +5B)

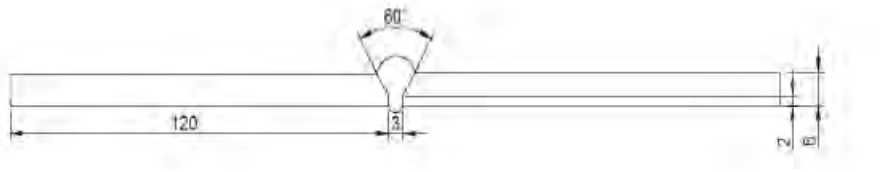
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA	
ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) WPS N° 005		
Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. **Según Norma**: AWS DI.1/2020	**WPS No.:** 005 **PQR de Soporte No.:** 005 **Fecha:** 18/10/2024 **Realizado por:** Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno H.	
JUNTA	**POSICIÓN DE SOLDADURA**	

UTILIZADA			
Tipo de junta:	A tope en “V”.	Posición de Soldadura:	1G
Abertura raíz (e):	3 mm		
Talón (c):	2 mm	Progresión:	
Angulo de ranura (β):	N /A		
Placa de respaldo:	No: Í: X		
Cordón de respaldo:	No: Í: X	Técnica:	Un pase
Preparar bisel:	No: Í: X		

METAL BASE		PRECALENTAMIENTO	
Especificación:	ASTM A 36	Temperatura:	N/A
Espesor (t):	6.35 mm	Temperatura entre pases:	N/A

METAL DE APORTE		TÉCNICA DE SOLDADURA	
Proceso:	SMAW	Soldadura de:	Tope
		Proceso de soldadura:	SMAW
Especificación (SFA)	5.5	Tipo de Soldadura:	Manual
Diámetro:	1/8” (3.175 mm).	Cordón de respaldo:	i: o: x
Denominación AWS:	E 7018	Pase múltiples o simples (por lado)	simple
Marca:	PARACAS	Electrodos Múltiples o únicos	Único
Velocidad de soldeo (mm/seg)	4.7	Cordón Recto u Oscilante	recto
		Limpieza: cepillo metálico	
		Primer pase	Solo uno
GAS DE PROTECCIÓN		Pases siguientes:	N/A
Tipo: Caudal:		Pase de respaldo:	N/A

NOTAS
• Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta.
DETALLE DE LA JUNTA



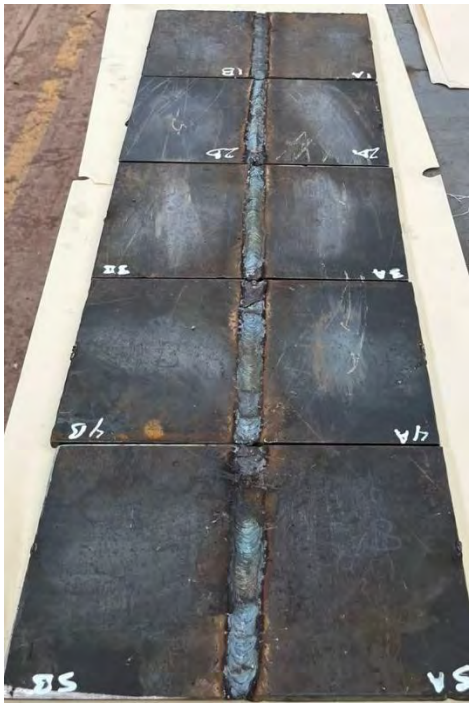
CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

N° DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/min)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto
1	E 7018	3 .175 (1/8")	C+	60	28	.7	Plana	X	

En la figura 60 se observa las probetas soldadas.

Figura 59

Probetas soldadas



Cálculos Efectuados en la Investigación.

Cálculo del Aporte de Calor Neto

Para determinar el calor neto o la energía de soldeo se usó de la siguiente ecuación 1 anteriormente planteado:

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

Donde:

H_{net} = Calor neto suministrado (J/mm)

V = Tensión de corriente (Voltios -V)

I = Intensidad de corriente (Amperios - A)

v = Velocidad de avance (mm/s)

f = Eficiencia térmica del proceso de soldadura. Para el proceso SMAW, se ha considerado un promedio de 75%.

Probeta N° 1

$$Hnet = \frac{90 \times 22}{3.0} \times 0.75 = 495.0\, J/mm$$

Probeta N° 2

$$Hnet = \frac{105 \times 23}{3.0} \times 0.75 = 603.75\, J/mm$$

Probeta N° 3

$$Hnet = \frac{120 \times 25}{3.0} \times 0.75 = 750.00\, J/mm$$

Probeta N° 4

$$Hnet = \frac{135 \times 27}{3.0} \times 0.75 = 911.25\, J/mm$$

Probeta N° 5

$$Hnet = \frac{150 \times 28}{3.0} \times 0.75 = 1050.00\, J/mm$$

Los valores obtenidos se resumen en la tabla 21.

Tabla 21

Valores de calor neto

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión (V)	Velocidad de soldeo (mm/s)	Eficiencia térmica (%)	Calor neto (J/mm)
1	90	22	3.0	75	495.0
2	105	23	3.0	75	603.75
3	120	25	3.0	75	750.00
4	135	27	3.0	75	911.25
5	150	28	3.0	75	1050.00

Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC)

En el marco teórico fue desarrollada la ecuación del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC), y fue calculado a partir de la ecuación 5.

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_0}\right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_0}\right)\right]\left[\frac{H_{net}}{4.13 * \rho * C * t}\right] \; Ec. 5$$

Donde:

- Y = ancho de la ZAC (mm)
- T_{max} = Temperatura máxima en la zona adyacente al ZAC (°C)
- To = Temperatura inicial del material (°C)
- $T_{fusión}$ = Temperatura de fusión (°C)
- ρ = Densidad del material (g/mm3)
- *C* = Calor específico del metal sólido (J/g. °C)
- *t* = Espesor del material (mm)
- Hnet = Calor neto (J/mm)

- Los datos para el acero ASTM A36 son los siguientes:

- Temperatura de fusión: Tfusión = 1500°C
- Temperatura máxima: Tmax = 723 °C
- Temperatura inicial: To = 16 °C
- Densidad del acero: ρ = 7.85 g/cm3 = 0.00785 g/mm^3
- Calor específico del acero: 0.134 cal/g. °C = 0.561 J/g. °C
- Espesor del material: t = 6.35 mm
- Densidad del acero: ρ = 7.85 g/cm3 = 0.00785 g/mm3
- Espesor del material: t = 6.35 mm

- Calor especifico volumétrico para el acero ASTM A36: 0.0044

Fosca (2005), en su texto "Introducción a la metalurgia de la soldadura, menciona el "valor especifico volumétrico del acero como 0.0044 J/m^3°C, con este dato se calcula el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC)".

Probeta 1

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-16}\right) - \left(\frac{1}{1500-16}\right)\right] x \left[\frac{495.0}{4.13x0.0044x6.35}\right] = 3.2mm$$

Probeta 2

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-16}\right) - \left(\frac{1}{1500-16}\right)\right] x \left[\frac{603.75}{4.13x0.0044x6.35}\right] = 4.00\ mm$$

Probeta 3

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-16}\right) - \left(\frac{1}{1500-16}\right)\right] x \left[\frac{750}{4.13x0.0044x6.35}\right] = 4.12\ mm$$

Probeta 4

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-16}\right) - \left(\frac{1}{1500-16}\right)\right] x \left[\frac{911.25}{4.13x0.0044x6.35}\right] = 4.38\ mm$$

Probeta 5

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723-16}\right) - \left(\frac{1}{1500-16}\right)\right] x \left[\frac{1050.00}{4.13x0.0044x6.35}\right] = 7.64\ mm$$

En la tabla 22, se resumen los valores del ancho de la ZAC:

Tabla 22

Ancho de la ZAC

Probeta	Ancho de la ZAC (mm)
1	3.20 mm
2	4.00 mm
3	4.12 mm
4	4.38 mm
5	7.64 mm

*Nota***:** Elaboración propia

Cálculo de la temperatura máxima en la zona intermedia (50%) del ancho de la ZAC

Y= 50%

PROBETA 1

$$Tmax = \frac{1}{\frac{4{,}13 \times 0.0044 \times 6.35 \times 1{,}60}{495.00} + \frac{1}{1500 - 16}} + 16 = 971.29\,°C$$

PROBETA 2

$$Tmax = \frac{1}{\frac{4{,}13 \times 0.0044 \times 6.35 \times 2.0}{603.75} + \frac{1}{1500 - 16}} + 16 = \ 962.88\,°C$$

PROBETA 3

$$Tmax = \frac{1}{\frac{4{,}13 \times 0.0044 \times 6.35 \times 2.06}{750.00} + \frac{1}{1500 - 16}} + 16 = 1025.29\,°C$$

PROBETA 4

$$Tmax = \frac{1}{\frac{4{,}13 \times 0.0044 \times 6.35 \times 2.19}{911.25} + \frac{1}{1500 - 16}} + 16 = 1067.33\,°C$$

PROBETA 5

$$Tmax = \frac{1}{\frac{4{,}13 \times 0.0044 \times 6.35 \times 3.82}{1050.00} + \frac{1}{1500 - 16}} + 16 = 930.41\ °C$$

En la siguiente tabla , se resume las temperaturas máximas calculadas a un 50% del ancho de la ZAC.

Tabla 23

Temperaturas máximas calculadas a un 50% del ancho de la ZAC.

Probeta	Ancho de la ZAC (mm)	50% del Y(mm)	Temperatura máxima a 50% de Y (%)
	3.20 *mm*	1.60	971.29
	4.00 *mm*	2.00	962.88
	4.12 *mm*	2.06	1025.29
	4.38 *mm*	2.19	1067.33
	7.64 *mm*	3.82	930.41

Cálculo de la Velocidad de Enfriamiento

Fosca (2005), "la actuación para chapas gruesas se emplea cuando el flujo de calor es tridimensional, es decir hacia abajo y hacia los laterales de la soldadura." La ecuación de chapas delgadas se aplicaría a cualquier pasada única, soldadura de penetración completa o corte térmico. En base a esta aseveración se calculó la velocidad de enfriamiento de las probetas objeto de investigación con la ecuación 7 siguiente:

$$R = 2\pi K \rho C \left[\frac{t}{Hnet}\right]^2 (Tc - To)^3 \qquad \text{Ec.7}$$

Conductividad térmica K aproximada del acero ASTM A36 es K = 0.053 J/mm·s·°C a temperatura ambiente.

Reemplazando valores en la ecuación anterior, tenemos:

Probeta 1:

$$R = 2\pi 0.053x\ 0.0044\left[\frac{6.35}{495}\right]^2 (550-16)^3 = 36.7\ °C/seg$$

Probeta 2:

$$R = 2\pi(0.053)(0.0044)\left[\frac{6.35}{603.75}\right]^2 .(550-16)^3 = 24.68\ °C/seg$$

Probeta 3:

$$R = 2\pi(0.053)(0.0044)\left[\frac{6.35}{750}\right]^2 .(550-16)^3 = 15.99\ °C/seg$$

Probeta 4:

$$R = 2\pi(0.053)(0.0044)\left[\frac{6.35}{911.25}\right]^2 .(550-16)^3 = 10.83\ °C/seg.$$

Probeta 5

$$R = 2\pi(0.053)(0.0044)\left[\frac{6.35}{1050}\right]^2 .(550-16)^3 = 8.16\ °C/seg.$$

Resumiendo, los resultados en la tabla 24.

Tabla 24

Velocidad de enfriamiento

Probeta	Calor neto aportado (J/mm²)	Velocidad de enfriamiento (°C/seg)
1	495.00	36.70
2	603.75	24.68
3	750.00	15.99
4	911.25	10.83
5	1050.00	8.16

Cálculo de la velocidad de enfriamiento en la zona intermedia (50%) de la ZAC

Probeta 1:

$$R = 2\pi 0.053x\ 0.0044\left[\frac{6.35}{495}\right]^2 .(971.29-16)^3 = 210.1\ °C/seg$$

Probeta 2:

$$R = 2\pi(0.053)(0.0044)\left[\frac{6.35}{603.75}\right]^2 .(962.88-16)^3 = 138.00\,°C/seg$$

Probeta 3:

$$\mathrm{R} = 2\pi(0.053)(0.0044)\left[\frac{6.35}{750}\right]^2 .(1025.29-16)^3 = 108.00\,°\mathrm{C/seg}$$

Probeta 4:

$$R = 2\pi(0.053)(0.0044)\left[\frac{6.35}{911.25}\right]^2 .(1067.33-16)^3 = 83.00\,°\mathrm{C/seg.}$$

Probeta 5

$$R = 2\pi(0.053)(0.0044)\left[\frac{6.35}{1050}\right]^2 .(930.41-16)^3 = 41.00\,°\mathrm{C/seg.}$$

En la tabla 25 se resume las velocidades de enfriamiento en el 50% del ancho de la ZAC.

Tabla 25

Velocidad de enfriamiento en el 50% del ancho de la ZAC.

Probeta	50% del Y(mm)	Temperatura en el 50% de Y (°C)	Velocidad de enfriamiento (°C/seg) en el 50% de Y
1	2.38	971.29	210.1
2	2.00	962.88	138.00
3	2.06	1025.29	108.00
4	2.19	1067.33	83.00
5	3.82	930.41	108.00

Control de Calidad de las Probetas

Inspección Visual de las Probetas Soldadas

La inspección visual es un método esencial para evaluar una junta soldada, ya que permite identificar discontinuidades superficiales en el cordón de soldadura antes de realizar cualquier otro tipo de ensayo.

Tomando en cuenta los criterios de aceptación los resultados obtenidos del ensayo de inspección visual a las probetas objeto de investigación se muestran en la tabla 26.

Tabla 26

Resultados del ensayo de inspección visual

Probeta	Discontinuidades detectadas		Descripción	Calificación según AWS D1.1
	Cara	Raíz		
1	No	Si	Falta de penetración en raíz	Rechazado
2	Si	Si	Presencia de fisuras	Rechazado
3	No	No	Ninguno	Aprueba
4	No	No	Ninguno	Aprueba
5	No	No	Ninguno	Aprueba

Análisis del resultado:

De los resultados obtenidos se pueden concluir lo siguiente:

- Probeta 1: Si es cierto que hubo un depósito correcto en la cara del depósito, pero se observó que en la raíz hubo una penetración insuficiente (aproximadamente de 1 mm), de acuerdo a los criterios de aceptación indicados en la norma ASW D1.1 para nuestro trabajo de investigación lo tomamos como aceptable.
- Probetas 2, 3 y 4: Mostraron un depósito aceptable por lo que se consideraron aceptables para continuar con la investigación

Ensayo de Doblado

Este ensayo permite averiguar la ductilidad de la unión soldada y permite comprobar si existen imperfecciones sobre las caras del cordón y sobre la zona afectada térmicamente.

La máquina de ensayo dobla la probeta de dimensiones normalizadas, cargándola gradualmente hasta doblarla 180º.

Requerimientos de la norma AWS D1.1

La norma AWS D1.1M:2015, designa la cantidad de probetas para ensayos destructivos según el espesor del material base, ver la Tabla 27.

Tabla 27

Cantidad de probetas para los ensayos según norma AWS D1.1.

Espesor nominal (t) (mm)	Número de probetas					
	Tensión reducida	Doblado de cara	Doblado de raíz	Doblado de lado	Micrografía	Dureza
3<t<10	2	2	2			
10<t<25	2			4		
t>25	3			5		

Nota: American Welding Society (2015)

- **Selección de las probetas para ensayo de doblado**

Las probetas para este ensayo se prepararon y se seleccionaron según indicaciones de la norma AWS D1.1-2020.

Figura 60

Preparación de probetas



En la figura 62, se observa la operación de doblado.

Figura 61

Doblado de las probetas



Registro de calificación del procedimiento (PQR) para la prueba de doblez.

Tabla 28

Doblez probeta 1

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.							
	ENSAYO DE DOBLADO GUIADO.							PQR
Datos informativos del espécimen a ensayar								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	Variado	Voltaje		er. de soldeo	Uniforme	
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		1		
Norma aplicable:	AWS D1.1.2020			Fecha de elaboración:		18/03/2025		
Realizado por:	H. Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno			Asesor:		Dr. Gustavo Janqui Guzmán		
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC							
Espesor de la probeta:	6.35 mm		Longitud de la probeta:			230 mm		
Resultados.								
Probeta	Lado dela prueba					Observaciones		
	Cara					No presenta discontinuidad		
	Raíz					Presenta discontinuidad		

Aprobación:	No aprueba

Tabla 29

Doblez probeta 2

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.						
ENSAYO DE DOBLADO GUIADO.							PQR
Datos informativos del espécimen a ensayar							
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	Variado	Voltaje		vel. de soldeo	Uniforme
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		2	
Norma aplicable:	AWS D1.1.2020			Fecha de elaboración:		18/03/2025	
Realizado por:	H. Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno			Asesor:		Dr. Gustavo Janqui Guzmán	
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC						
Espesor de la probeta:	6.35 mm		Longitud de la probeta:		230 mm		
Resultados.							
Probeta	Lado dela prueba			Observaciones			
	Cara			No presenta discontinuidad			
	Raíz			Presenta discontinuidad			

		
Aprobación:		No aprueba

Tabla 30

Doblez probeta 3

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.						
ENSAYO DE DOBLADO GUIADO.						PQR	
Datos informativos del espécimen a ensayar							
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	Variado	Voltaje		vel. de soldeo	Uniforme
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		3	
Norma aplicable:	AWS D1.1.2020			Fecha de elaboración:		18/03/2025	
Realizado por:	H. Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno			Asesor:		Dr. Gustavo Janqui Guzmán	
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC						
Espesor de la probeta:	6.35 mm		Longitud de la probeta:		230 mm		

Resultados.		
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones
	Cara	No presenta discontinuidad
	Raíz	Presenta discontinuidad
Aprobación:		No aprueba

Tabla 31

Doblez probeta 4

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.						
ENSAYO DE DOBLADO GUIADO.							PQR
Datos informativos del espécimen a ensayar							
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	Variado	Voltaje		vel. de soldeo	Uniforme
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		4	
Norma aplicable:	AWS D1.1.2020			Fecha de elaboración:		18/03/2025	
Realizado por:	H. Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno			Asesor:		Dr. Gustavo Janqui Guzmán	

Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC		
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:	230 mm
Resultados.			
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones	
	Cara	No presenta discontinuidad	
	Raíz	No Presenta discontinuidad	
Aprobación:		No aprueba	

Tabla 32

Doblez probeta 5

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.						
ENSAYO DE DOBLADO GUIADO.							PQR
Datos informativos del espécimen a ensayar							
Proceso de soldado	SMA W	Amperaje	Variado	Voltaje		vel. de soldeo	Uniforme
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		5	
Norma aplicable:	AWS D1.1.2020			Fecha de elaboración :		18/03/2025	

<table>
<tr><td>Realizado por:</td><td colspan="2">H. Luis E. Hancco H. y Julio C. Cjuno</td><td>Asesor:</td><td colspan="2">Dr. Gustavo Janqui Guzmán</td></tr>
<tr><td colspan="2">Centro de estudio y análisis:</td><td colspan="4">Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC</td></tr>
<tr><td colspan="2">Espesor de la probeta:</td><td>6.35 mm</td><td colspan="2">Longitud de la probeta:</td><td>235 mm</td></tr>
<tr><td colspan="6">Resultados.</td></tr>
<tr><td>Probeta</td><td colspan="2">Lado dela prueba</td><td colspan="3">Observaciones</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td colspan="2">Cara</td><td colspan="3">No presenta discontinuidad</td></tr>
<tr><td colspan="2">Raíz</td><td colspan="3">No presenta discontinuidad</td></tr>
<tr><td colspan="3">Aprobación:</td><td colspan="3">No aprueba</td></tr>
</table>

Resultados.

En la tabla 33, se resume los resultados del ensayo de doblado.

Tabla 33

Resultados del ensayo de doblado.

Probeta		
1	Transversal de Cara	Aprobado
	Transversal de Raíz	Aprobado
2	Transversal de Cara	Aprobado
	Transversal de Raíz	Aprobado
3	Transversal de Cara	Aprobado
	Transversal de Raíz	Aprobado

4	Transversal de Cara	Aprobado
	Transversal de Raíz	Aprobado
5	Transversal de cara	Aprobado
	Transversal de Raíz	Aprobado

Análisis del resultado:

- Probeta 1: Presenta fisuras, por presentar una microestructura martensítica, lo que le hace muy susceptibles a fracturas y fisuras por presentar alta dureza y fragilidad.
- Probeta 2: Aunque puede tener un poco de bainita, siempre contiene un poco de martensita, lo que le hace frágil por lo que aparece fisuras.
- Probeta 3: No presenta discontinuidades que puedan dañar la probeta. Esto es por presentar mayor cantidad de bainita que en la probeta 2, aunque mínima porción de martensita, esto hace que no presente fisuras en el ensayo de doblado.
- Probeta 4: No presenta discontinuidades, esto se debe a que su microestructura está compuesta mayormente por bainita, lo que le hacen que sean más dúctiles.
- Probeta 5: No presenta discontinuidades, por tener una microestructura conformada mayoritariamente por bainita, aunque en mínimas cantidades de ferrita y bainita.

Ensayo por Líquidos Penetrantes

- **Procedimiento para realizar en ensayo de líquidos penetrantes:**

Limpieza de la superficie

Dado que la zona del depósito puede estar contaminada por impurezas, tales como grasa, polvo, escoria lo que podría dar una lectura errónea, se realiza la limpieza.

Se realizo la limpieza de forma mecánica y química. La limpieza mecánica se realizó con una escobilla de acero inoxidable y la limpieza química con un disolvente en forma de espray, tal como se observa en la figura 63.

Figura 62

Limpieza química del depósito de soldadura.



Aplicación del tinte penetrante

Después de verificar que el depósito de soldadura este limpio, se procede a la aplicación del tinte penetrante. El envase del tinte penetrante debe estar a una distancia aproximada de unos 30 cm de la superficie. El rociado del penetrante se realizó en forma paralela y uniforme a lo largo de la zona a inspeccionar(zona de soldadura). En la figura 64, se observa esta operación.

Figura 63

Rociado con tinte penetrante



Remoción del exceso de tinte penetrante

Durante 10 minutos se deja actuar al penetrante, posterior a este lapso de tiempo, se limpia con un paño el exceso del líquido penetrante, como se observa en la figura 65.

Figura 64

Limpieza del exceso de penetrante.



Aplicación del tinte revelador

Se distribuye de manera uniforme una capa delgada en el área a examinar, manteniendo una distancia de aproximadamente 20 a 30 cm entre el recipiente del revelador y la soldadura a probar. Se deja reposar durante 15 minutos para que las discontinuidades en el área inspeccionada se hagan visibles. Esta operación se observa en el a figura 66.

Figura 65

Aplicación del tinte revelador

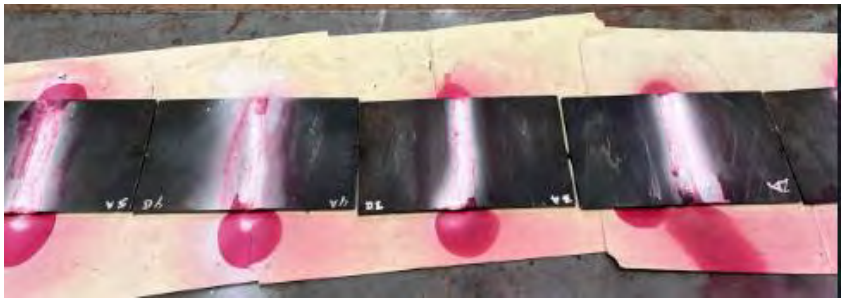


Visualización del tinte revelador.

El revelador debe permanecer sobre la superficie de la muestra durante 15 minutos para permitir que el penetrante salga de cualquier defecto superficial.

Figura 66

Visualización de posibles discontinuidades.



Limpieza del cupón

La operación final de este proceso es una limpieza general del cupón. A partir de esta operación se evalúa para exprimir los resultados en la tabla 27 siguiente:

Tabla 34

Resultados de la prueba de líquidos penetrantes

Cupón	Observaciones	Defectos
1	Presenta discontinuidad.	Fisura
2	Presenta discontinuidad.	Fisura
3	No presenta discontinuidad	Ninguna
4	No presenta discontinuidad.	Ninguna
5	No presenta discontinuidad.	Ninguna

Análisis del resultado:

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 25, podemos indicar que la probeta 1y 2 mostraron fisuras, mientras que en las probetas 3 , 4 y 5 no se observaron ninguna discontinuidad.

Tipo de microestructura que muestran las probetas en el depósito.

En base al diagrama Hierro- carbono de se determinó el tipo de microestructura que presenta a diferentes velocidades de enfriamiento.

La microestructura resultante observada y asumida en las probetas con diferentes velocidades de enfriamiento, se muestra en la tabla 35.

Tabla 35

Microestructuras obtenidas a diferentes velocidades de enfriamiento de las probetas estudiadas.

Probeta	**Velocidad de enfriamiento (°C/seg)**	**Tipo de microestructura**	**Dureza (HRC)**
1	36.70	Martensita	53 HRC
2	24.68	Martensita-Bainita	50 HRC
3	15.99	Bainita - martensita, en proporciones equilibradas	45 HRC
4	10.83	Mas proporción de Bainita - muy pequeña presencia de martensita	40 HRC.
5	8.16	Predomina la bainita, con escasa presencia de martensita. Aparecen también pequeñas cantidades de ferrita y perlita.	38 HRC

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 Análisis de la microestructura obtenida

El acero ASTM A36 en condición de suministro presenta normalmente una microestructura compuesta por ferrita y perlita. Esta combinación microestructural proporciona un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, ductilidad y soldabilidad, características que explican su amplio uso en estructuras metálicas y componentes sometidos a cargas moderadas.

Durante el proceso de soldadura SMAW, el material experimenta ciclos térmicos que modifican la estructura original del acero, especialmente en la Zona Afectada por el Calor (ZAC). La velocidad de enfriamiento juega un papel fundamental en estas transformaciones, ya que determina el tiempo disponible para que ocurran los cambios metalúrgicos durante el enfriamiento.

Los resultados obtenidos muestran que a medida que aumenta la velocidad de enfriamiento se favorece la formación de estructuras más duras, mientras que velocidades menores permiten el desarrollo de estructuras más estables y dúctiles.

A continuación, se describe la microestructura observada a las diferentes velocidades de enfriamiento calculada:

Probeta N° 1: Velocidad de enfriamiento de (36.70 °C/s):

La mayor velocidad de enfriamiento evaluada produjo una microestructura constituida principalmente por martensita y pequeñas cantidades de bainita. Desde el punto de vista metalúrgico, el enfriamiento rápido impidió la difusión del carbono necesaria para la formación de ferrita y perlita, favoreciendo la transformación martensítica. Esta condición incrementó considerablemente la dureza del material, aunque también puede aumentar su fragilidad y

susceptibilidad al agrietamiento.

Probeta N° 2: Velocidad de enfriamiento de (24.68 °C/s):

La reducción de la velocidad de enfriamiento permitió la formación de una microestructura compuesta por martensita y bainita. Aunque la martensita continúa siendo predominante, la presencia de bainita contribuye a mejorar ligeramente la tenacidad del material. Como consecuencia, la dureza disminuye respecto a la probeta anterior, manteniendo todavía valores elevados.

Probeta N° 3: Velocidad de enfriamiento de (15.99 °C/s):

En esta condición se observó una proporción más equilibrada entre bainita y martensita.

La disminución progresiva de la velocidad de enfriamiento favoreció la formación de una estructura menos frágil y más homogénea. Esta condición representa un compromiso adecuado entre resistencia y tenacidad, características deseables en muchas aplicaciones estructurales.

Probeta N° 4: Velocidad de enfriamiento de (10.83 °C/s):

A esta velocidad predominó la formación de bainita con una presencia muy reducida de martensita. La reducción de la fracción martensítica permitió obtener una estructura más estable desde el punto de vista mecánico, disminuyendo la dureza y mejorando la capacidad de deformación del material.

Probeta N° 5: Velocidad de enfriamiento de (8.16 °C/s):

La menor velocidad de enfriamiento favoreció la formación predominante de bainita, acompañada por pequeñas cantidades de ferrita y perlita. Esta microestructura se aproxima a la condición original del acero ASTM A36, lo que explica la reducción significativa de la

dureza observada. La presencia de ferrita contribuye a incrementar la ductilidad y disminuir la fragilidad del material.

6.2 Análisis de la Velocidad de enfriamiento al 50% de la ZAC

Los resultados mostrados en la Tabla 36 indican que la velocidad de enfriamiento en el 50 % del ancho de la Zona Afectada por el Calor presentó valores comprendidos entre 83 y 210 °C/s.

Estos resultados evidencian que la transferencia de calor durante el proceso de soldadura no es uniforme en toda la ZAC. Las zonas cercanas al cordón de soldadura experimentan velocidades de enfriamiento más elevadas debido a los gradientes térmicos generados durante la solidificación.

Desde una perspectiva ingenieril, este comportamiento es importante porque las propiedades mecánicas finales del material dependerán directamente de la velocidad con la que se produzca el enfriamiento. Cuanto mayor sea esta velocidad, mayor será la probabilidad de formar microestructuras endurecidas, especialmente martensita.

Tabla 36

Velocidad de enfriamiento a 50% del ancho de la ZAC.

Probeta	50% del Y(mm)	Temperatura en el 50% de Y (°C)	Velocidad de enfriamiento (°C/seg) en el 50% de Y
1	2.38	971.29	210.1
2	2.00	962.88	138.00
3	2.06	1025.29	108.00
4	2.19	1067.33	83.00
5	3.82	930.41	108.00

*Nota***:** Elaboración propia

Prueba de Dureza

Con el fin de obtener los valores de dureza en las zonas de fusión de los cupones, se obtuvieron probetas cortadas transversalmente al depósito de soldadura.

En la tabla 37, se muestra el resultado de la dureza de los depósitos de las probetas.

Tabla 37

Dureza de las probetas en el deposito

Probeta	Velocidad de enfriamiento (°C/seg)	Tipo de microestructura	Dureza (HB)
ASTM A36 Estado de entrega	36.70	Ferrita-perlita	120 a 180
1	36.70	Martensita-Bainita	470
2	24.68	Martensita-Bainita	225
3	15.99	Bainita - martensita, en proporciones equilibradas	190
4	10.83	Mas proporción de Bainita - muy pequeña presencia de martensita	160
5	8.16	Predomina la bainita, con escasa presencia de martensita. Aparecen también pequeñas cantidades de ferrita y perlita.	85

Nota: Elaboración propia

6.3 Análisis de los resultados de dureza

Los resultados obtenidos en los ensayos de dureza muestran una clara influencia de la

velocidad de enfriamiento sobre el comportamiento mecánico del acero ASTM A36.

La dureza máxima registrada fue de 470 HB para la Probeta 1, correspondiente a la mayor velocidad de enfriamiento (36.70 °C/s). Este resultado confirma que la presencia predominante de martensita incrementa significativamente la resistencia a la deformación plástica.

Por otro lado, la Probeta 2 alcanzó una dureza de 225 HB, valor que continúa siendo elevado debido a la combinación de martensita y bainita presentes en la microestructura.

La Probeta 3 presentó una dureza de 190 HB, mostrando una disminución progresiva asociada a la reducción del contenido martensítico y al incremento de bainita.

En la Probeta 4 se obtuvo una dureza de 160 HB, valor que se aproxima al rango característico del acero ASTM A36 en estado normalizado.

Finalmente, la Probeta 5 registró una dureza de 85 HB, la menor de todas las muestras analizadas. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia predominante de bainita acompañada por ferrita y perlita, estructuras que favorecen la ductilidad del material.

Los resultados permiten afirmar que existe una relación inversamente proporcional entre la disminución de la velocidad de enfriamiento y los valores de dureza obtenidos. Conforme disminuye la velocidad de enfriamiento, la dureza también disminuye debido a los cambios microestructurales producidos durante la transformación de fases.

6.4 Discusión de la hipótesis

La hipótesis general planteó que la velocidad de enfriamiento influye significativamente sobre la dureza de la Zona Afectada por el Calor del acero ASTM A36 soldado mediante el proceso SMAW.

Los resultados obtenidos permiten aceptar dicha hipótesis, debido a que se observó una variación importante en los valores de dureza conforme cambiaron las velocidades de enfriamiento aplicadas.

Las probetas sometidas a enfriamientos más rápidos desarrollaron microestructuras con mayor contenido de martensita, alcanzando valores de dureza considerablemente superiores respecto a las probetas enfriadas más lentamente. Por el contrario, las menores velocidades de enfriamiento favorecieron la formación de bainita, ferrita y perlita, generando una disminución progresiva de la dureza.

Estos resultados son consistentes con los principios de la metalurgia de la soldadura, los cuales establecen que la velocidad de enfriamiento controla las transformaciones de fase y, por consiguiente, las propiedades mecánicas finales del material.

En consecuencia, se concluye que la velocidad de enfriamiento constituye un factor determinante en la modificación de la microestructura y la dureza de la Zona Afectada por el Calor del acero ASTM A36 soldado mediante el proceso SMAW.

CONCLUSIONES

Se verificó que la rapidez de enfriamiento afecta Notablemente la dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) del acero ASTM A36 soldado usando el método SMAW. Las mayores cifras de dureza surgieron en las muestras expuestas a velocidades de enfriamiento superiores, lográndose 470 HB para una velocidad de 36.70 grados Celsius por segundo. Esta conducta está vinculada a la creación de microestructuras endurecidas, sobre todo martensita, las cuales aumentan la resistencia del material, aunque también pueden elevar su fragilidad y la probabilidad de aparición de grietas.

Se concluyó que los cambios microestructurales generados en el proceso de enfriamiento poseen impacto directo sobre las características mecánicas del acero tipo ASTM A36. En tasas de enfriamiento elevadas dominó la aparición de martensita junto a bainita, logrando así cifras superiores de dureza; por otro lado cuando baja la tasa de enfriamiento se detectó mayor cantidad de bainita, ferrita y perlita, resultando esto en menor dureza pero permitiendo mejor capacidad de deformación plástica dentro del material estudiado.

Resultados hallados permiten concluir que el control sobre la velocidad del enfriamiento constituye un factor importante durante los procesos de soldadura del acero ASTM A36, debido a que permite modificar las características microestructurales y mecánicas de la Zona Afectada por el Calor. En aplicaciones estructurales, un enfriamiento controlado contribuye a obtener un mejor equilibrio entre dureza, resistencia y ductilidad, favoreciendo la calidad y confiabilidad de las uniones soldadas.

La hipótesis propuesta en el estudio resultó aceptada porque se verificó experimentalmente que las alteraciones en la rapidez de enfriamiento provocan modificaciones tanto en la microestructura como en los niveles de dureza dentro de la Zona Afectada por el Calor. Los datos conseguidos demuestran una conexión directa existente

entre la celeridad de enfriamiento, la aparición de fases metálicas y el desempeño mecánico del acero tipo ASTM A36 que fue soldado usando el procedimiento SMAW.

RECOMENDACIONES

Evitar enfriamientos bruscos exponiendo la soldadura a corrientes de aire o agua para reducir la formación de microestructuras duras como martensita en la ZAC, similarmente el factor influyente para una mayor velocidad de enfriamiento es que la gradiente de temperatura es relativamente grande como en el caso de las probetas 1 y 2 esto se puede evitar haciendo que dicha gradiente sea moderado gracias a un cuidado de las variables influyentes de la temperatura como son; intensidad de corriente que involucra el voltaje y sobre todo la velocidad de avance del cordón que depende básicamente de la habilidad del soldador.

Selección adecuada de los parámetros de soldadura es importante para mitigar algunas exageraciones que influyen directamente en la formación de fases duras y quebradizas como son las fases martensíticas netamente, para lo cual es importante controlar las temperaturas de precalentamiento, postcalentamiento que son necesarios para mitigar las gradiente de temperatura elevadas que son atribuidas a las variables no recomendables del proceso SMAW y también por una velocidad de soldadura relativamente baja.

Capacitación del soldador y el entrenamiento es un factor muy importante porque si hablamos de velocidades de enfriamiento la variable que mayor influencia tiene es la capacidad de mantener uniformidad en el avance del cordón de soldadura y si este avance va de acuerdo o compensando el comportamiento de otras variables del proceso de soldadura evitaremos el problema raíz, pero para lograr estos objetivos el soldador debe tener la habilidad entonces es necesario capacitarlos constantemente y hacer muchas repeticiones sobre los mismos materiales y esto se puede contrastar con mayor detalle en un estudio con mayor número de muestras como para obtener estadísticas más convincentes a lo estudiado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.Garcia, A. J. (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

ACEROMAFE. (2024). *Placa A36: propiedades y especificaciones*. Obtenido de Aceros especiales y plásticos especiales: https://www.aceromafe.com/placa-a36-especificaciones/

Alonso, C. (2012). *Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto.* Cano Pina Ceysa.

Caipe Cisneros, J. H. (2020). *Estudio de la soldabilidad de un acero de alta aleacion mediante el proceso SMAW con diferente material de aporte.* Quito.

Criado, A. (2008). *Estructuras Metalograficas de Aleaciones Hierro- Carbono: Aceros al Carbono y Fundiciones.* Madrid: A. Criado Portal, Ed. Obtenido de http://www.antoniocriado.es

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

Esquivias, J. (2018). *Estudio de investigación de los parámetros de operación en el proceso de soldadura gtaw para la recuperación de los Álabes de un impulsor.* Tesis de posgrado, Universidad Nacional De San Agustín De Arequipa, Arequipa. Obtenido de https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/551f6eee-7288-4b44-93d3-60b565e71287/content

Fosca, A. (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

Granjon, H. (1993). *Bases Metalúrgicas de la soldadura.* Paris.

Jeffus, L. (1 de Julio de 2009). *Soldadura. Principios y aplicaciones.* Obtenido de books.google.com.pe: https://books.google.com.pe/books/about/Soldadura_Principios_y_aplicaciones.html?id=rHynAxzh0iEC&redir_esc=y

Lincoln Electric. (2013). *Soldeo manual con electrodos revestidos.* Lincoln Electric. Obtenido de https://www.academia.edu/7303830/Manual_Lincol_Electrodos

Marcos, C. A. (2015). *Manual de prácticas de soldadura.* Bogotá: Ediciones de la U.

Oerlikon. (2008). *Manual de Soldadura & Catálodo de Productos.* Lima: Exsa. Obtenido de https://www.soldaceros.com.pe/wp-content/uploads/2015/09/Manual-de-Soldadura-OERLIKON.pdf

Pastor, M. (2002). *Introducción a la metalurgia de la soldadura.* Riobamba: ESPOCH. Obtenido de https://es.scribd.com/document/374551029/INTRODUCCION-A-LA-METALURGIA-DE-LA-SOLDADURA-DE-M-PASTOR-pdf

Ramos, J. M. (2019). *Influencia del tratamiento termico post soldadura en las propiedades mecanicas de las uniones soldadas gtaw del acero ASTM a335 en la refineria de Talara – 2018.* Huacho.

Society American Welding. (2012). *Manual de soldadura.* Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

Soldexa. (2011). *Manual de Soldadura y Catálodo de Productos.* Oerlikon. Obtenido de https://es.slideshare.net/RonPincu/manual-soldadura-soldexa-15139801

Walteros Larrotta, G. (10 de Abril de 2010). *Manual de Soldadura Und 5 Tipos de Uniones*. Obtenido de es.scribd.com: https://es.scribd.com/doc/29706904/Manual-de-Soldadura-Und-5-Tipos-de-Uniones

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: Influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) del acero ASTM A36 soldado mediante el proceso SMAW.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODO
Problema General ¿Cómo influye la velocidad de enfriamiento en la dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) del acero ASTM A36 soldado mediante el proceso SMAW?	**Objetivo General** Determinar la influencia de la velocidad de enfriamiento en la dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) del acero ASTM A36 soldado mediante el proceso SMAW.	**Hipótesis General** La velocidad de enfriamiento influye significativamente en la dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) del acero ASTM A36 soldado mediante el proceso SMAW.	**Variable Independiente:** Velocidad de enfriamiento. **Dimensiones:** Alta velocidad, velocidad intermedia y baja velocidad de enfriamiento. **Indicador:** °C/s.	**Tipo:** Aplicada. **Nivel:** Explicativo. **Diseño:** Experimental. **Enfoque:** Cuantitativo. **Método:** Experimental y analítico.
Problema Específico 1 ¿Cómo influye la velocidad de enfriamiento en la microestructura de la Zona Afectada por el Calor del acero ASTM A36 soldado mediante SMAW?	**Objetivo Específico 1** Identificar las transformaciones microestructurales producidas en la Zona Afectada por el Calor bajo diferentes velocidades de enfriamiento.	**Hipótesis Específica 1** Las variaciones de la velocidad de enfriamiento modifican la microestructura de la Zona Afectada por el Calor, favoreciendo la formación de martensita, bainita, ferrita o perlita.	**Variable Dependiente:** Microestructura de la ZAC. **Indicadores:** Presencia de martensita, bainita, ferrita y perlita.	Observación metalográfica mediante microscopía óptica.
Problema Específico 2 ¿Cuál es la relación entre la velocidad de enfriamiento y los valores de dureza	**Objetivo Específico 2** Evaluar la dureza obtenida en la Zona	**Hipótesis Específica 2** A mayores velocidades de enfriamiento se obtienen mayores valores de dureza en	**Variable Dependiente:** Dureza de la ZAC. **Indicador:** Dureza Brinell (HB).	Ensayo de dureza Brinell y análisis comparativo de resultados.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODO
obtenidos en la Zona Afectada por el Calor?	Afectada por el Calor bajo diferentes velocidades de enfriamiento.	la Zona Afectada por el Calor del acero ASTM A36.		
Problema Específico 3 ¿Qué comportamiento presenta la dureza de la Zona Afectada por el Calor en función de las transformaciones microestructurales generadas por la velocidad de enfriamiento?	**Objetivo Específico 3** Relacionar los cambios microestructurales con los valores de dureza obtenidos en la Zona Afectada por el Calor.	**Hipótesis Específica 3** Las microestructuras con mayor contenido de martensita presentan mayores valores de dureza, mientras que las estructuras con mayor presencia de ferrita y perlita presentan menores valores de dureza.	Relación entre microestructura y dureza. **Indicadores:** Tipo de fase metalúrgica y valor de dureza HB.	Correlación de resultados metalográficos y ensayos de dureza.

Población: Aceros al carbono.

Muestra: Cinco (05) probetas de acero ASTM A36 soldadas mediante el proceso SMAW.

Técnicas: Observación experimental, ensayo de dureza y análisis metalográfico.

Instrumentos: Ficha de registro de datos, durómetro Brinell, microscopio metalográfico, cronómetro y equipo de soldadura SMAW.

SMAW

Aceros al Carbono y Baja Aleación

OERLIKON

SUPERCITO

Electrodo revestido de tipo básico, de bajo hidrógeno con extraordinarias características mecánicas y de soldabilidad. Presenta un arco muy suave, bajo nivel de salpicaduras y la escoria es de muy fácil remoción. El contenido de hierro en polvo mejora su tasa de depósito. Dentro de su categoría es el producto que presenta los mejores niveles de resistencia a la tracción.

Clasificación	
AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1	E7018

Aprobaciones	Grados
ABS LR GL	3H15, 3Y 3m, 3ym 3Y

Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05	1,00	0,60	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

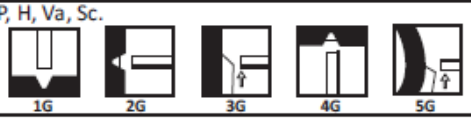
Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2'' [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]
Sin tratamiento	520 – 610 (75 400 – 88 450)	mín. 400 (58 000)	mín.23	[-30 °C (-22 °F)] mín. 70 (57)

Conservación del Producto

- Mantener en un lugar seco y evitar humedad.
- Almacenamiento en horno: 125 - 150°C.
- Resecado de 300°C a 350 °C por 2 horas.

Posiciones de Soldadura

P, H, Va, Sc.



Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo		-	60	90	120	170	210
Amperaje máximo		-	90	140	190	240	280

Aplicaciones

- Para aceros de mediano a alto contenido de carbono, alta resistencia y baja aleación.
- Para aceros de alto contenido de azufre y fácil fresado.
- Para aceros laminados al frío.
- Por sus características de resistencia y su fácil manejo, especialmente adecuado para: Soldaduras de tuberías de vapor, calderas de alta presión, piezas de maquinaria pesada, instalaciones de la industria petrolera, petroquímica y minera.

Nota: El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.

ANSI/AWS D1.1. 2000
Una Norma Nacional Americana

Código para Soldadura Estructural - Acero

Sociedad Americana de Soldadura

4. Calificación

4.0 Alcance

Los requisitos para ensayos de calificación de las especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) y personal de soldadura (WPQ), se describen a continuación :

Parte A-Requisitos Generales. Esta parte cubre los requisitos generales tanto para el WPS, así como para el desempeño del personal de soldadura.

Parte B-Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS). Esta parte cubre la calificación de las especificaciones de un procedimiento de soldadura (WPS), que no está clasificado como precalificado de acuerdo con la Sección 3.

Parte C-Calificación del Desempeño. Esta parte cubre los ensayos de calificación de desempeño requeridos por el código para determinar la capacidad de soldadores, operadores de soldadura ó apuntaladores, para producir soldaduras sanas.

Parte A
Requisitos Generales

4.1 Generalidades

Los requisitos para ensayos de calificación de las especificaciones del procedimiento de soldadura (WPSs) y personal de soldadura, (definidos como soldadores, operadores de soldadura y apuntaladores) se describen en esta sección.

4.1.1 Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS). Excepto para los WPSs precalificados de acuerdo con la Sección 3, un WPS para utilizar en soldadura de producción será calificado de acuerdo con la Sección 4, Parte B y será aprobada por el Ingeniero. Evidencia apropiadamente documentada, de una anterior calificación de WPS puede ser aceptada con la aprobación del Ingeniero. Los requisitos enunciados en el Anexo IV, Tabla IV – I "Requisitos del Código que pueden ser modificados por Ensayos de Calificación de Procedimiento", pueden ser variados cuando el WPS es calificado por ensayos.

4.1.1.1 Responsabilidad de la Calificación. Cada fabricante o contratista conducirá los ensayos requeridos por este Código para calificar el WPS. WPSs. apropiadamente documentados y calificados bajo las consideraciones de este Código, por una Compañía que posteriormente tiene un cambio de nombre, debido a una acción voluntaria o por fusión con una compañía similar, pueden emplear el nuevo nombre sobre estos documentos de WPS.

4.1.1.2 Anterior Calificación de WPS. El Ingeniero puede aceptar evidencia documentada apropiadamente, de una calificación anterior de los WPSs que serán empleados. La aceptabilidad de la calificación por otras normas es responsabilidad del Ingeniero, la cual estará basada sobre la estructura especifica, ó condiciones de servicio ó ambas. Las Series B2.1. XXX-XX de la AWS sobre Norma de Especificaciones de Procedimiento de Soldadura puede, en está manera, ser aceptada para emplearse en este código.

4.1.1.3 Requisitos de Ensayo de Impacto. Cuando lo requiere el diseño ó las especificaciones del Contrato, los ensayos de impacto deben ser incluidos en la calificación del WPS. Los ensayos de impacto, requisitos y procedimientos será conforme con lo estipulado en el Anexo III ó tal como es especificado en los documentos del contrato.

4.1.2 Calificación del Desempeño del Personal de Soldadura. Los soldadores, operadores de soldadura y apuntaladores a ser empleados bajo este código y que utilicen los procesos Soldadura por Arco Metálico Protegido (SMAW), Soldadura por Arco Sumergido (SAW) , Soldadura por Arco y Gas de Protección (GMAW), Soldadura por Arco con Electrodo de Tungsteno y Gas de Protección (GTAW), Soldadura por Arco con Electrodo con Núcleo de Fundente (FCAW), Soldadura por Electroescoria (ESW), ó Soldadura por Electrogas (EGW), serán calificados por los ensayos aplicables, tal como son descritos en la Parte C de esta sección. Ver comentarios.

4.1.2.1 Anterior Calificación del Desempeño. La evidencia, apropiadamente documentada, de anterior calificación del desempeño de soldadores, operadores de soldadura y apuntaladores, puede ser aceptada con la aprobación del Ingeniero. La aceptación de la Calificación del Desempeño por otras normas, es responsabilidad del Ingeniero, la cual estará basada sobre la estructura especifica, ó condiciones del servicio ó ambas. Los soldadores y operadores de soldadura calificados según ensayo de la Norma AWS B2.1, "Norma para Procedimiento de Soldadura y Calificación

del Desempeño", puede, de esta manera, ser aceptado para emplearse en este código.

4.1.2.2 Responsabilidad de la Calificación. Tanto el fabricante como el contratista será responsable por la calificación de los soldadores, operadores de soldadura y apuntaladores, sin embargo la calificación es conducida por el fabricante, contratista ó una entidad independiente en ensayos.

4.1.3 Periodo de Vigencia

4.1.3.1 Soldadores y Operadores de Soldadura. La calificación de soldadores u operadores de soldadura como se especifica en este código será considerado como permanente ó indefinida a menos que (1)El soldador no este trabajando en un proceso dado de soldadura, para el cual el soldador u operador de soldadura este calificado, por un periodo mayor a seis meses ó a menos que (2) halla alguna razón especifica para cuestionar la capacidad del soldador u operador de soldadura (Ver 4.32.1).

4.1.3.2 Apuntaladores. Un apuntalador que apruebe el ensayo descrito en la Parte C, ó aquellos ensayos requeridos para calificación de soldador serán considerados elegibles para realizar punto de soldadura indefinidamente, en la posición y con el proceso para el cual el apuntalador es calificado, a menos que haya una razón especifica para cuestionar la capacidad del apuntalador (Ver 4.32.2).

4.2 Requisitos Comunes para la Calificación del WPS y del Desempeño del Personal de Soldadura

4.2.1 Calificación por Ediciones Anteriores. Las calificaciones que fueron desarrolladas y que reúnan los requisitos de ediciones anteriores de ANSI/AWS D1.1 ó AWS D2.0, cuando estas ediciones estaban en vigencia, son validas y pueden ser utilizadas. No es aceptable el uso de una edición anterior para nuevas calificaciones en lugar de la edición actual, a menos que la edición anterior especifica, es un requisito contractual.

4.2.2 Tratamiento Térmico de Envejecimiento. Cuando es permitido por la especificación del metal de aporte aplicable al metal de soldadura que está siendo ensayado, muestras completamente soldadas para ensayo de calificación, pueden ser envejecidos entre 200 °F a 220 °F (95 °C a 105 °C)x 48 horas ± 2 horas.

4.2.3 Registros. Los registros de los resultados de los ensayos, deben ser archivados por el fabricante ó contratista y deben estar a disposición de personas autorizadas para su revisión.

4.2.4 Posiciones de las Soldaduras. Todas las soldaduras deben estar clasificadas como Plana (F), Horizontal (H), Vertical (V) y sobrecabeza (OH), de acuerdo con lo mostrado en las Figuras 4.1 y 4.2.
Las posiciones de ensambles se muestra en:
(1) Figura 4.3 (Soldadura de ranura en plancha)
(2) Figura 4.4 (Soldadura de ranura en tubería ó entubado)
(3) Figura 4.5 (Soldadura de filete en plancha)
(4) Figura 4.6 (Soldadura de filete en tubería ó entubado)

Parte B
Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

4.3 Posiciones calificadas en Soldadura de Producción

Las posiciones para soldadura de producción calificadas por un WPS, serán conforme a los requisitos de la Tabla 4.1.

4.4 Tipos de Ensayo de Calificación

El tipo y número de ensayos requeridos para la calificación del WPS para un espesor dado, diámetro ó ambos, será conforme a la Tabla 4.2 (CJP),Tabla 4.3 (PJP) ó Tabla 4.4 (Filete). Detalles Sobre los requisitos individuales de ensayos NDT y Ensayos Mecánicos son establecidos en las siguientes subsecciones:
(1) Inspección Visual (Ver 4.8.1)
(2) No Destructivo (Ver 4.8.2)
(3) Doblez de cara, raíz y lado (Ver 4.8.3.1)
(4) Sección reducida (Ver 4.8.3.4)
(5) Tensión de todo el metal de soldadura (Ver 4.8.3.6)
(6) Macroataque (Ver 4.8.4)

4.5 Calificación de los Tipos de Soldadura para Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

Para el propósito de calificación del WPS, los tipos de soldadura serán clasificados como siguen:
(1) Soldaduras de ranura en junta de penetración completa (CJP) para conexiones no tubulares (ver 4.9).
(2) Soldaduras de ranura en junta de penetración parcial (PJP) para conexiones no tubulares (ver 4.10).
(3) Soldaduras de Filete para conexiones tubulares y no tubulares (ver 4.11).

(4) Soldaduras de ranura CJP para conexiones tubulares (ver 4.12).
(5) Soldaduras de ranura PJP para conexiones tubulares en T, Y y K; y juntas a Tope (ver 4.13).
(6) Soldaduras de tapón y ranura alargada para conexiones tubulares y no tubulares (ver 4.14).

4.6 Preparación de la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

El fabricante ó contratista debe preparar un WPS por escrito, que especifique todas las variables esenciales referenciadas en 4.7. Los valores especificados para estas variables de WPS deberán ser obtenidos del registro de calificación del procedimiento, PQR, el cual sirve como confirmación escrita de excelentes calificaciones del WPS.

4.7 Variables Esenciales

4.7.1 SMAW, SAW, GMAW, GTAW y FCAW. Cambios más allá de las limitaciones de las variables esenciales del PQR para los procesos SMAW, SAW, GMAW, GTAW y FCAW mostrados en la Tabla 4.5 requieren recalificación del WPS.

4.7.2 Soldadura con Electroescoria y Electrogas. Ver Tabla 4.6 para los cambios de variable esencial del PQR que requieren una recalificación del WPS para los procesos EGW y ESW.

4.7.3 Calificación del Metal Base. Los metales base listados en la Tabla 3.1 que estén sujetos a ensayos de calificación en el WPS, deben calificar otros grupos de metal base de acuerdo a la Tabla 4.7. Los metales base que no estén listados en la Tabla 3.1 ó en el Anexo M deberán ser calificados en concordancia con la Sección 4 y tiene que ser aprobada por el Ingeniero.
Los WPS con aceros listados en el Anexo M, deberán además calificar los aceros de la Tabla 3.1 ó aceros del Anexo M, de conformidad con la Tabla 4.7. El Anexo M contiene recomendaciones para metal de aporte con resistencias iguales y temperaturas mínimas de calentamiento y de entre pases, para aceros ASTM A514, A517, A709 grado 100 y 100W, ASTM A710 grado A (clases 1 y 3) y ASTM A875 Grado 60 y 65.
Las menores temperaturas de precalentamiento y entre pases requeridos en la Tabla 3.2 ó calculadas por el Anexo XI, serán calificadas por ensayos aprobados por el Ingeniero.

4.8 Métodos de Ensayo y Criterio de Aceptación para la Calificación del (WPS)

Los ensayos de montajes soldados conforme a 4.8.2, tendrán muestras preparadas por corte de las plancha, tubería o entubado ensayados, tal como se muestra en las Figuras 4.7 hasta 4.11, cualquiera sea aplicable. Las muestras serán preparadas para su ensayo, de acuerdo con las Figuras 4.12, 4.13, 4.14, y 4.18, según sea aplicable.

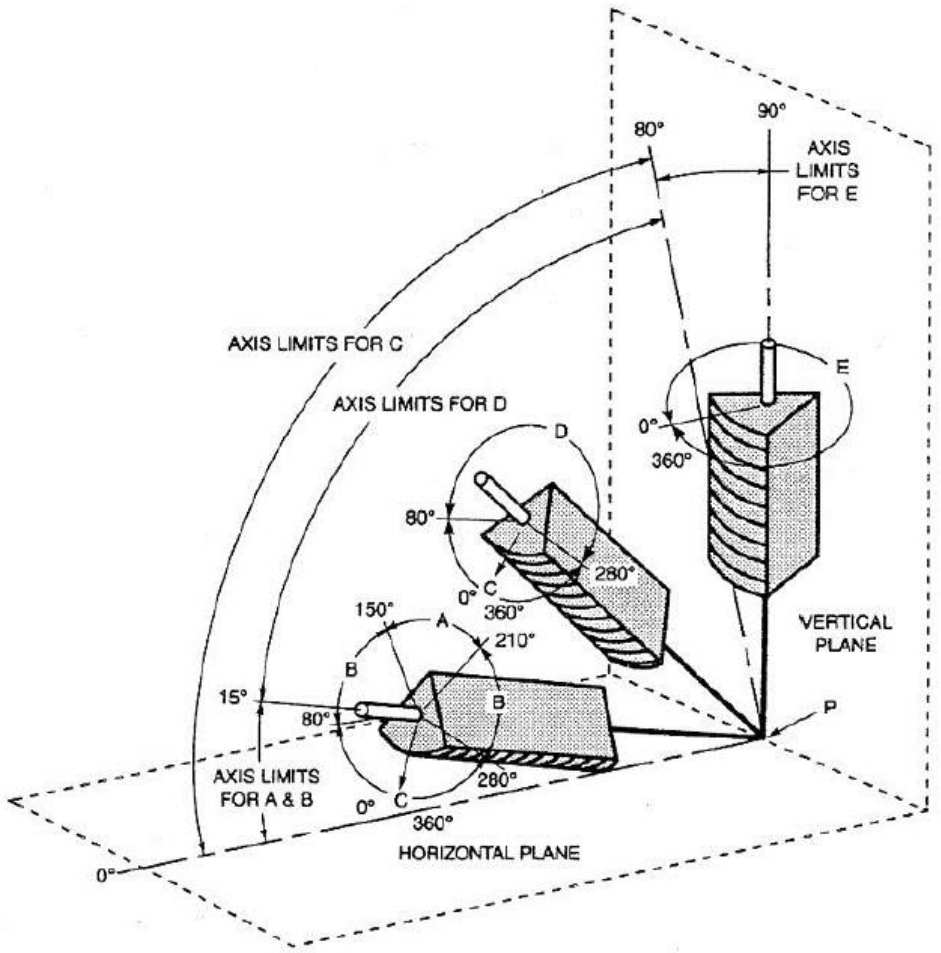
4.8.1 Inspección Visual. Para una calificación aceptable, las soldaduras deben satisfacer los siguientes requisitos :
(1) La soldadura debe estar libre de grietas.
(2) Todos los cráteres deben estar llenos completamente en la sección transversal de la soldadura.
(3) La cara de la soldadura debe estar llena hasta el borde de la superficie del metal base y la soldadura se debe fundir lentamente con el metal base. El socavado no debe exceder de 1/32 Pulg. (1 mm). El refuerzo de la soldadura no deberá exceder de 1/8 Pulg. (3mm).
(4) La raíz de la soldadura debe ser inspeccionada y no debe tener evidencia de grietas, fusión incompleta o penetración inadecuada de la junta. Se permite una raíz de superficie cóncava dentro de los límites descritos presentados abajo, de tal manera que el espesor total de la soldadura sea igual o mayor que el del metal base.
(5) La máxima concavidad de la superficie de la raíz debe ser de 1/16 Pulg. (1.6mm) y el máximo sobre espesor debe ser 1/8.(3mm). Para uniones tubulares en T, Y y K el sobre espesor de la raíz , se considera adecuado y no deberá ser causa de rechazo.

4.8.2 Ensayo No Destructivo. Antes de preparar las probetas para ensayo mecánico, la calificación de ensayo en plancha, tubería ó entubado, deben ser examinadas mediante ensayos no destructivos para verificar la sanidad de la soldadura, así como siguen:

4.8.2.1 RT ó UT. Cualquiera de los dos ensayos, radiográfico (RT) ó ultrasónico (UT), deben ser utilizados. La longitud total de la soldadura en las planchas de ensayo, excepto las longitudes de descarte ubicadas en los extremos, estas deben ser examinadas de acuerdo con la Sección 6 parte E ó F. Para tubulares, la circunferencia total de la soldadura acabada, debe ser examinada de acuerdo con la Sección 6 parte C.

4.8.2.2 Criterios de Aceptación en RT ó UT. Para una calificación aceptable, la soldadura que es revelada por ensayo radiográfico ó ultrasónico, debe estar conforme a los requisitos de la Sección 6 parte C.

4.8.3 Ensayo Mecánico. El ensayo mecánico debe ser como sigue :



Notes:
1. The horizontal reference plane is always taken to lie below the weld under consideration.
2. The inclination of axis is measured from the horizontal reference plane toward the vertical reference plane.
3. The angle of rotation of the face is determined by a line perpendicular to the theoretical face of the weld which passes through the axis of the weld. The reference position (0°) of rotation of the face invariably points in the direction opposite to that in which the axis angle increases. When looking at point P, the angle of rotation of the face of the weld is measured in a clockwise direction from the reference position (0°).

Figure 4.1—Positions of Groove Welds (see 4.2.4)

Tabulación de Posiciones de Soldaduras de Ranura			
Posición	Diagrama de Referencia	Inclinación del Eje	Rotación de Cara
Plana	A	0° a 15°	150° a 210°
Horizontal	B	0° a 15°	80° a 150° 210° a 280°
Sobrecabeza	C	0° a 80°	0° a 80° 280° a 360°
Vertical	D E	15° a 80° 80° a 90°	80° a 280° 0° a 360°

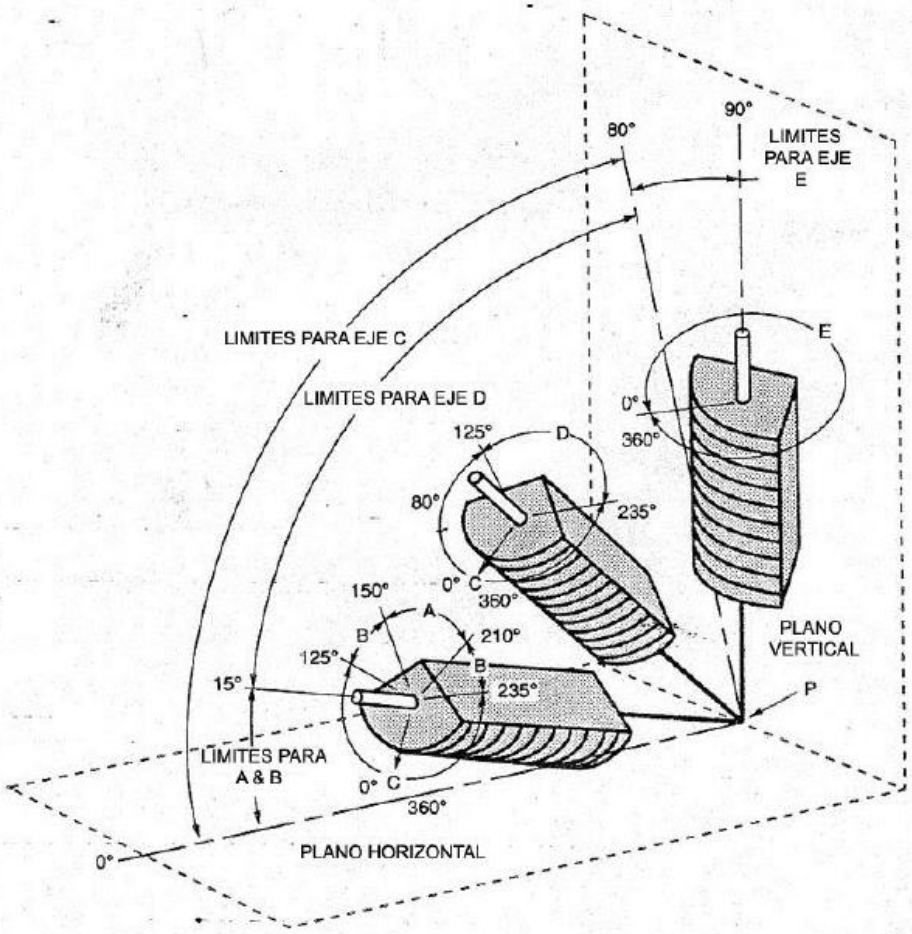


Figura 4.2- Posiciones de Soldaduras de Filete (ver 4.2.4)

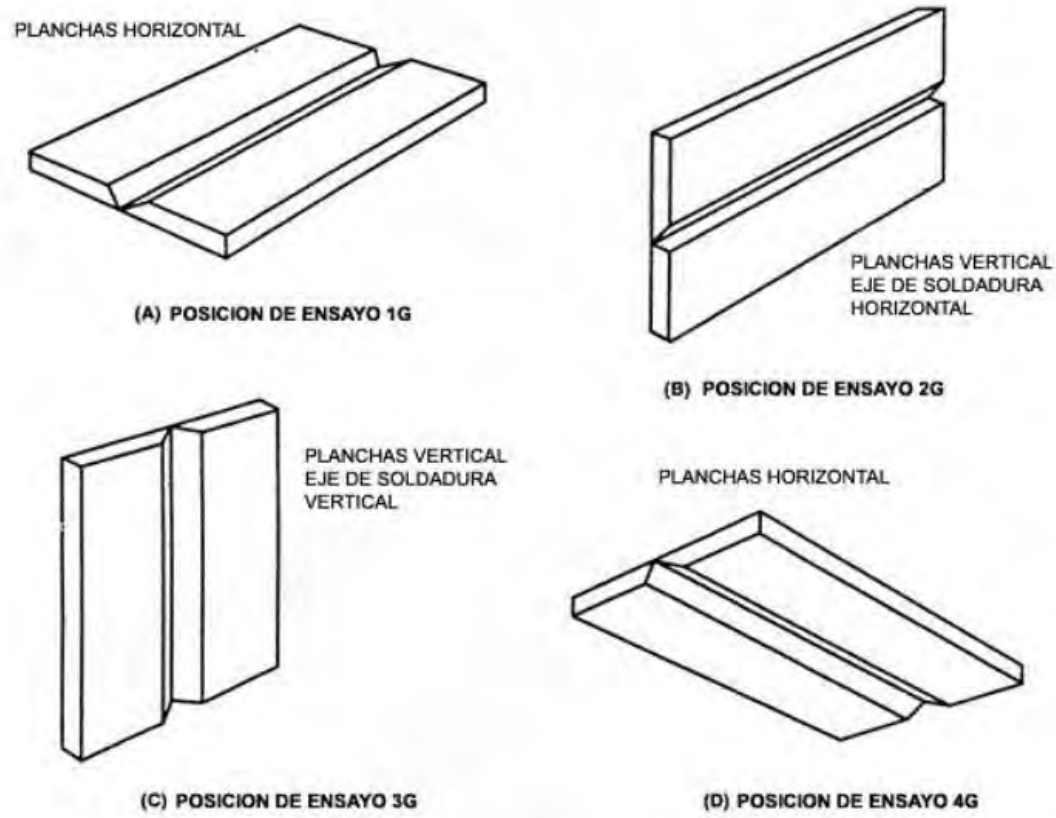


Figura 4.3--- Posiciones de Planchas de Ensayo para Soldadura de Ranura (ver 4.2.4)

4.8.3.1 Muestras para Doblez de Raiz, Cara y Lado. (Ver Figura 4.12 para doblez de raíz y cara, Figura 4.13 para doblez de lado). Cada muestra deberá ser doblada en un dispositivo de doblez guiado que reúna los requisitos mostrados en las figuras 4.15 a 4.17, ó estar sustancialmente en concordancia con estas figuras, teniendo en cuenta que el radio de doblez máximo no es excedido. Cualquier medio conveniente puede ser utilizado para desplazar el embolo con relación al elemento estático.

La muestra debe ser colocada sobre el miembro fijo del dispositivo, con la soldadura en el centro. Las muestras para doblez de cara deben ser colocadas con la cara de la soldadura directamente hacia la abertura.

Las muestras para doblez de raíz y de resistencia en soldadura de filete , deben ser colocadas con la raíz de la soldadura dirigida hacia la abertura. Las muestras para doblez de lado deben ser colocadas por el lado que presenta mayor discontinuidad, orientadas directamente hacia la abertura.

El macho debe forzar la muestra dentro del dispositivo estático, hasta que la probeta comience a tomar la forma de una U. La soldadura y la Zona Afectada por el Calor, deben estar centradas y completamente dentro de la parte doblada de la muestra después del ensayo. Cuando se utilice la guía de doblado, la muestra debe estar sujeta firmemente en uno de sus extremos, de tal manera que no se deslice durante la operación de doblez. Después del ensayo, la soldadura y la Zona Afectada por el Calor deben estar completamente en la parte doblada de la muestra . Las muestras ensayadas deben retirarse de la guía cuando el rodillo externo ha sido movido 180° desde el punto de arranque.

4.8.3.2 Muestras para Doblez Longitudinal. Cuando la combinación de materiales difiere

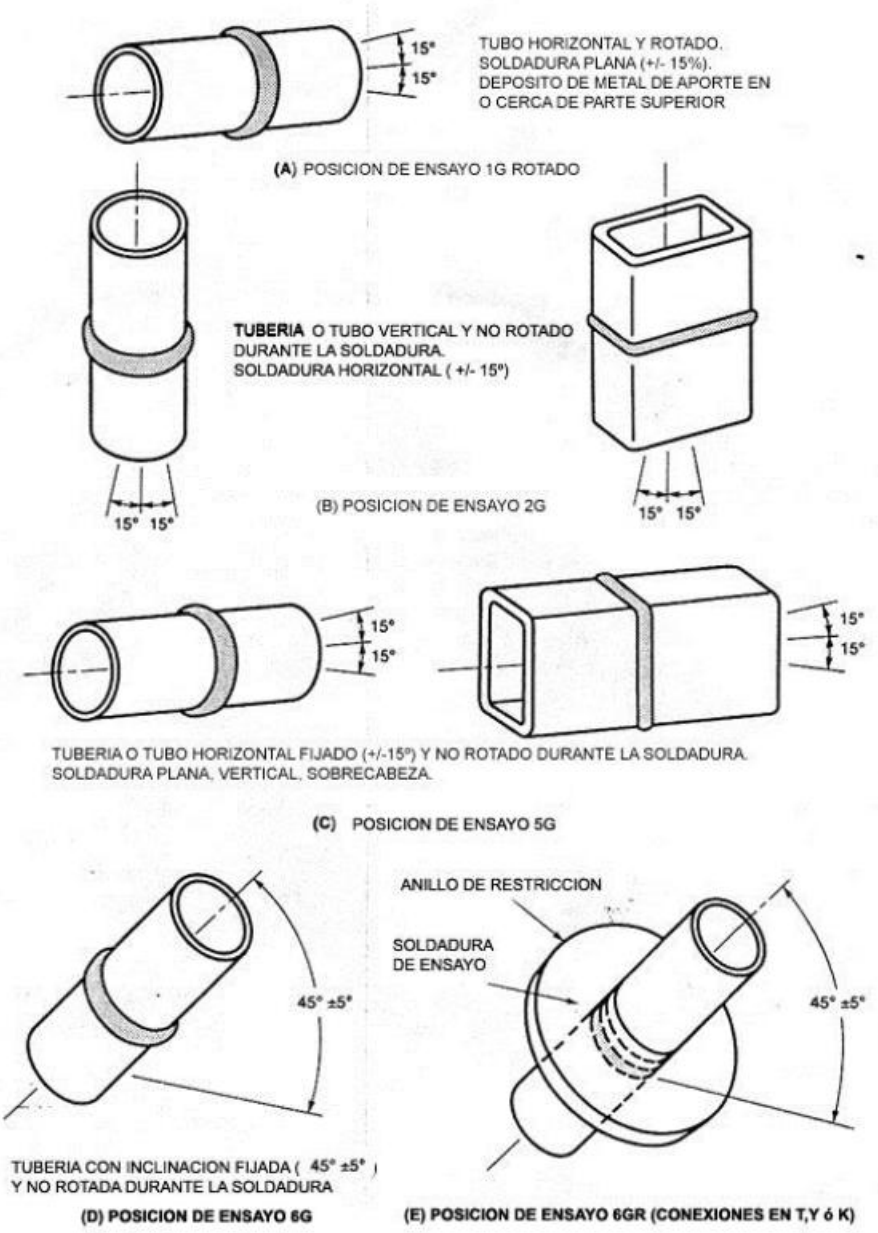


Figura 4.4-Posiciones de Tubo o Entubado de Ensayo para Soldaduras de Ranuras (ver 4.2.4)

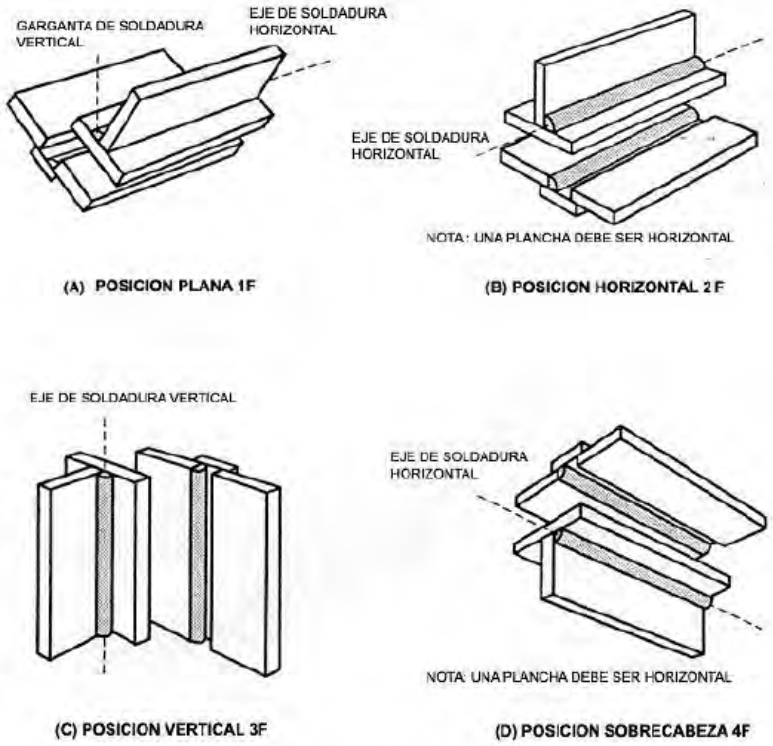


Figura 4.5 -Posiciones de Plancha de Ensayo para Soldaduras de Filete (ver 4.2.4)

marcadamente en las propiedades mecánicas de doblez, como entre dos materiales base ó entre el metal de soldadura y el metal base, los ensayos de dobles longitudinal (cara y raíz) pueden ser usados en lugar de los ensayos de doblez transversal de cara y raíz . Los ensayos de montajes soldados conforme a 4.8.2 deben tener muestras preparadas por corte de la plancha de ensayo, tal como se muestra en la Figura 4.10 ó 4.11, la que sea aplicable. Las muestras para el doblez longitudinal deben ser preparadas para el ensayo, tal como se muestran en la Figura 4.12.

4.8.3.3 Criterios de Aceptación para Ensayos de Doblez. La superficie convexa de las muestras para ensayo de doblez deberán ser inspeccionada visualmente para verificar discontinuidades superficiales. Para su aceptación, la superficie no debe tener discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones :

(1) 1/8 Pulg. (3mm) medida en cualquier dirección sobre la superficie.
(2) 3/8 Pulg. (10mm). La suma de las mayores dimensiones de todas las discontinuidades que excedan en 1/32 Pulg. (1mm), pero menores ó igual a 1/8 Pulg. (3mm)
(3) 1/4 Pulg. (6mm) - la máxima dimensión de la grieta en el borde, excepto cuando dicha grita sea el resultado de una visible inclusión de escoria u otros tipos de discontinuidades por fusión, entonces solo se permite 1/8 Pulg. (3mm) como máximo.

Las muestras con grietas en el borde que exceden ¼ Pulg. (6mm) con evidencia de que no hay inclusiones de escoria u otras discontinuidades por falta de fusión, deben ser descartadas y reemplazadas por otras de la misma junta soldada.

4.8.3.4 Muestras de Sección Reducida para Tensión. (Ver figura 4.14). Antes del ensayo, el menor

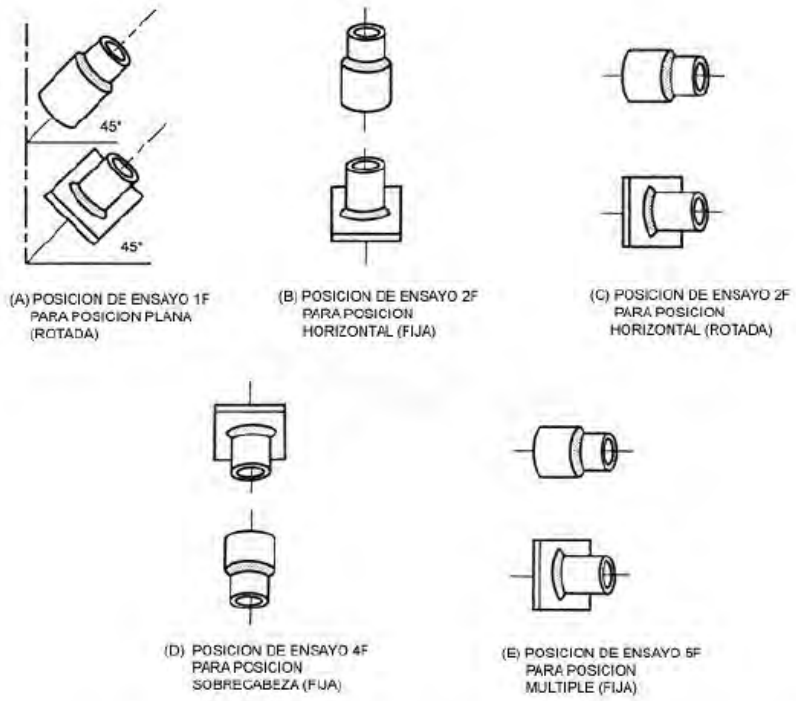


Figura 4.6-Posiciones de Tubos o Entubados de Ensayos para Soldaduras de Filete (ver 4.2.4)

ancho y espesor correspondiente a la sección reducida debe ser medido. La muestra debe ser rota bajo carga de tensión y la máxima carga debe ser determinada. La sección de área transversal debe ser obtenida multiplicando el ancho por el espesor. El esfuerzo de tensión debe ser obtenido de dividir la máxima carga por el área de la sección transversal.

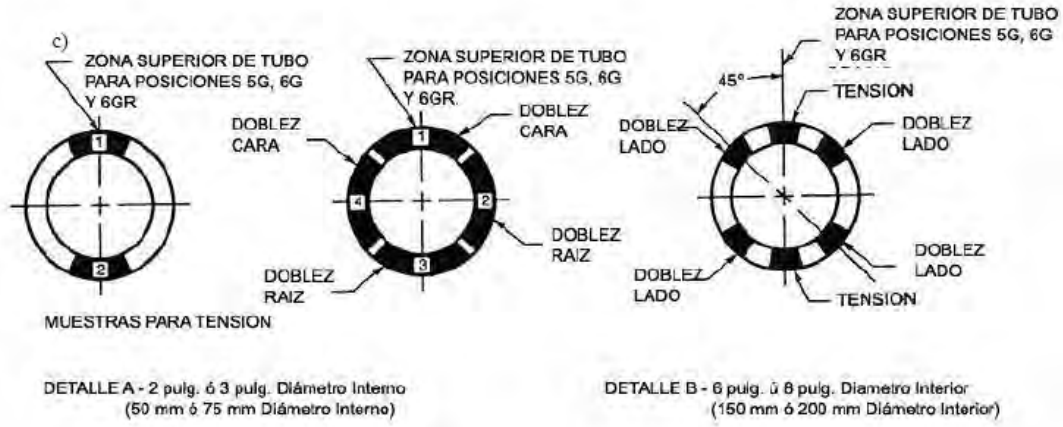
4.8.3.5 Criterio de Aceptación para Ensayo de Tensión por Sección Reducida. El esfuerzo de tensión no debe ser menor que el mínimo de rango de esfuerzo especificado para el metal base utilizado.

4.8.3.6 Muestra para Tensión en todo Metal de Soldadura. (Ver Figura 4.18). La probeta de ensayo debe ser ensayada de acuerdo con ASTM A370 (*Ensayos Mecánicos para Productos de Acero*).

4.8.4 Ensayo de Macroataque. La soldadura de las muestras para ensayo, deben ser preparadas con un acabado adecuado para examen por macroataque. Una solución apropiada debe ser utilizada para el ataque y así obtener una definición clara de la soldadura.

4.8.4.1 Criterios de Aceptación para el Ensayo de Macroataque. Para una calificación aceptable, la muestra ensayada, cuando es inspeccionada visualmente, debe estar conforme a los siguientes requisitos :

(1) Soldaduras de ranura en Juntas de Penetración Parcial; el tamaño real de soldadura debe ser igual ó mayor que el tamaño de soldadura especificado (E).
(2) La soldadura en filete debe tener fusión en la raíz de la junta, pero no necesariamente más allá.
(3) El tamaño mínimo de la pierna debe cumplir con el tamaño de soldadura de filete especificado.
(4) Las soldaduras de ranura en juntas de penetración parcial y soldaduras de filete, deben cumplir con lo siguiente:
    a) No presentar grietas.
    b) Fusión continua entre cordones adyacentes de metal de soldadura y entre metal base y metal de soldadura.



NOTA: DUPLICADO DE ENSAYO EN TUBERIA O TUBOS O TUBERIA DE TAMAÑO GRANDE EN OBRA PUEDEN SER REQUERIDOS CUANDO EL ENSAYO DE IMPACTO ES ESPECIFICADO EN EL CONTRATO O EN LAS ESPECIFICACIONES.

Figura 4.7 - Ubicaciones de las Muestras de Ensayo sobre Tubo de Ensayo Soldado

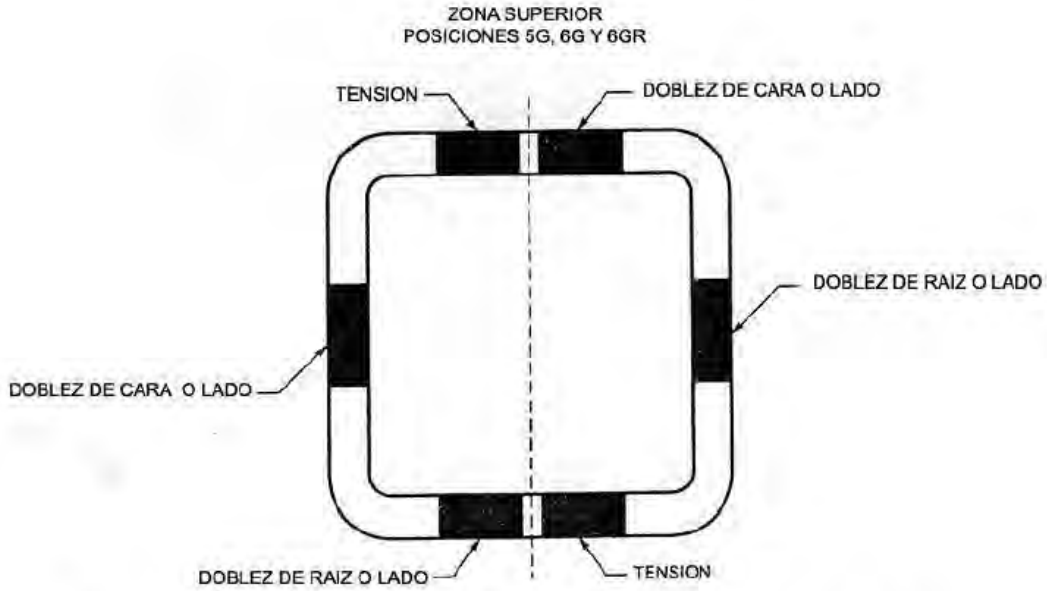
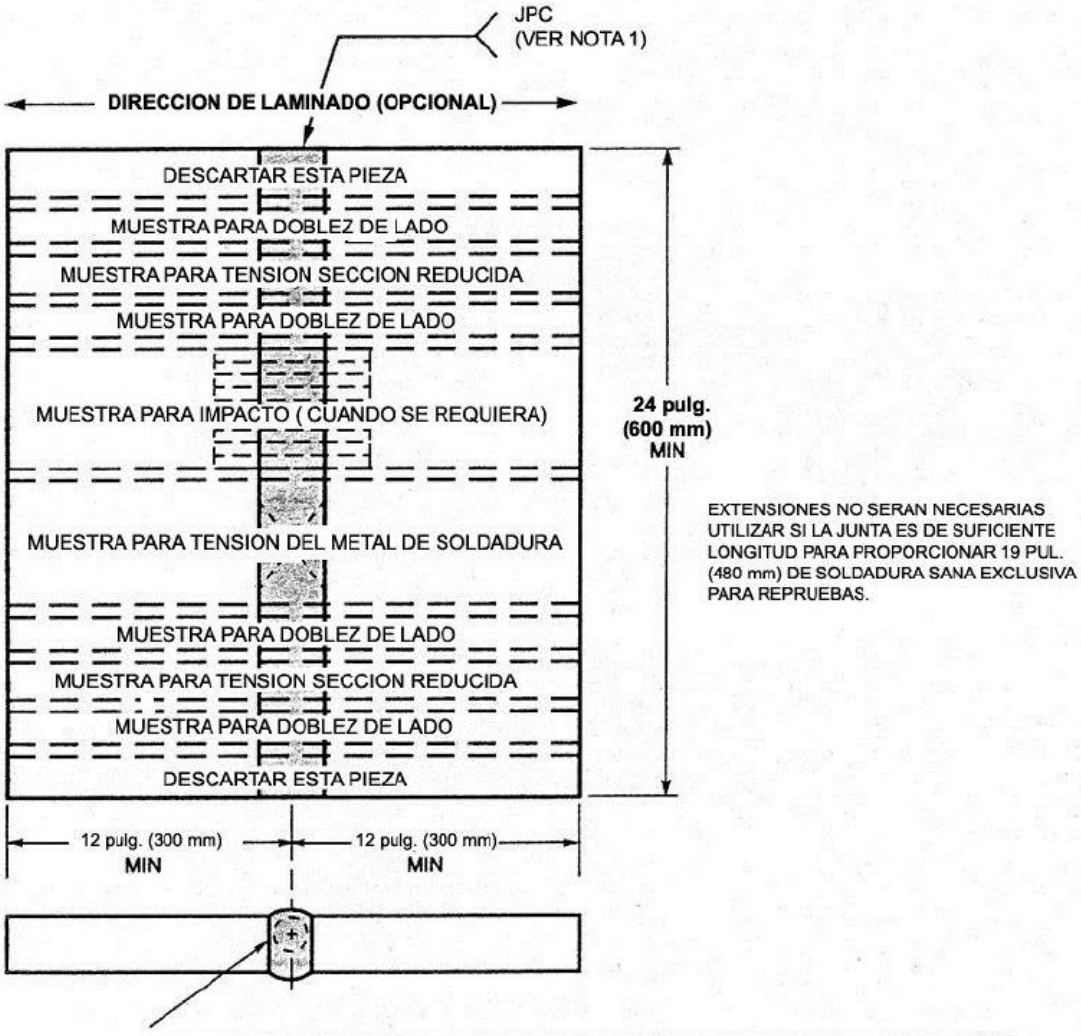


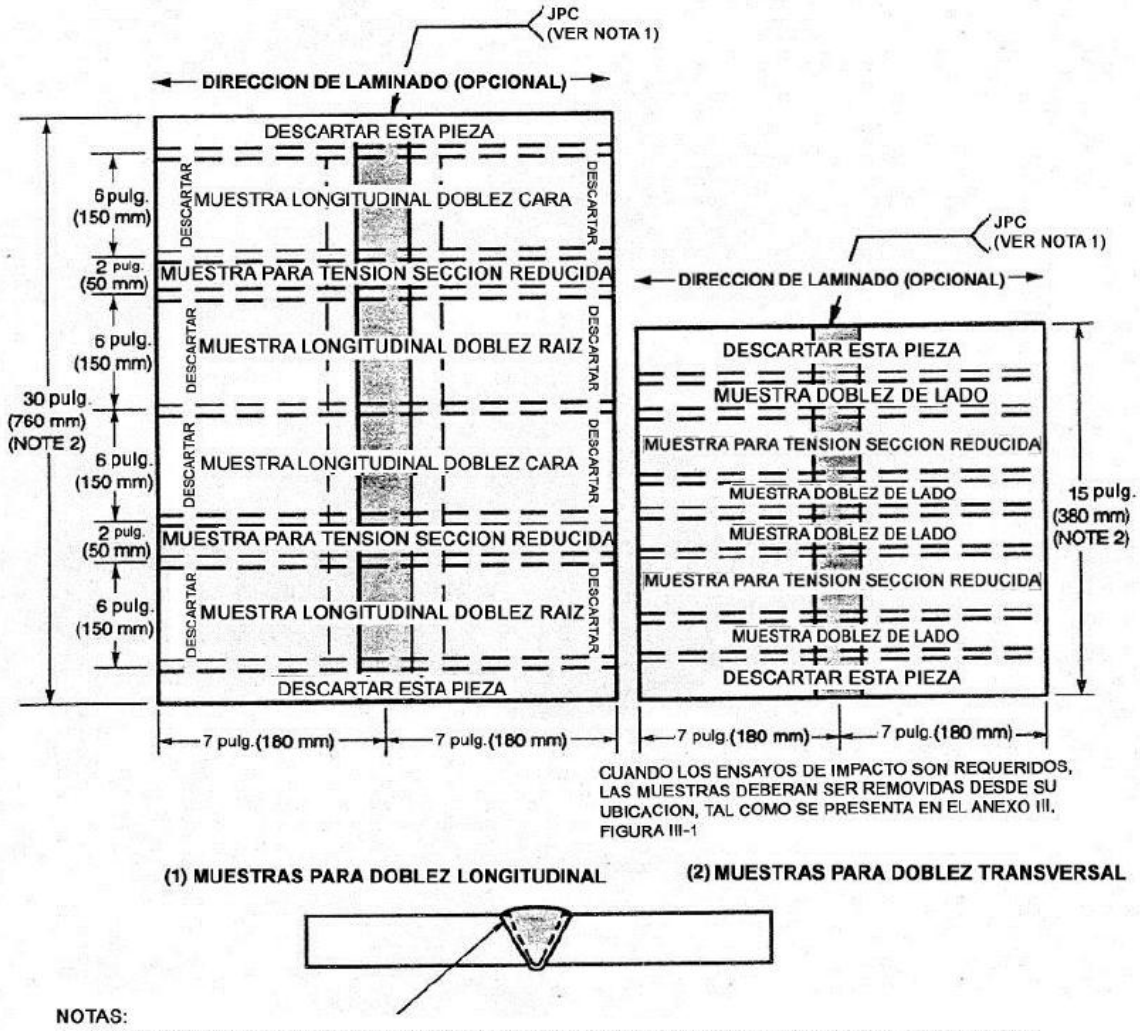
Figura 4.8 - Ubicación de las Muestras de Ensayo en Ductos de Sección Rectangular (ver 4.8)



NOTAS:

1. La configuración de la ranura presente es solamente para ilustración. La forma de ranura ensayada será conforme a la forma de ranura de producción que está siendo calificada.
2. Cuando las muestras para impacto son requeridas, ver anexo iii para requerimientos.

Figura 4.9 - Ubicación de Muestras de Ensayo sobre Planchas Soldadas - Soldadura por Electroescoria y Electrogas - Calificación de WPS (ver 4.8)



NOTAS:

1. LA CONFIGURACION DE RANURA PRESENTADA ES SOLAMENTE PARA ILUSTRACION. LA FORMA DE RANURA ENSAYADA SERA CONFORME A LA FORMA DE RANURA DE PRODUCCION QUE ESTA SIENDO CALIFICADA.
2. GRANDES PLANCHAS DE ENSAYO PUEDEN SER REQUERIDAS CUANDO SE EXIJA PRUEBA DE IMPACTO SOLICITADAS EN LOS DOCUMENTOS DE CONTRATO O EN LAS ESPECIFICACIONES. LAS MUESTRAS DE IMPACTO DEBERAN SER REMOVIDAS DESDE LA MITAD DE LA SOLDADURA A ENSAYAR.
3. TODAS LAS DIMENSIONES SON MINIMAS

Figura 4.10-Ubicación de muestras sobre planchas soldadas para ensayo mayor a 3/8 pulg. (10mm) de Espesor -Calificación de WPS (ver 4.8)

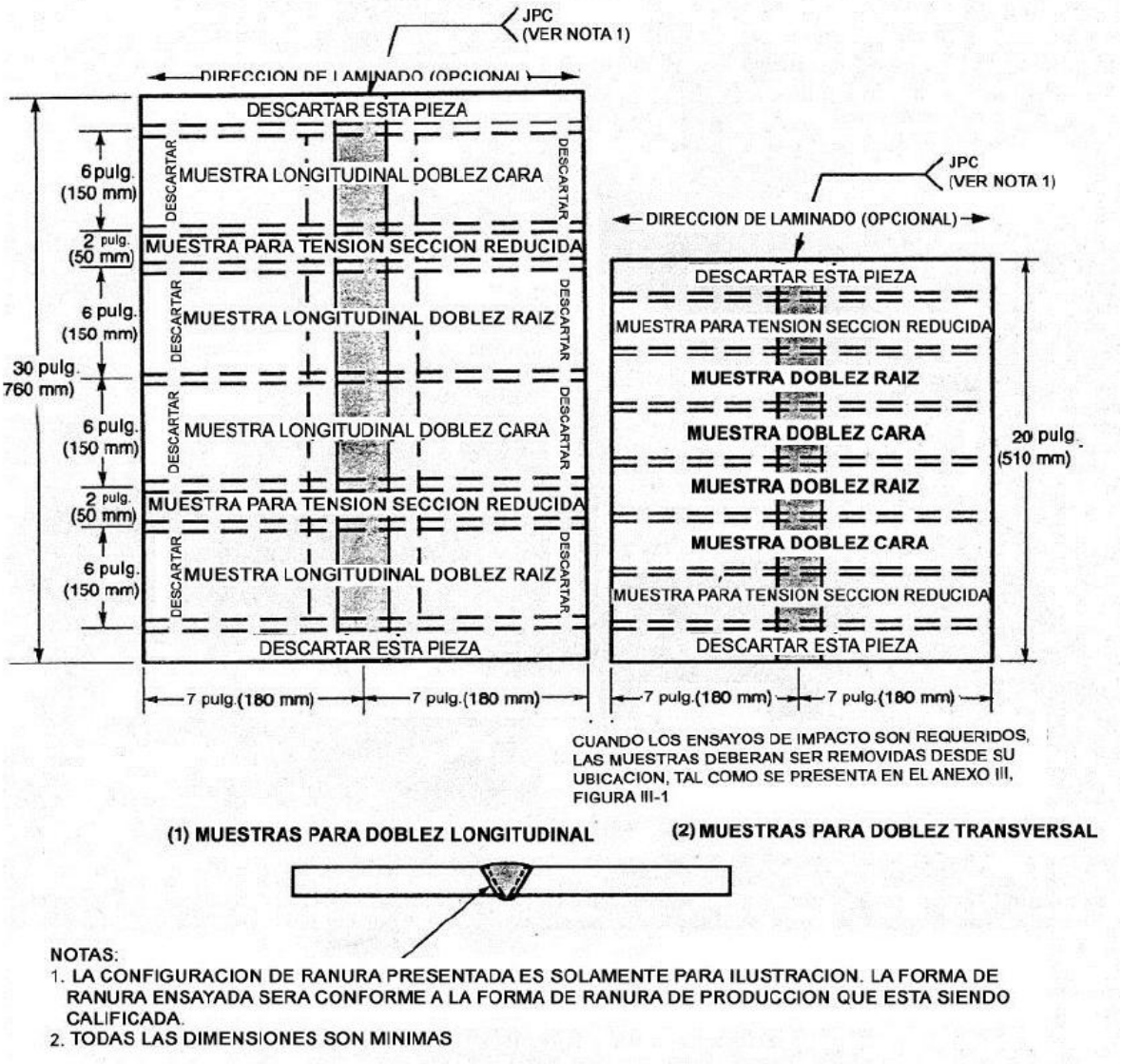
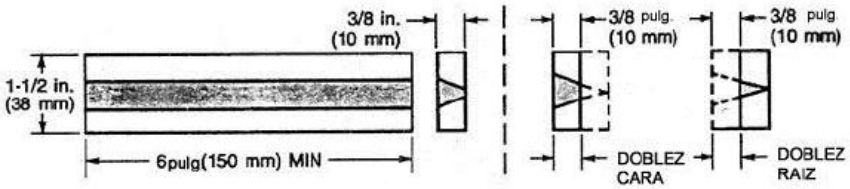


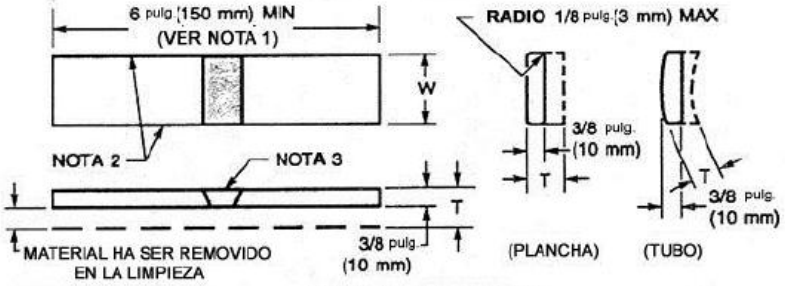
Figura 4.10-Ubicación de muestras sobre planchas soldadas para ensayo 3/8 pulg. (10mm) de Espesor y menor -Calificación de WPS (ver 4.8)



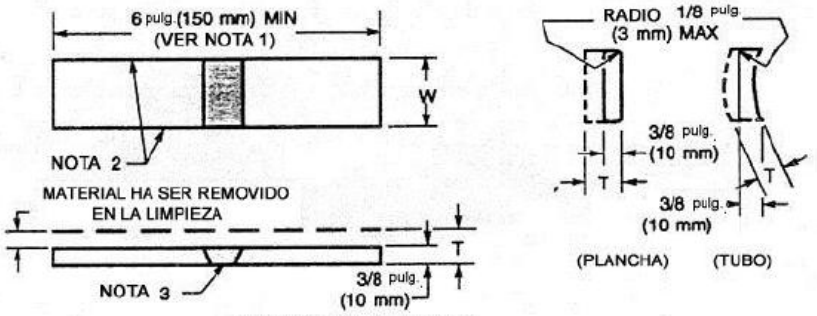
PLANCHA DE ENSAYO 3/8 PULG. (10 mm)

PLANCHA DE ENSAYO MAYOR DE 3/8 pulg. (10 mm) ESPESOR

(1) MUESTRA PARA DOBLEZ LONGITUDINAL



MUESTRA DOBLEZ DE CARA



MUESTRA DOBLEZ DE RAIZ

(2) MUESTRA PARA DOBLEZ TRANSVERSAL

Dimensiones	
	Ancho de muestra de Ensayo, W
Soldadura de Ensayo	pulg. (mm)
Plancha	1-1/2 (40)
Tuberia o tubo de Ensayo ≤ 4 in. (100 mm) en diámetro	1 (25)
Tuberia o tubo de Ensayo > 4 in. (100 mm) en diámetro	1-1/2 (40)

Notas

1. Una muestra de mayor longitud puede ser necesaria cuando se este utilizando un equipo tipo dobladora o cuando el acero a ensayar tenga un punto de fluencia de 90 ksi (620 MPa) ó más.
2. Estas bordes pueden ser cortados termicamente y pueden o no ser maquinados.
3. El refuerzo de la soldadura y el respaldo , si hubieran deberan ser removidos al ras de la superficie de la muestra (ver 5.24.4.1 y 5.24.4.2). Si un respaldo rebajado es es utilizado, esta superficie puede ser maquinada a una profundidad que no exceda la profundidad del rebaje al remover el respaldo;en aquel caso, el espesor final de la muetra será aquel especificado arriba. El corte de la superficies deben ser lisos y paralelos.
4. T = espesor de plancha o tuberia.
5. Cuando el espesor de la plancha de ensayo es menor que 3/8 pulg. (10 mm), utilice el espesor nominal para doblez de cara y de raíz

Figura 4.12- Muestras para Doblez de Cara y Raíz (ver 4.8.3.1)

Especificaciones de material de aporte según AWS-ASTM

Código AWS-ASTM	Material de aporte
A5. l	Electrodos para soldadura de arco, de acero blando recubierto
A5.2	Varillas de soldadura de hierro y acero para soldar a gas
A5.3	Electrodos de aluminio y aleaciones de aluminio para soldadura de arco
A5.4	Electrodos de acero al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión y recubiertos
A5.5	Electrodos para soldadura de arco, de acero con bajo contenido de aleación, recubiertos
A5.6	Electrodos de cobre y aleaciones de cobre para soldadura de arco
A5.7	Electrodos de cobre y aleaciones de cobre para soldar
A5.8	Metal de aporte para soldadura fuerte
A5.9	Varillas de soldadura y electrodos desnudos de acero al cromo y al cromo-níquel, resistente a la corrosión
A5.10	Varillas de soldadura y electrodos desnudos de aluminio, y aleaciones de aluminio
A5.11	Electrodos de soldadura de níquel y aleaciones de níquel, recubiertos
A5.13	Varillas de soldadura y electrodos para recubrimientos superficiales

A5.14	Varillas desnudas de soldadura y electrodos- desnudos de níquel y aleaciones de níquel
A5.15	Varillas de soldadura y electrodos recubiertos para soldar hierro fundido
A5.16	Varillas desnudas de soldadura y electrodos desnudos de titanio y aleaciones de titanio
A5.17	Electrodos desnudos de acero blando, y fundentes para soldadura de arco sumergido
A5.18	Electrodos de acero blando para soldadura de arco metálico con gas
A5.19	Varillas de soldadura y electrodos desnudos de aleaciones de magnesio
A5.20	Electrodos de acero blando para soldadura de arco, con núcleo de fundente
A5.21	Varillas de soldadura y electrodos compuestos para recubrimientos superficiales