

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 SOLDABILIDAD
DEL ACERO AISI 4140 POR EL PROCESO SMAW

PRESENTADO POR:

BR. ELIAZAR DELGADO COLLANTES.

BR. DIEGO ABEL VARGAS JULON.

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALÚRGICO

ASESOR:

ING. LEONARDO AVILÉS HINOJOSA

CUSCO – PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

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

El que suscribe, el Asesor LEONARDO AVILES HINOJOSA
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD
DE ENFRIAMIENTO EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO
AISI 4140 POR EL PROCESO SMAW

Presentado por: ELIAZAR DELGADO COLLANTES DNI N° 70486485 ;
presentado por: DIEGO ABEL VARGAS JUON DNI N°: 48207509
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 0.6 %.

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.	<u>X</u>
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, 30 de SEPTIEMBRE de 2025


Firma

Post firma LEONARDO AVILES HINOJOSA

Nro. de DNI 23984933

ORCID del Asesor 0000-0002-1851-9172

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:506003807

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA SOLDABILIDAD set.docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:506003307

191 páginas

Fecha de entrega

30 sep 2025, 7:32 p.m. GMT-5

29.360 palabras

162.392 caracteres

Fecha de descarga

30 sep 2025, 7:38 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA SOLDABILIDAD set.docx

Tamaño del archivo

10.2 MB

6% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Fuentes principales

- 5%  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

Estimado Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas e Ingeniería Metalúrgica y Miembros del Jurado.

De acuerdo con el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, y con el objetivo de obtener el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, sometemos a su consideración la tesis titulada:

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 4140 POR EL PROCESO SMAW

El propósito de este trabajo tecnológico es analizar cómo la velocidad de enfriamiento afecta la capacidad de soldadura del acero AISI 4140 de acuerdo con el proceso SMAW, con el fin de identificar los parámetros críticos y los controles necesarios que influyen en la calidad del cordón de soldadura y en la garantía de la integridad estructural del material. El estudio se centra en el comportamiento térmico de los aceros bonificados, como el AISI 4140, ampliamente utilizados en componentes sometidos a esfuerzos mecánicos en la industria metálica, donde el control térmico durante el proceso de soldadura resulta determinante para evitar defectos metalúrgicos y garantizar la confiabilidad operativa.

Br. Eliazar Delgado Collantes.

Br. Diego Abel Vargas Julon.

DEDICATORIA

Dedico este estudio a Dios, que me ha dado el regalo de la vida y me ha bendecido con una familia extraordinaria que ha sido mi apoyo constante e inspiración en cada etapa de este recorrido.

A mi madre, Julia Collantes Daza, la mujer que me dio la vida y me ha acompañado en cada instante de este camino. Gracias, mamá, por abrirme las puertas hacia un futuro profesional, por confiar en mí incluso en las circunstancias más difíciles, y por ofrecerme siempre tu apoyo incondicional y un amor sin límites.

Gracias a mi mamá Flora quien me enseñó a ser una persona persistente y es el pilar de nuestra familia.

A mi novia, gracias por comprenderme en cada etapa de este camino. Tu apoyo incondicional ha sido luz en los momentos difíciles, y tu presencia, la felicidad concentrada en una sola persona. Por ti, estoy dispuesto a enfrentar cualquier desafío, en todo momento y sin reservas.

A mi hermano Yuri Delgado por apoyarme y guiarme, a mis tíos, primos y familiares por siempre motivarme a ser un excelente profesional, a mis amigos que a lo largo de este tiempo compartimos muchas experiencias dentro y fuera de la Universidad.

A mi papito Cruz por siempre cuidarme, guiarme en mi vida y ayudarme a seguir adelante brindándome su bendición y apoyo espiritual.

Eliazar Delgado Collantes.

DEDICATORIA

A mi padre, Roberto Vargas Quispe, y
a mi madre, María Ysabel Julon Holguín, por
su amor, sacrificio y constante apoyo. Ustedes
me han dado las herramientas para enfrentar
cada desafío, y este logro es también suyo.

A mis hermanas, Diana Karolina y
María del Carmen Guadalupe, por su cariño
y compañía. Su confianza en mí me ha
impulsado a seguir adelante, y su presencia
ha sido mi inspiración.

A mi querido viejito Poderoso Patrón
San Cristóbal, por cuidarme y guiarme en este
camino, siempre dándome fortaleza para
seguir avanzando.

Diego Abel Vargas Julon.

AGRADECIMIENTO

Le expreso mi agradecimiento a la “Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad San Antonio Abad Del Cusco”, por el aprendizaje ofrecido de manera constante, y a mi asesor el Ing. Leonardo Avilés Hinojosa por su paciencia, constancia y el esfuerzo demostrado a lo largo de este proyecto. Sus palabras, correcciones precisas y valiosa orientación fueron fundamentales para alcanzar esta etapa tan esperada. Agradezco profundamente su orientación y cada uno de los consejos brindados; los conservaré siempre como un pilar fundamental en mi desarrollo profesional.

A lo largo de mi formación universitaria, he tenido el privilegio de ser instruido por numerosos docentes. A todos ellos, extendiendo mi más profundo agradecimiento por los conocimientos impartidos, los cuales han resultado esenciales para la finalización de este proyecto.

Agradezco sinceramente a mis compañeros, quienes no solo me brindaron su apoyo, sino que también se convirtieron en grandes amigos a lo largo de esta etapa. En especial, a mi compañero Diego Abel Vargas Julon, gracias por las horas de esfuerzo compartidas, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas que marcaron este camino académico.

Eliazar Delgado Collantes.

AGRADECIMIENTO

Reconozco y agradezco a la “Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad San Antonio Abad Del Cusco”, por haber facilitado mi proceso de aprendizaje a lo largo de todos estos años y al Ing. Leonardo Avilés Hinojosa, asesor de esta tesis, por la valiosa guía, orientación y valiosas enseñanzas a lo largo de este proceso. Su apoyo fue importante para la realización de este trabajo.

También extendiendo mi gratitud a mi compañero Eliazar Delgado Collantes, por su colaboración, compromiso y compañerismo a lo largo de este proyecto. Juntos hemos superado muchos retos.

Agradezco a mis profesores, la institución y mis compañeros de la universidad, quienes con su conocimiento y amistad me ayudaron tanto en lo profesional como a nivel personal, fortaleciendo no solo mis conocimientos, sino también mi carácter y compromiso profesional.

A mis amigos, por su constante aliento y por estar ahí cuando más los necesitaba. Su compañía ha hecho de este camino más llevadero.

Finalmente, expreso mi más sincero agradecimiento a todos quienes, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de esta tesis. Cada manifestación de apoyo y mensajes de aliento han constituido un elemento clave en mi crecimiento.

Diego Abel Vargas Julon

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	i
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	i
ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE FOTOS.....	ix
SIMBOLOGÍA	x
RESUMEN	i
ABSTRACT	i
INTRODUCCIÓN.....	i
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Formulación del Problema	1
Problema General.....	1
Problemas Específicos.....	2
1.3 Justificación e Importancia.....	2
Justificación Tecnológica.....	2
Justificación Social.....	2
Justificación Económica.....	3
Justificación Ambiental.....	3
Importancia.....	3
1.4 Objetivo General y Específicos.....	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
CAPITULO II.....	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Antecedentes Nacionales e Internacionales	5
Antecedentes Nacionales.....	5
Antecedentes Internacionales.....	6
2.2 Acero AISI 4140	7

2.3	Micro-estructura del Acero	11
2.3.1	Ferrita	12
2.3.2	Cementita	13
2.3.3	Perlita	14
2.3.4	Austenita.....	15
2.3.5	Bainita	16
2.3.6	Martensita.....	17
2.3.1.1	Revenido de la martensita.....	18
2.4	Procesos de Soldadura.....	21
	Clasificación según la American Welding Society, AWS	21
2.5	Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (SMAW).....	25
2.5.1	Definición y Antecedentes.....	25
2.5.2	Usos y Ventajas del Soldeo por Arco con Electrodo Revestidos	26
2.5.3	Principios del Proceso	27
2.5.4	Transferencia Metálica	29
2.5.5	Variables del Proceso	30
2.5.5.1	Variables preseleccionadas	30
2.5.5.2	Variables primarias	31
2.5.6	Variables en el proceso SMAW.	31
2.6	Posiciones de Soldeo en las Juntas Soldadas	37
2.7	Tipos de Juntas	39
2.8	Zonas Metalúrgicas de la Soldadura	40
2.9	Ciclo Térmico de la Soldadura.....	45
2.10	Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura por arco.	49
2.11	Cálculo del Ancho de la ZAC	53
2.12	Velocidad de Enfriamiento.....	54
2.12.1	Ecuación de la Velocidad de Enfriamiento para Chapas Gruesas y Delgadas.....	57
2.13	Temperatura de pre-calentamiento.....	60
2.14	Carbono Equivalente	63
2.14.1	Expresión de carbono equivalente (CE)	64
2.15	Diagrama de Graville para evaluar la capacidad de soldado	66
2.16	Temperatura de pre-calentamiento (Método de Seferian).....	68
2.17	Ensayos Destructivos en Uniones Soldadas.....	69

2.18	Ensayos Destructivos y no Destructivos	75
	Ensayos no Destructivos	75
	Ensayos Destructivos	80
2.19	Las Discontinuidades en Soldadura	82
	Discontinuidades Superficiales	82
	Discontinuidades Internas	87
	Discontinuidades Como Inclusiones	91
2.20	Calificación del Procedimiento	95
	Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)	96
	Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)	96
	Calificación de Soldadores (WPQ)	96
CAPITULO III		97
HIPÓTESIS Y VARIABLES		97
3.1	Hipótesis General y Específicos	97
	Hipótesis General	97
	Hipótesis Especificas	97
3.2	Variable Independiente y Dependiente	98
	Variable Independiente	98
	Variables Dependientes	98
CAPITULO IV		99
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		99
4.1	Ámbito de Estudio	99
4.2	Tipo o Nivel de Investigación	99
4.3	Población y Muestra	100
	Población	100
	Muestra	100
4.4	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	100
	Técnicas	100
4.5	Viabilidad	101
CAPITULO V		102
PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO EXPERIMENTAL		102
5.1	Maquinaria y Equipos	102
	Materiales Utilizados Para Preparar las Muestras	106

5.1.1.1	Composición química del acero AISI 4140:	106
5.1.1.2	Propiedades mecánicas.	107
5.1.1.3	Aplicaciones Típica	108
5.2	Probetas Objeto de Investigación	109
5.3	Capacidad de la Unión SAMW y AISI 4140	111
	Cálculo de Carbono Equivalente	111
	Definición de la Temperatura de Pre-calentamiento para el AISI 4140.	112
	Especificaciones para la obtención de las muestras (WPS).	113
5.4	Cálculos Realizados	122
	Cálculo de la Energía Neta Aportada	122
	Determinación del Área Alterada por Calor (ZAC)	123
	Determinación de la rapidez de enfriado	126
5.5	Ensayos y Evaluación de Soldaduras	127
	Inspección Visual	127
	Ensayo de Doblado	128
	Ensayo por Líquidos Penetrantes	133
	Prueba de Dureza	138
CAPITULO VI		144
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS		144
6.1	Inspección Visual en Probetas Soldadas	144
6.2	Ensayo de doblado	144
6.3	Ensayo por Líquidos Penetrantes	144
6.4	Ensayo Metalográfico	144
6.5	Martensita Revenida	145
6.6	Prueba de Dureza	146
CONCLUSIONES		148
RECOMENDACIONES		149
REFERENCIA		150
ANEXOS		155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Componentes químicos del AISI 4140</i>	8
Tabla 2 <i>Comparación entre corriente continua y corriente alterna</i>	35
Tabla 3 <i>Valor de la constante k</i>	37
Tabla 4 <i>Posiciones de soldadura en chapas a tope</i>	38
Tabla 5 <i>Posiciones de soldadura en chapas en ángulo</i>	38
Tabla 6 <i>Posiciones de soldadura en tubos a tope</i>	39
Tabla 7 <i>Zona de una Unión Soldada</i>	41
Tabla 8 <i>Eficiencia térmica de los procesos de arco</i>	50
Tabla 9 <i>Conductividad Térmica en Aceros</i>	52
Tabla 10 <i>Temperatura de Pre-calentamiento</i>	61
Tabla 11 <i>Escalas de dureza Rockwell</i>	70
Tabla 12 <i>Escalas de dureza Rockwell</i>	72
Tabla 13 <i>Escalas de dureza superficial Rockwell</i>	73
Tabla 14 <i>Composición química del acero ASTM AISI 4140</i>	107
Tabla 15 <i>Propiedades mecánicas del acero AISI 4140</i>	107
Tabla 16 <i>Análisis químico de metal depositado del electrodo E-8018-B6</i>	109
Tabla 17 <i>Propiedades mecánicas del electrodo E 8018-B6</i>	109
Tabla 18 <i>Características de las probetas</i>	110
Tabla 19 <i>Nomenclatura de la junta</i>	111
Tabla 20 <i>Probeta 1, WPS</i>	114
Tabla 21 <i>Probeta 2, WPS</i>	116
Tabla 22 <i>Probeta 3, WPS</i>	118
Tabla 23 <i>Probeta 4, WPS</i>	120
Tabla 24 <i>Valores de calor neto</i>	123
Tabla 25 <i>Ancho de la ZAC</i>	125
Tabla 26 <i>Velocidad de enfriamiento</i>	127
Tabla 27 <i>Resultados del examen visual</i>	128
Tabla 28 <i>Probeta 1, Doblado</i>	129
Tabla 29 <i>Probeta 2, Doblado</i>	130
Tabla 30 <i>Probeta 3, Doblado</i>	131

Tabla 31 <i>Probeta 4, Doblado</i>	132
Tabla 32 <i>Resultados de la prueba de doblado</i>	133
Tabla 33 <i>Probeta 1, liquido penetrante</i>	134
Tabla 34 <i>Probeta 2, liquido penetrante</i>	135
Tabla 35 <i>Probeta 3, liquido penetrante</i>	136
Tabla 36 <i>Probeta 4, liquido penetrante</i>	137
Tabla 37 <i>Resultados de la prueba de líquidos penetrantes</i>	138
Tabla 38 <i>Probeta 1, dureza</i>	139
Tabla 39 <i>Probeta 2, dureza</i>	140
Tabla 40 <i>Probeta 3, dureza</i>	141
Tabla 41 <i>Probeta 4, dureza</i>	142
Tabla 42 <i>Dureza de las probetas</i>	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Diagrama hierro-carbono</i>	12
Figura 2	<i>Micrografía de la Ferrita</i>	13
Figura 3	<i>Cementita en forma de red clara en los bordes de los granos</i>	14
Figura 4	<i>Micrografía de la perlita</i>	15
Figura 5	<i>Micrografía de la Austenita</i>	15
Figura 6	<i>Micrografía de Bainita que contiene agujas muy finas de Cementita</i>	17
Figura 7	<i>Micrografía de Bainita que contiene agujas muy finas de Cementita</i>	21
Figura 8	<i>Clasificación de los procesos de soldadura</i>	24
Figura 9	<i>Soldadura por arco con electrodo revestido</i>	25
Figura 10	<i>Diagrama del proceso SMAW</i>	28
Figura 11	<i>Gas ionizado para la conducción de corriente</i>	29
Figura 12	<i>Propiedades en diferentes condiciones del acero y la soldadura</i>	30
Figura 13	<i>Tipos de junta</i>	40
Figura 14	<i>Principales zonas de la soldadura</i>	42
Figura 15	<i>Regiones de la zona de fusión</i>	43
Figura 16	<i>Regiones de la zona afectada por el calor</i>	44
Figura 17	<i>Ciclo térmico de la soldadura</i>	45
Figura 18	<i>Distribución de temperatura del ciclo térmico</i>	47
Figura 19	<i>Curvas isométricas de una plancha sometida a soldadura a tope</i>	49
Figura 20	<i>La curva TTT de un acero AISI 4140 muestra las curvas de enfriamiento típicas y el rango de temperaturas clave para evaluar la velocidad de enfriamiento en soldadura.</i>	56
Figura 21	<i>Gráfico de Seferian.</i>	62
Figura 22	<i>Zonas que indica los grados de soldabilidad</i>	67
Figura 23	<i>Diagrama de Graville.</i>	67
Figura 24	<i>Cono de diamante</i>	74
Figura 25	<i>Depósito de soldadura en cara y raíz</i>	75
Figura 26	<i>Depósito de soldadura en cara y raíz.</i>	81
Figura 27	<i>Exceso de penetración</i>	82
Figura 28	<i>Falta de penetración</i>	83

Figura 29	<i>Concavidad externa</i>	84
Figura 30	<i>Concavidad interna</i>	84
Figura 31	<i>Socavaduras o mordeduras de borde</i>	85
Figura 32	<i>Quemado</i>	86
Figura 33	<i>Salpicaduras de metal</i>	86
Figura 34	<i>Falta de continuidad del cordón</i>	87
Figura 35	<i>Fisuras longitudinales</i>	87
Figura 36	<i>Fisuras transversales</i>	88
Figura 37	<i>Fisura de interrupción</i>	89
Figura 38	<i>Fisuras en la zona afectada por el calor</i>	89
Figura 39	<i>Falta de penetración</i>	90
Figura 40	<i>Falta de fusión</i>	90
Figura 41	<i>Falta de fusión</i>	91
Figura 42	<i>Inclusiones gaseosas</i>	92
Figura 43	<i>Porosidad agrupada</i>	92
Figura 44	<i>Porosidad alineada</i>	93
Figura 45	<i>Inclusiones no metálicas</i>	93
Figura 46	<i>Inclusión de escoria aisladas</i>	94
Figura 47	<i>Escorias alineadas</i>	95
Figura 48	<i>Desalineado</i>	95
Figura 49	<i>Nomenclatura de la junta a soldar</i>	110
Figura 50	<i>Cálculo carbono equivalente</i>	111
Figura 51	<i>Diagrama de Graville</i>	112

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. <i>Fuente de Poder</i>	102
Foto 2. <i>Fuente de Poder</i>	103
Foto 3. <i>Durómetro portátil</i>	103
Foto 4. <i>Microscopio digital portátil</i>	104
Foto 5. <i>Kit de tintes penetrantes</i>	105
Foto 6. <i>Probetas de acero AISI 4140</i>	106
Foto 7. <i>Probetas para el estudio debidamente identificadas</i>	109
Foto 8. <i>Soldabilidad de las probetas</i>	122
Foto 9. <i>Ensayo de dureza</i>	138
Foto 10. <i>Medición de la dureza</i>	143

SIMBOLOGÍA

Simbología	Descripción
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotores (Society of Automotive Engineers).
AIISI	Instituto Americano del Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute)
SMAW	Soldadura por arco electrodo revestido (Shielded metal arc welding)
AWS	Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society)
Mm	Milímetro.
MIG	Soldadura por arco, gas y electrodo metálico (Metal inert gas welding)
MAG	Soldadura por arco, gas activo y electrodo metálico (Metal Active gas welding)
TIG	Soldadura con electrodo de tungsteno y gas inerte (Tugsten inert gas welding)
CC	Corriente continua.
CA	Corriente alterna.
ANSI	Instituto americano de Normalización (American National Standards Institute)
ZF	Zona de fusión.
ZAC	Zona afectada por el calor.
MB	Metal base.
H	Energía de soldeo, en J/mm
V	voltios.
A	Amperios
V	velocidad de soldado.
Tmax	Temperatura máxima
To	Temperatura inicial de la chapa o Temperatura de partida.
Tm	Temperatura de fusión o Temperatura del liquidus del metal a soldar.
C	Calor específico del metal sólido.
Hnet	energía aportada neta.
t	Espesor de la chapa a soldar.
P	Densidad del material (g/mm ³ ; g/cm ³ ; Kg/m ³)
pC	Calor específico 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
Cs	carbono equivalente del espesor.
e	espesor de la pieza.
Ce	carbono equivalente químico.
Tp	Temperatura de precalentamiento.
%	Porcentaje.
CDEN	Corriente directa electrodo al polo negativo.
CDEP	Corriente directa electrodo al polo positivo.
HB	Dureza Brinell
H	Altura.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo determinar cómo la velocidad de enfriamiento influye sobre el procedimiento de unión por "Arco con Electrodo Revestido" (SMAW), afectando la calidad y la integridad de las soldaduras de acero AISI 4140. Se efectuó una investigación exploratoria, descriptiva, correlacional y explicativa. Se emplearon cuatro probetas del acero especificado, cada una sometida a soldadura con parámetros o variables de corriente eléctrica y nivel de voltaje, manteniéndose el mismo ritmo de soldeo. Se calcularon los aportes de calor suministrado a cada probeta para luego realizar la verificación de calidad de las probetas mediante: revisión visual, tintes y prueba de doblado. Concluyendo que, un aumento en la rapidez de solidificación durante el proceso de unión SMAW sobre el AISI 4140 aumenta la probabilidad de grietas en las juntas soldadas. Este comportamiento se reflejó en las probetas 1 y 2, con velocidades de enfriamiento de 6.4°C/s y 5.75°C/s , respectivamente. La causa de esta tendencia está asociada a la composición del AISI 4140, un acero aleado con un nivel intermedio de carbono lo cual es vulnerable a la formación de martensita al enfriarse rápidamente. La martensita, caracterizada por su dureza intensa y fragilidad, provoca esfuerzos internos significativos que facilitan la generación de fisuras, especialmente dentro del área alterada por temperaturas altas (ZAC). Se determinó que las variables de soldadura utilizados en la probeta 3 resultaron ser los óptimos para evitar esta problemática.

Palabras clave: Acero AISI 4140, SMAW, velocidad de enfriamiento, dureza, microestructura.

ABSTRACT

This research aims to determine how cooling rate influences the "Shielded Arc Welding" (SMAW) joining process, affecting the quality and integrity of AISI 4140 steel welds. An exploratory, descriptive, correlational, and explanatory study was carried out. Four specimens of the specified steel were used, each subjected to welding with variable parameters of electric current and voltage level, maintaining the same welding rate. The heat input supplied to each specimen was calculated and then quality verified by visual inspection, dyeing, and bending tests. It was concluded that an increase in the solidification rate during the SMAW joining process on AISI 4140 specimens increases the probability of cracks in the welded joints. This behavior was reflected in specimens 1 and 2, with cooling rates of 6.4°C/s and 5.75°C/s , respectively. The cause of this trend is associated with the composition of AISI 4140, an alloy steel with an intermediate carbon content that is vulnerable to martensite formation upon rapid cooling. Martensite, characterized by its intense hardness and brittleness, causes significant internal stresses that facilitate crack formation, especially within the high-temperature altered area (HAZ). The welding variables used in test piece 3 were determined to be optimal for avoiding this problem.

Keywords: AISI 4140 steel, SMAW, cooling rate, hardness, microstructure.

INTRODUCCIÓN

El AISI 4140 se define como acero aleado de alta resistencia, cuya dureza, tenacidad, resistencia al deterioro y capacidad de endurecimiento lo hacen apto para usos industriales. Su soldabilidad sin embargo, presenta desafíos significativos, ya que las propiedades y micro-estructurales resultantes de la soldadura dependen de las condiciones térmicas impuestas durante el proceso. En particular, la rapidez de enfriado juega un rol crucial en la formación de estructuras como martensita, bainita o perlita, las cuales inciden de manera directa en las diferentes resistencias, capacidad de deformación y dureza del material.

El acero AISI 4140 se califica de baja aleación, templado y revenido, ampliamente utilizado por su resistencia mecánica, tenacidad y maquinabilidad. Es ideal para componentes críticos como ejes y engranajes, pernos y piezas sometidas a esfuerzos severos. En este contexto, “La soldadura de arco metálico con electrodo revestido” (SMAW), representa una actividad relevante tanto en la fabricación como en el mantenimiento industrial.

No obstante, en nuestra región se ha identificado una problemática recurrente en diversas factorías que trabajan con aceros tratados térmicamente: la ejecución de trabajos de soldadura sin considerar criterios técnicos adecuados, especialmente en lo referente al control térmico durante el proceso. Esta situación representa un riesgo para el rendimiento mecánico y la integridad de las soldaduras. y, en consecuencia, para el desempeño seguro de los componentes en servicio.

Un elemento determinante que influye en el nivel de la soldadura del AISI 4140 es la velocidad de enfriamiento. La cual, al ser elevada puede favorecer la aparición de martensita en el material de soldadura y en el área alterada por las altas temperaturas (ZAC). Esto incrementa la dureza del acero, aunque incrementa la dureza, también aumenta la fragilidad

y el riesgo de grietas en frío. A pesar de la relevancia de este fenómeno, en muchos casos no se evalúa ni se controla adecuadamente.

Por ello, es necesario investigar rigurosamente el impacto de la rapidez de enfriamiento sobre las características mecánicas del AISI 4140 obtenidas por soldadura SMAW, con el fin de proporcionar fundamentos técnicos que permitan mejorar el nivel de excelencia en las labores de soldadura y reducir el riesgo de fallas prematuras en servicio.

SMAW “Soldadura por arco con electrodo revestido” es una de las técnicas más empleadas para la soldadura debido a su versatilidad y bajo costo. Sin embargo, la rápida disipación de calor en este proceso puede generar altas velocidades de enfriamiento, lo que incrementa la amenaza de creación de micro-estructuras frágiles y de alta dureza, como la martensita, en el área alterada por cambios de temperaturas (ZAC). Esto no solo afecta la integridad de las juntas soldadas, sino también su desempeño en servicio, especialmente en aplicaciones donde se requieren alta resistencia y tolerancia a cargas dinámicas.

La presente investigación permitirá solucionar diversos problemas técnicos que afectan el nivel y seguridad de conexiones por soldaduras en aceros tratados térmicamente, como el AISI 4140. Entre los desafíos más importantes esta la creación de estructuras de baja tenacidad, ejemplo de ello la martensita, resultado de la rapidez de cambio de temperatura, lo cual incrementa la amenaza de fisuras en frío y compromete la integridad de la unión. Asimismo, muchas factorías en la región ejecutan trabajos de soldadura sin considerar adecuadamente las variables térmicas, generando uniones de mala calidad y con propiedades mecánicas inconsistentes.

Al estudiar el impacto de la rapidez de enfriado en la dureza y el comportamiento del metal aportado en la unión, esta investigación contribuirá a establecer criterios técnicos que permitan controlar mejor el proceso SMAW en el acero AISI 4140. Esto no solo reducirá la probabilidad de fallos en servicio, sino que también facilitará la elaboración de procedimientos de soldadura más seguros y eficientes. De esta manera, se fortalecerá el conocimiento técnico local, mejorando la capacidad de las industrias para realizar trabajos de soldadura más confiables y duraderos.

En este contexto, resulta fundamental comprender cómo las diferentes velocidades de enfriamiento afectan la soldabilidad del acero AISI 4140. Esta investigación está centrada en examinar el impacto de esta variable sobre las características mecánicas y micro-estructurales de las uniones soldadas, proporcionando información valiosa para mejorar los factores que intervienen en el procedimiento y garantizar un desempeño adecuado del material en servicio. Al mismo tiempo, se busca establecer correlaciones entre la rapidez de enfriado y la creación de micro-constituyentes críticos, contribuyendo al desarrollo de prácticas de soldadura más eficientes y seguras para este tipo de acero.

El desarrollo de esta investigación estuvo condicionado por ciertas limitaciones que influyeron en la exactitud y profundidad de los hallazgos. Una de las principales dificultades fue la limitada disponibilidad de equipos de laboratorio especializados, tales como sistemas de medición térmica de alta precisión, equipos para análisis micro-estructural automatizado o instrumentos de dureza con capacidad de mapeo detallado. La ausencia de estos recursos técnicos restringió la posibilidad de obtener datos más exactos y de mayor resolución, lo cual habría enriquecido el análisis y permitido establecer correlaciones más precisas entre la velocidad de enfriamiento y las propiedades metalúrgicas del AISI 4140 soldado mediante la

unión SMAW. No obstante, dentro del marco de recursos disponibles, se aplicaron criterios rigurosos de control y verificación que garantizan la eficacia de los resultados alcanzados.

La estructura del estudio se ha dividido en un total de seis capítulos, organizados de manera secuencial y coherente para abordar de forma integral el estudio planteado. El Capítulo I aborda la problemática, se enuncian los objetivos y se argumenta la justificación del trabajo. El Capítulo II se dedica al marco teórico, en el que se abordan los fundamentos científicos y técnicas relacionados con la soldabilidad del acero AISI 4140, así como los antecedentes relevantes. Para el Capítulo III se encuentran las hipótesis y se definen variables de estudio, estableciendo el marco conceptual para la verificación experimental. El Capítulo IV describe la metodología utilizada en el estudio, precisando el tipo de investigación, las técnicas de recolección de datos y el enfoque general adoptado. Dentro del Capítulo V se presenta el procedimiento metodológico experimental, detallando los pasos seguidos durante la ejecución práctica del estudio. Finalmente, el Capítulo VI, presentan y analiza los resultados obtenidos, contrastándolos con la teoría y las hipótesis planteadas, para extraer conclusiones relevantes y aportar recomendaciones aplicables.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Numerosas Fabricas hacen uso del acero AISI 4140 por su comportamiento mecánico y su alta respuesta a tratamientos térmicos. La soldadura de este acero constituye un proceso crítico dentro de los ciclos de producción y mantenimiento, por lo que es indispensable una ejecución rigurosa que garantice la calidad del producto final y minimice la aparición de defectos que puedan comprometer su integridad estructural. En nuestra región, se ha constatado que muchas factorías que trabajan con aceros sometidos a tratamientos térmicos carecen de la aplicación de técnicas de soldadura adecuadas, incrementando así el riesgo de fallas durante el servicio. Un factor decisivo en la soldabilidad del AISI 4140 es la rapidez de enfriado durante el procedimiento SMAW, dado que esta influye directamente en la creación de micro-constituyentes, como la martensita. Un enfriamiento excesivamente rápido puede generar depósitos de soldadura con alta dureza y baja tenacidad, lo que propicia la aparición de fisuras por fragilización en frío, afectando negativamente la confiabilidad de la unión soldada. Por tanto, comprender y controlar este parámetro es fundamental para asegurar un desempeño óptimo del material en servicio.

1.2 Formulación del Problema

Problema General

¿De qué manera influirá la velocidad de enfriamiento en la calidad y la integridad de las uniones soldadas del AISI 4140 en el proceso SMAW?

Problemas Específicos

- ¿Qué relación existirá entre la velocidad de enfriamiento y la formación de fisuras en las uniones utilizando el procedimiento SMAW en el AISI 4140?
- ¿Qué efecto producirá la rapidez de enfriado en la micro-estructura y el área alterada por el calor (ZAC) en las uniones de acero AISI 4140 realizadas por SMAW?
- ¿Cómo influirá la velocidad de enfriamiento en la dureza de las uniones de acero AISI 4140 en el procedimiento SMAW?

1.3 Justificación e Importancia

Justificación Tecnológica

- Investigar y comprender el efecto del enfriamiento en la soldabilidad del AISI 4140 mediante el procedimiento SMAW puede contribuir al mejoramiento en el campo de la técnica de soldadura de metales.
- El estudio puede llevar al desarrollo de nuevas técnicas y estrategias de soldadura que puedan aplicarse no solo al acero AISI 4140, sino también a otros materiales y procesos de soldadura, mejorando así la eficacia y eficiencia en una gran cantidad de aplicaciones industriales.

Justificación Social

- Mejorar el desempeño e integridad de las uniones soldadas de acero AISI 4140 puede aumentar la seguridad en diversos productos y estructuras, lo que beneficia a los trabajadores, usuarios y la sociedad en general al reducir el riesgo de fallas y accidentes.
- Además, la mejoras en el proceso de soldadura puede impulsar el empleo en el sector de producción y fabricación al mejorar la competitividad de las empresas que utilizan acero AISI 4140 en sus productos.

- Finalmente, la investigación y aplicación de prácticas de soldadura más eficientes y sostenibles pueden mejorar la reputación de las empresas en términos de responsabilidad social y ambiental, lo que puede aumentar su atractivo para clientes y colaboradores.

Justificación Económica

- La soldabilidad adecuada del acero AISI 4140 es importante en una gran cantidad de fábricas (la automotriz, la aeroespacial, la construcción, entre otras). Optimizar la técnica de soldadura mediante el control de la rapidez de enfriamiento puede reducir los costos de fabricación al minimizar la necesidad de re-trabajo por causa de anomalías en las soldaduras.
- Mejorar la calidad de las soldaduras del AISI 4140 también puede aumentar la utilidad de los componentes, reduciendo así los gastos por el mantenimiento y reemplazo a largo plazo.
- Además, una soldabilidad mejorada puede aumentar la eficiencia de la producción al disminuir los tiempos de parada y los desperdicios asociados con soldaduras defectuosas.

Justificación Ambiental

- Mejorar el proceso de SMAW para el AISI 4140 reducir la formación de residuos y la necesidad de re-trabajo, lo que disminuye el consumo de energía, materiales y productos químicos.
- Una soldabilidad mejorada puede resultar en una menor cantidad de desechos de material debido a la reducción de piezas defectuosas, lo que contribuye a conservar recursos naturales y a disminuir la huella ambiental asociada con la producción y el desecho de materiales.

Importancia

La importancia del trabajo "Influencia de la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero AISI 4140 por el proceso SMAW" radica en su contribución significativa a múltiples aspectos clave en la industria de la soldadura y la fabricación de acero.

1.4 Objetivo General y Específicos

Objetivo General

Determinar cómo la velocidad de enfriamiento en uniones soldadas por arco manual con electrodo revestido (SMAW) afectara la calidad y la integridad de las uniones soldadas de acero AISI 4140.

Objetivos Específicos

- Determinar la correlación entre velocidad de enfriamiento y creación de fisuras en las uniones utilizando la técnica SMAW en el AISI 4140.
- Determinar la micro-estructura y el área alterada por el calor (ZAC) en las uniones de acero AISI 4140 realizadas por SMAW, considerando diferentes velocidades de enfriamiento de las uniones soldadas de acero AISI 4140 en función de la velocidad de enfriamiento durante el proceso SMAW.
- Identificar la dureza de los depósitos por efecto de la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero 4140 por el procedimiento SMAW.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Nacionales e Internacionales

Antecedentes Nacionales

- a) Pérez (2022), Este estudio se aborda el análisis del impacto del pre-calentamiento sobre las propiedades mecánicas de las uniones por soldadura, cuyo objetivo principal fue determinar cómo afecta el control de temperatura entre los diferentes pases de la soldadura en las propiedades mecánicas. Encontrando que, al aumentar la temperatura de pre-calentamiento de 150 °C a 300 °C, la dureza en la ZAC disminuyó significativamente de 350 HV a 280 HV, este resultado apoya la hipótesis de que una menor velocidad de enfriamiento (resultado del pre-calentamiento) previene la formación de micro-estructuras muy duras, lo que indirectamente beneficia la tenacidad. El aporte de este estudio es altamente relevante porque el pre-calentamiento y la temperatura de inter-paso son métodos para controlar la velocidad de enfriamiento, sus resultados sirven para respaldar tus propios hallazgos o para establecer una base comparativa.
- b) Mendoza López (2017), en su trabajo propuso estudiar como influye la temperatura de pre-calentamiento sobre la micro-estructura, susceptibilidad a la fisuración en frío, dureza y extensión de ZAC en la unión de planchas de acero AISI 9260, soldadas mediante proceso SMAW con electrodo de aporte E7018. Se utilizó diseño unifactorial con 5 niveles de la variable (100 °C; 140 °C; 180°C; 220°C y 260°C), tres réplicas del experimento y tres pruebas testigo para el proceso, obteniéndose 18 pruebas en total. Cada probeta, según norma WIC, consta de dos planchas de acero AISI 9260 de 50,0 x 76,0 x 12,5 mm, junta en “V” y separación de raíz de 1,0 mm, montados sobre una plancha enfriadora, de acero A36, de dimensiones 70,0 x 180,0 x 12,5 mm. La temperatura

inicial, antes de pre-calentamiento fue de 9°C. El soldeo se realizó según el diseño de aleatorización de pruebas, ejecutando 3 cordones en multipase y pre-calentamientos controlados de inicio y de interpase para luego colocar en carril de aluminio a 14°C. En los perfiles de dureza versus micro-estructura en 4 puntos selectos (ZF, ZAC, línea final ZAC y MB), muestran la relación entre la dureza y cambios micro-estructurales debido a las temperaturas de pre-calentamiento, energía del proceso y material de aporte. Se observaron microfisuras en la ZAC de casi todas las probetas. En la ZAC, los nuevos micro-constituyentes generaron zonas de extrema dureza bajo el cordón y zonas de baja dureza debido a sobre-revenidos.

Antecedentes Internacionales

- a) Mejías (2020). En su estudio sobre los efectos de la rapidez de enfriado en la tracción de acero de alta resistencia, su objetivo principal tras el ciclo simultaneo de soldadura fue determinar los cambios en la resistencia a tracción y en el límite elástico en la unión soldada. Se encontró que las velocidades de enfriamiento elevadas, que conducen a la formación de martensita, aumentaron la resistencia a la tracción máxima hasta 1200 MPa, pero a expensas de la tenacidad y la ductilidad. Por otro lado, velocidades más lentas (simulando un tratamiento térmico post-soldadura) redujeron la resistencia a la tracción a 950 MPa, pero incrementaron el porcentaje de alargamiento y, por ende, la tenacidad del material. En conclusión, si bien una alta velocidad de enfriamiento puede aumentar la resistencia, compromete la tenacidad, lo que es un balance crítico en aplicaciones de ingeniería. Este trabajo aporta datos sobre la influencia de la rapidez de enfriado en la tenacidad, pero desde la perspectiva de la resistencia a la tracción.

- b) Viveros (2021), en su investigación de evaluación del tratamiento térmico en las aleaciones de acero sobre cambios en la tenacidad y en la micro-estructura, cuyo objetivo principal fue analizar la relación entre la velocidad de enfriamiento y la tenacidad a la fractura. Se encontró que a velocidad de enfriamiento más lenta, logradas mediante un enfriamiento controlado en horno después del tratamiento térmico, resultaron en un aumento de la tenacidad hasta 75 J. Por el contrario, las muestras enfriadas rápidamente en aire exhibieron valores de tenacidad significativamente menores (40 J). El estudio concluye que el control de la velocidad de enfriamiento es crucial para obtener una micro-estructura más dúctil (bainita y perlita fina) que resiste mejor la propagación de grietas. Este trabajo aporta fundamentos teóricos en cuanto a la velocidad de enfriamiento, aunque su investigación no se centra en el acero AISI 4140.

2.2 Acero AISI 4140

El AISI 4140 se califica como una aleación con un nivel de carbono (0.30% y 0.60%), enriquecido con cromo (Cr) y molibdeno (Mo), elementos que le otorgan una elevada templabilidad y excelentes propiedades mecánicas, incluyendo alta resistencia, tenacidad y dureza. Clasificado dentro del grupo de aceros bonificados, este material destaca por su capacidad para optimizar sus características mediante tratamientos térmicos controlados, lo que resulta adecuado para aplicaciones que demandan un equilibrio óptimo entre resistencia mecánica y ductilidad

Los aceros bonificados son aceros que han sido expuestos a un tratamiento térmico específico denominado "bonificación", Consiste en temprar el acero y luego someterlo a revenido, con el fin de optimizar su resistencia, tenacidad y dureza ante la fatiga

El proceso de templado se logra calentando por encima de su punto crítico el acero para posteriormente realizar un enfriamiento acelerado, lo que produce una estructura martensítica para incrementar la dureza por otro lado, el revenido consiste en re-calentar el acero a una temperatura crítica luego de un proceso lento de enfriamiento, lo que disminuye la fragilidad del material y aumenta su tenacidad.

Los aceros bonificados se utilizan comúnmente en componentes que requieren alta resistencia mecánica y buena ductilidad, como ejes, engranajes, árboles de transmisión y piezas sometidas a cargas dinámicas. Estas aleaciones contienen elementos como C, Mn, P, S, Si, Cr y Mo, los cuales determinan sus características físicas, químicas y mecánicas, lo podemos apreciar en la Tabla.

Tabla 1
Componentes químicos del AISI 4140

AISI		Composición química (%)					
Grado	C	Mn	P (max)	S (max)	Si	Cr	Mo
4140	0.38-0.43	0.75-1.10	0.035	0.040	0.15-0.30	0.80-1.10	0.15-0.25

Fuente: (ASTM International, 2020)

a) Efectos de los elementos de aleación.

- **Cromo**

Mineral más económico que el níquel, capaz de formar carburos simples como Cr_7C_3 y Cr_4C , además de carburos complejos tipo $(\text{FeCr})_3\text{C}$. Estos compuestos destacan por su alta dureza y resistencia al deterioro. Respecto a su solubilidad, el cromo puede disolverse hasta un 13 % en la fase austenítica (hierro gamma) y es completamente soluble en la ferrita alfa.

En aceros bajos en carbono, el cromo se incorpora en solución sólida en la ferrita, mejorando notablemente su resistencia mecánica y tenacidad.

- **Molibdeno**

El molibdeno se considera un elemento de aleación con un costo considerable, caracterizado por su limitada solubilidad tanto en la fase austenítica (hierro gamma) como en la ferrítica (hierro alfa). Es un potente creador de carburos, lo que causa un incremento en la dureza y la capacidad anti-desgaste. Además, ejerce un marcado efecto sobre la templabilidad, favoreciendo el endurecimiento profundo en aceros. Similar al cromo, la mejora significativamente la resistencia mecánica cuando se somete a altas temperaturas. Los aceros aleados con molibdeno presentan menor susceptibilidad al fenómeno de fragilización por revenido.

En particular, los aceros Cromo-Molibdeno de la serie 41XX resultan ser una alternativa económica de adecuada ductilidad, excelente capacidad de soldadura y óptimas propiedades de endurecimiento en profundidad.

- **Otros elementos**

La adición de manganeso (Mn) en los aceros cumple una función esencial en la mejora de su calidad metalúrgica. La afinidad química de este elemento para unirse con el azufre es superior a la del hierro lo que favorece la formación de sulfuro de manganeso (MnS). Este compuesto es estable y no genera inconvenientes durante el procesamiento térmico. Al promover la formación de MnS, se evita la aparición de sulfuro de hierro (FeS), una fase indeseable debido a su bajo punto de fusión, que puede provocar fisuras internas durante el laminado en caliente.

Por tanto, el manganeso actúa como un agente desulfurante eficaz, contribuyendo a la integridad estructural del acero y mejorando su comportamiento en procesos de conformado.

b) Propiedades mecánicas:

La dureza del material se sitúa en un rango de 275 a 320 HB (29 a 34 HRc), con un margen de fluencia de 690 MPa (100 KSI) y resistencia máxima entre 900 y 1050 MPa (130 a 152 KSI). También exhibe una elongación mínima del 12% y una reducción de área mínima del 50%.

c) Propiedades físicas:

La densidad está en el orden de 7.850 Kg/m³

d) Presentación y suministro

El acero se suministra como palanquillas y barras para forja, así como en barras laminadas, estiradas, peladas, tratadas térmicamente o en rollos, según los requerimientos del proceso y las propiedades deseadas.

e) Aplicaciones

Se emplea ampliamente en:

- ✓ Elementos estructurales en la industria aeronáutica
- ✓ Contenedores diseñados para operar bajo presión
- ✓ Ejes utilizados en sistemas automotrices
- ✓ Componentes forjados o mecanizados sometidos a temple y revenido
- ✓ Partes funcionales en bombas para manejo de lodos
- ✓ En la industria metalúrgica, la rapidez del enfriamiento durante el tratamiento térmico en la fabricación del AISI 4140, permite ajustar la dureza, tenacidad y resistencia. Garantizando su comportamiento en uniones soldadas.

f) Propiedades tecnológicas

El AISI 4140 presenta una maquinabilidad del 66% en estado estirado en frío y del 56% tras el laminado en caliente y recocido. En cuanto a su soldabilidad, este acero tiene un “carbono equivalente” máximo de 0,89%.

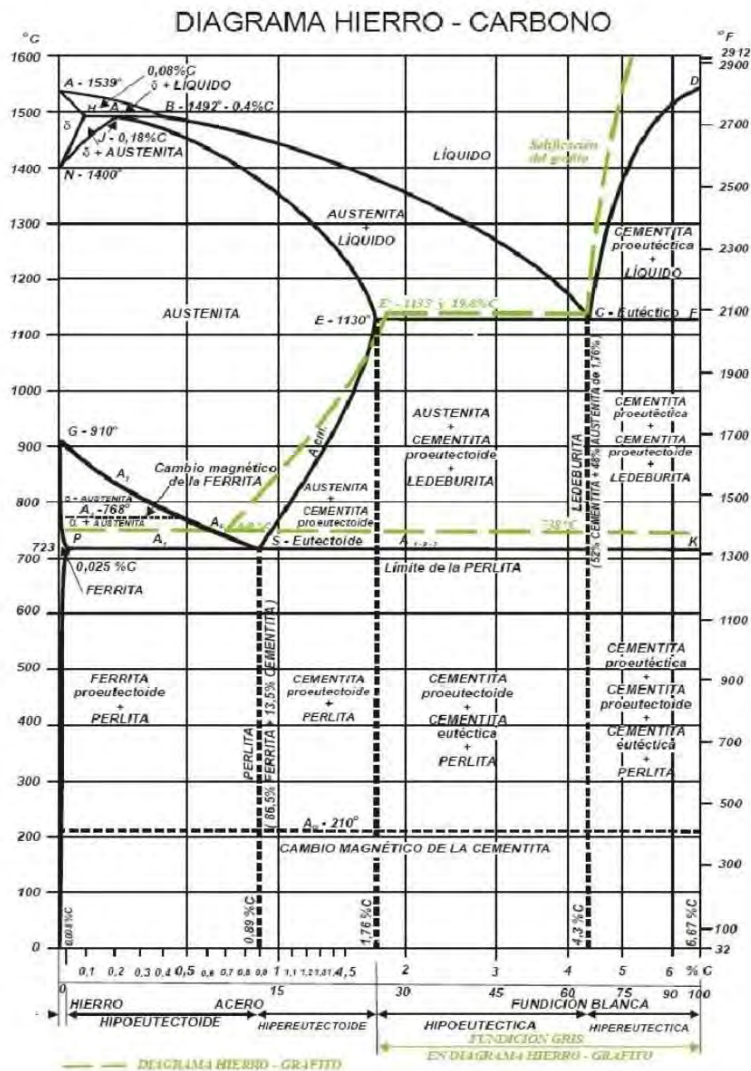
2.3 Micro-estructura del Acero

Tal como se observa en el diagrama hierro-carbono (Figura 1), el hierro presenta tres formas alotrópicas según la temperatura y el porcentaje de carbono: ferrita (α), austenita (γ) y ferrita delta (δ). Las fronteras que delimitan estas fases varían en relación a la composición química como a la temperatura, y cada una posee distinta capacidad para disgregar carbono.

En este sentido la ferrita, debido a su composición cristalina “cúbica de cuerpo centrado” (CCC), presenta una solubilidad restringida de carbono en su red atómica. La Austenita tiene estructura cristalina de caras centradas (FCC) con alta capacidad de disolver carbono, en función del contenido de Carbono, la Ferrita pasa a Austenita en temperaturas 910 °C y de Austenita a Ferrita del ataque tiene estructura cristalina CCC en temperaturas 1400°C. (Callister, 2006)

La capacidad de estas estructuras cristalinas de transformarse con la temperatura es la base de la metalurgia de los aceros. El hecho de que la austenita (FCC) pueda disolver mucho más carbono que la ferrita (CCC) es clave, ya que esta propiedad se aprovecha en el endurecimiento del acero. Al calentar el material a una temperatura donde se forma la austenita, el carbono se disuelve en su red. Posteriormente, un enfriamiento rápido atrapa el carbono en la estructura, formando martensita, una fase dura y resistente. Este control sobre las transiciones de fase permite modificar las propiedades mecánicas del acero para distintas aplicaciones, desde herramientas de corte hasta componentes estructurales que requieren una alta ductilidad.

Figura 1
Diagrama hierro-carbono



Fuente: Callister, W. 2006. Ciencia e ingeniería de los materiales: 5. ed. Rio. 589p.

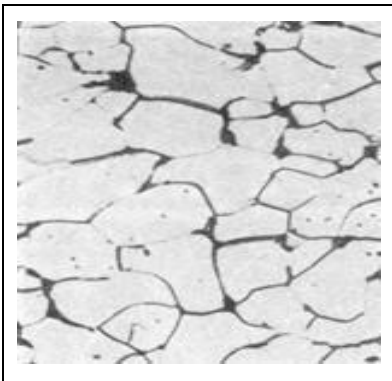
En este punto es conveniente considerar las principales estructuras metalográficas que se encuentran presentes en los aceros, ya sea por enfriamiento lento en condiciones de equilibrio o por tratamiento térmico en condiciones fuera de equilibrio. (Krauss, 2000)

2.3.1 Ferrita

Según lo que muestra el diagrama hierro-carbono, la ferrita (ver figura 3) se compone casi exclusivamente de hierro puro. Esta estructura cristalina, la cual

a temperatura ambiente se presenta como estructura solidad de carbono en hierro- α , presenta una disolución de carbono de aproximadamente 0,008 %. Es importante destacar que su solubilidad máxima alcanza el 0,025 % de carbono a un grado eutectoide de 727 °C. Además de incluir una fracción reducida de carbono en un estado de solución sólida, este componente es capaz de incorporar otro elementos provenientes del proceso productivo o añadidos deliberadamente para conformar la aleación. Por esta razón el término ferrita se utiliza para incluir cualquier solución sólida basada sobre el hierro α , para distinguirlas de aquellas soluciones sólidas de Hierro delta o Austenita. (Bhadeshia & Honeycombe, 2006)

Figura 2
Micro-grafía de la Ferrita



Fuente: Análisis Metalográfico y Termoquímico de Aceros, Robledo (1997).

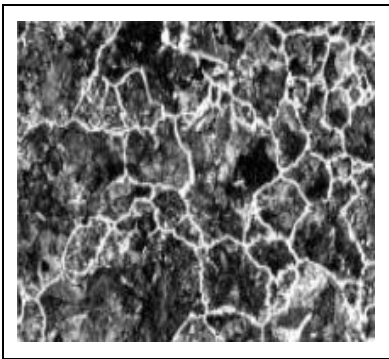
2.3.2 Cementita

El cementita (Fe_3C), ilustrada en la figura 3, es un compuesto intermetálico de hierro y carbono, caracterizado por su elevada dureza y fragilidad. Contiene un 6,69 % de carbono en peso, correspondiente a su estequiometría de tres átomos de hierro por uno de carbono. En los aceros al carbono eutectoides e hipereutectoides, el cementita forma parte integral de la perlita. En los aceros hipoeutectoides, aparece tanto como

una red continua en los límites de grano como en el interior, donde coexiste con la perlita. En todos los casos, la cementita actúa como una fase dura y altamente resistente a la abrasión, influyendo significativamente en el comportamiento mecánico del acero. En aceros aleados complejos, su relevancia se amplifica al combinarse con otros elementos de aleación para formar carburos compuestos, generando partículas de extrema dureza y resistencia al desgaste. (Steels: heat treatment and processing principles, 2000)

Figura 3

Cementita en forma de red clara en los bordes de los granos



Fuente: Análisis Metalográfico y Termoquímico de Aceros y Fundiciones, Robledo (1997).

2.3.3 Perlita

Se crean debido a reacción eutectoide (Bhadeshia y Honeycombe, 2006). La estructura perlítica (figura 4), consiste de laminillas delgadas alternas de Cementita y Ferrita, denominándose este tipo de estructura como Perlita laminar. Una microestructura completamente perlítica se alcanza cuando la composición cumple con el punto eutectoide. En aceros hipoeutectoides, la perlita se distribuye en el interior de los granos, mientras que la ferrita aparece en los bordes. En cambio, en aceros hipereutectoides, el enfriamiento iniciado en la fase austenítica genera primero cementita proeutectoide en los bordes del grano, formando una red continua. Al

reanudar el enfriamiento por debajo de los 727 °C, en el interior de los granos se forma la perlita.

Figura 4

Micrografía de la perlita



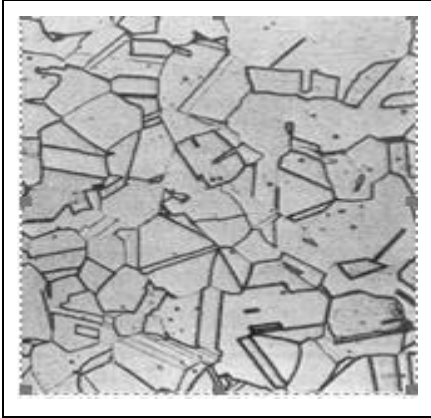
Fuente: Kraus (2000)

2.3.4 Austenita

Según Totten (2006); Krauss (2000), la austenita (figura 5) es una solución sólida de Carbono en Hierro gamma la cual ocupa en el diagrama hierro - Carbono una significativa region, con una solubilidad máxima de carbono de 2,11 % a 1148 °C. Bajo condiciones de equilibrio, no está presente a temperatura ambiente en aceros al carbono. Sin embargo, en ciertos aceros aleados —como los inoxidables austeníticos o los aceros para herramientas— puede retenerse parcialmente en la micro-estructura final.

Figura 5

Micrografía de la Austenita



Fuente: Análisis Metalográfico y Termoquímico de Aceros y Fundiciones, Robledo (1997).

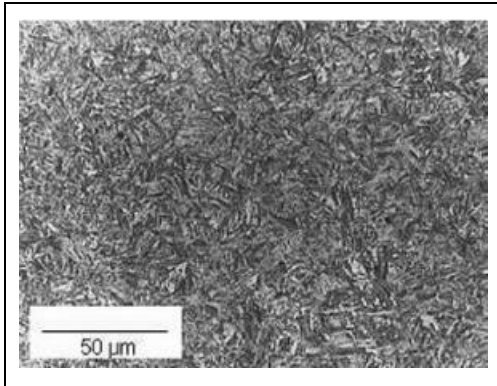
2.3.5 Bainita

La Bainita (figura 6) se puede describir como una mezcla de carburo de Hierro y Ferrita, y está formado por la nucleación y crecimiento en función de la difusión atómica (Bhadeshia & Honeycombe, 2006). La creación de bainita esta condicionada a la temperatura, generándose bainita superior a temperaturas mayores y bainita inferior o acicular a temperaturas menores. Esta fase posee una estructura fina, y se encuentra compuesta por carburos de hierro propagados en una matriz de ferrita., diferenciándose claramente de la laminar perlítica. Este refinamiento estructural es clave para aumentar la dureza del acero. Este componente le da un aspecto acicular, tanto en alta y baja temperatura de procesamiento (Teichert, 1962). La Bainita inferior se caracteriza por una excelente ductilidad y resistencia al impacto con alta dureza, en algunos casos superior a la martensita templada. (Chiaverini, 2008)

La bainita presenta mayor dureza que la perlita, debido al refinamiento de sus laminillas de ferrita y carburos. Esta dureza se incrementa a medida que la bainita se forma con una estructura más fina

Figura 6

Micrografía de Bainita que contiene agujas muy finas de Cementita



Fuente: Krauss (2000)

2.3.6 Martensita

La martensita (figura 7) es indudablemente el constituyente metalográfico más importante en los aceros. Este componente meta-estable se crea por el cambio rápido de la austenita, siempre que el enfriamiento exceda su velocidad crítica. Como resultado, es el material más duro entre todos los productos de dicha transformación, pero presenta alta fragilidad y baja ductilidad tras el temple. Por ello, requiere un tratamiento térmico posterior al revenido que mejore sus cualidades mecánicas. Estructuralmente, el material se caracteriza por ser una solución sólida sobre-saturada de carbono disuelto en hierro alfa. Se obtiene por enfriamiento muy rápido de los aceros, una vez elevada su temperatura lo suficiente para conseguir su constitución austenítica. (Totten, 2006)

La martensita adopta una morfología acicular y cristaliza en una estructura tetragonal, en contraste con la “red cúbica centrada” característica del hierro alfa. Esta modificación estructural es resultado de la distorsión generada por la inclusión de átomos de carbono en la red cristalina. Su elevada dureza se relaciona directamente con las tensiones internas inducidas por dicha deformación, de forma

similar al endurecimiento por trabajo en frío, donde los granos sometidos a tensión contribuyen al incremento de la dureza del metal. La proporción de carbono de la martensita no es constante, sin embargo, con el aumento en el contenido de Carbono aumenta dureza, resistencia mecánica y fragilidad en los aceros. (Krauss, 2000)

En términos cristalográficos, adopta la forma tetragonal distorsionada, donde los átomos de carbono se localizan en posiciones intersticiales. Su elevada dureza se atribuye principalmente al contenido de carbono, con mayor relevancia que la de los elementos de aleación presentes.

La conversión de austenita en martensita implica un incremento de volumen y ocurre de manera prácticamente instantánea, sin difusión atómica.

2.3.1.1 Revenido de la martensita

Las transformaciones que se desarrollan al calentar una martensita comprenden varias etapas, que a veces se solapan entre sí:

En la primera etapa (100° - 200° C), la martensita de estructura tetragonal rechaza el Carbono en exceso y da origen a la precipitación de un carburo denominado épsilon, de estructura hexagonal compacta y fórmula aproximada $M_{2,4}C$ (Donde “M” puede ser Fe o Cr). Conforme el carbono segrega fuera de la red cristalina, la martensita pierde progresivamente su tetragonalidad. Cuando el contenido de carbono desciende hasta aproximadamente 0,20 %, la estructura se transforma en una “red cúbica centrada en el cuerpo”, equivalente a una ferrita sobre-saturada. La variante cúbica de la martensita se identifica por su veloz oscurecimiento al ser afectada con Nital, lo que facilita su reconocimiento metalográfico

En la segunda etapa del revenido, que transcurre entre 230° C y 300° C, la austenita residual se convierte en bainita inferior a través de un mecanismo de nucleación y

crecimiento. Esta transformación puede generar una ligera dilatación del material e incluso un incremento en la dureza, especialmente cuando la cantidad de austenita retenida es significativa. Cabe destacar que la formación de bainita también puede ocurrir a temperaturas superiores, dependiendo de las condiciones térmicas y del contenido de carbono.

La tercera etapa del revenido, situada entre 300 °C y 350 °C, se distingue por una significativa reducción en la tenacidad del acero. Durante este rango térmico sucede la redisolución del carburo épsilon, seguida de la formación de cementita cilíndrica con una longitud aproximada de 200 nm. La presencia de una red casi continua de este inter-metálico la fragilidad del material se incrementa, por lo que esta franja de temperaturas se utiliza poco en el revenido de aceros templados

A partir de aproximadamente 400 °C se inicia la cuarta etapa del revenido, que se distingue por la esferoidización de partículas de cementita. Este proceso rompe continuidad del retículo, favoreciendo la re-forma y re-cristalización de la ferrita. En consecuencia, se logra un aumento significativo en la tenacidad del acero.

1. En ciertos aceros aleados con elementos como níquel, cromo y manganeso, así como en presencia de impurezas como antimonio (hasta 800 ppm), estaño (500 ppm) y fósforo (500 ppm), puede manifestarse una quinta etapa durante los revenidos a altas temperaturas. Esta fase presenta una notable reducción en la tenacidad, fenómeno conocido como fragilidad Krupp, debido a su aparición en cañones utilizados durante la Primera Guerra Mundial. Dicha fragilidad se asocia a revenidos superiores a los 500 °C, especialmente en aceros en los que las impurezas tienden a segregarse en los límites del grano

En aceros que incluyen elementos que forman carburos como el molibdeno, tungsteno, vanadio y titanio, puede observarse una sexta etapa del revenido alrededor de los

600 °C, conocida como la segunda fase de dureza. Si estos compuestos se disolvieron en la austenita antes de la etapa de temple, se disuelven en la martensita, formando una solución sólida tras el enfriamiento rápido. Durante el revenido, permanecen en solución sólida dentro de la ferrita hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 600 °C, momento en el cual precipitan como carburos finamente dispersos. Esta precipitación induce un aumento significativo en la dureza del material, a pesar del tratamiento térmico.

Como se ha mencionado previamente, los aceros que pasan por un proceso de temple y revenidos atraviesan una fase de esferoidización del cementita, lo cual genera una microestructura con precipitados finos y uniformemente distribuidos. Esta configuración, no observable mediante microscopía óptica, mejora la plasticidad del material y aumenta la resistencia a la fatiga.

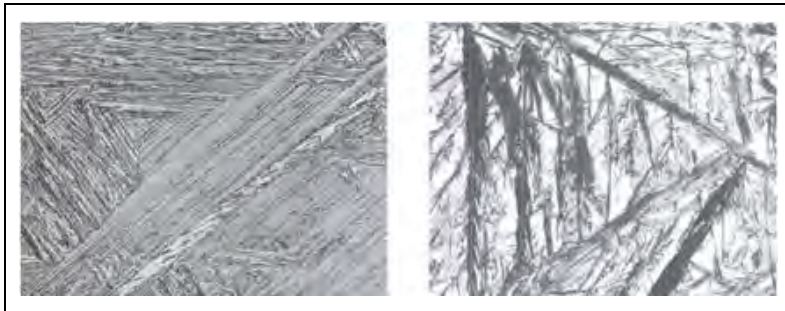
A lo largo del proceso de revenido, conforme la temperatura incrementa la dureza de la martensita se reduce gradualmente, mientras que su tenacidad mejora en sentido inverso. Los componentes de aleación que se encuentran como soluto en la red cristalina de la martensita actúan como estabilizadores térmicos, ralentizando la pérdida de dureza conforme se incrementa la temperatura. Gracias a este efecto, los aceros aleados alcanzan, dentro del rango útil de revenido, niveles de dureza y resistencia más altos a los de aceros al carbono. Además, la martensita aleada presenta una resiliencia superior, atribuible a su menor proporción de carbono, lo que la hace más apta para aplicaciones que requieren absorción de energía ante impacto. Aunque los mecanismos por los cuales los elementos aleantes estabilizan la dureza y resistencia no están completamente definidos, su influencia cuantitativa es significativa y varía según el tipo de aleante. Lo que concierne a las fluctuaciones de dimensiones que ocurren durante el revenido, estas se deben a la transiciones

de la martensita en martensita revenida implica una secuencia de contracciones y dilataciones parciales, que en conjunto resultan en una contracción volumétrica neta del material.

La martensita observada al microscopio presenta un aspecto acicular con efectos de relieve producidos por mecanismos de cizallamiento, prueba de que su formación resulta de transformaciones casi instantáneas sin difusión en ciertos planos cristalográficos de la malla de Austenita. (Krauss, 2000).

Figura 7

Micrografía de Bainita que contiene agujas muy finas de Cementita



Fuente: Krauss (2000).

2.4 Procesos de Soldadura

Clasificación según la American Welding Society, AWS

Según la norma AWS A3.0:2010, los procesos de soldadura se clasifican en etapas sucesivas, según distintos criterios. Inicialmente, distingue entre procesos de unión, que generan integración permanente de materiales, y procesos afines, como el corte y la proyección térmica, que comparten fundamentos con el soldeo sin producir unión directa.

Existen 3 tipos de unión que se subdividen según el método empleado: el adhesivo, mecánico y soldado. Las uniones soldadas, a su vez, se dividen en tres categorías según el procedimiento aplicado: por fusión, por presión, o por estado sólido.

- ✓ La soldadura por fusión, procedimiento donde se puede unir materiales a través de la combinación del metal base y el metal de aporte, ambos transformados al estado líquido en el proceso.
- ✓ Soldeo por Presión, la unión se forma aplicando una fuerza externa (presión) con o sin calor. La presión es el factor principal para lograr la unión. Un ejemplo clásico es la soldadura por resistencia, donde una corriente eléctrica pasa a través de las piezas, generando calor por la resistencia natural de los metales y, al mismo tiempo, se aplica presión.
- ✓ Soldeo en estado sólido, se basa en la interacción directa entre las superficies de los materiales, sin que estos lleguen a fundirse. La unión se logra a través de un proceso de deformación plástica, bajo condiciones de alta presión y temperatura, pero sin alcanzar el estado líquido.
- ✓ Soldeo fuerte y blando, consisten en la fusión del metal base, que permanece en estado sólido, con el metal de aportación, que se encuentra en estado líquido. El aspecto clave que distingue ambos métodos es la temperatura de fusión del material de aporte; para el soldeo fuerte, se emplean aleaciones en puntos de fusión por encima de 450 °C, mientras que para el soldeo blando se utilizan materiales cuya fusión ocurre por debajo de ese umbral.

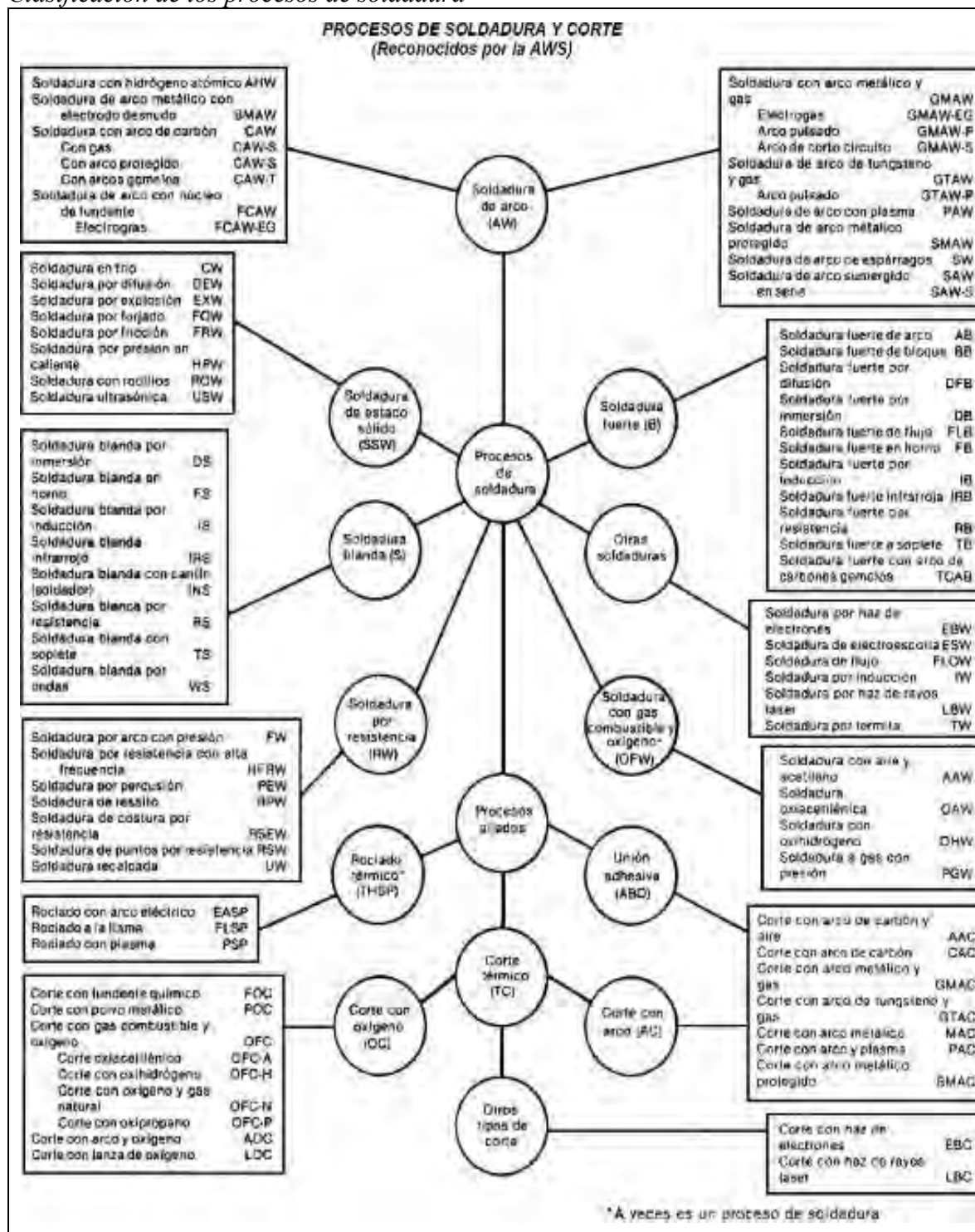
Para cada categoría del proceso, los procedimientos se segmentan aplicando de manera secuencial los siguientes criterios de clasificación:

- ✓ El tipo de energía utilizado, ya sea eléctrica, mecánica o química
- ✓ La fuente de energía, la cual puede ser un arco eléctrico, la resistencia, la radiación o el contacto directo con la llama

- ✓ La aplicación de una fuerza mecánica, considerando si esta presente o ausente en el proceso.
- ✓ Sistema de protección utilizado, que se puede incluir fundente, vacío, gas protector entre otros.

A partir de la aplicación de los criterios previamente descritos, se derivan las clasificaciones que se ilustran en la figura N.º 8

Figura 8
Clasificación de los procesos de soldadura



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

2.5 Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (SMAW)

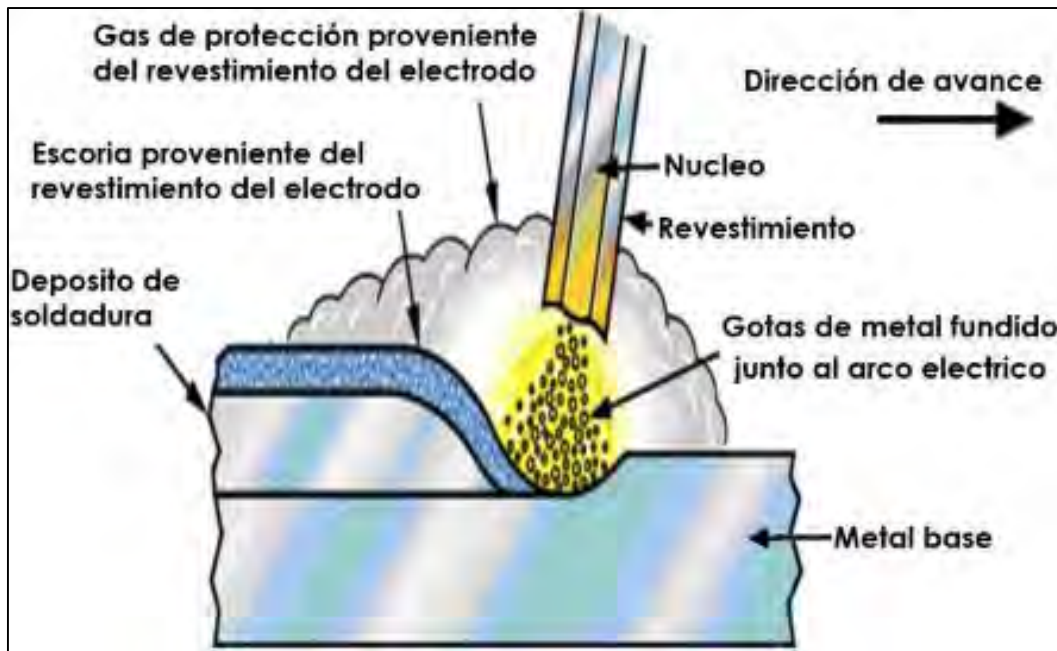
2.5.1 Definición y Antecedentes

El proceso SMAW (Soldadura por Arco con Electrodo Revestido) es una técnica de unión que utiliza un electrodo metálico consumible con un revestimiento fundente. Durante la operación, se establece un arco eléctrico que tiene lugar entre el electrodo y el material base, lo que causa derretimiento creando una unión resistente y uniforme. El revestimiento genera un gas protector y escoria que resguardan la zona soldada de contaminantes y facilitan el endurecimiento del metal de soldadura.

En la figura 9 se observa la soldadura por arco con electrodo revestido y el resto de sus componentes. (Rodríguez Pérez, 2013, pág. 37).

Figura 9

Soldadura por arco con electrodo revestido



Fuente: Soldadura y Estructura (2024).

Los primeros electrodos revestidos comenzaron a fabricarse en el año 1912. Previamente, se empleaban electrodos desnudos —sin ningún tipo de recubrimiento— que

generaban soldaduras de baja calidad y, por tanto, tenían un uso limitado. En ese período, la soldadura oxiacetilénica ofrecía mejores prestaciones y era más utilizada. Sin embargo, en pocos años, la producción en serie de electrodos revestidos permitió reducir significativamente su costo, lo que impulsó su adopción y consolidación como tecnología dominante en procesos de soldadura por arco.

Actualmente no son muy distintos de aquellos: los fabricantes han mejorado mucho la composición del alma y revestimiento, pero básicamente es un objeto heredado del siglo pasado y las técnicas de utilización son semejantes. (society, 2012)

2.5.2 Usos y Ventajas del Soldeo por Arco con Electrodos Revestidos

En el soldeo manual por arco con electrodos revestidos se pueden soldar no solo acero al carbono sino también, aceros aleados, aceros inoxidable, fundiciones de hierro y algunos metales más como aluminio, cobre, níquel.

➤ Ventajas:

- ✓ Apto para soldar en exteriores (sin lluvia o viento fuerte) y en interiores.
- ✓ Equipos económicos y portátiles, más cómodos que otros procesos manuales.
- ✓ El revestimiento elimina la necesidad de gases o sistemas auxiliares.
- ✓ Útil en soldaduras exigentes como recipientes y tuberías de alta presión.
- ✓ Funciona en espesores desde 1,5–2 mm hasta más de 30 mm.
- ✓ Versátil por la variedad de electrodos disponibles.
- ✓ Operable en cualquier posición, sin requerir refrigeración ni suministro de gases, ideal para zonas remotas. (society, 2012)

➤ Limitaciones:

- ✓ No es adecuado para metales altamente sensibles al oxígeno, como titanio, circonio o tántalo, ya que los gases del revestimiento no brindan suficiente protección.

- ✓ No permite soldar metales con una baja temperatura de fusión, como plomo, estaño o zinc, empleando un electrodo
- ✓ Su baja tasa de deposición hace que sea un proceso lento y al tiempo requerido para retirar la escoria.
- ✓ Requiere alta destreza técnica por parte del operador.
- ✓ No se recomienda para espesores menores a 1,5 mm.
- ✓ A diferencia de los procesos con electrodo continuo (como MIG/MAG o alambre tubular), este método tiene una tasa de deposición inferior, ya que el electrodo debe reemplazarse al alcanzar su longitud mínima residual (aproximadamente 50 mm).
- ✓ Aunque en teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1.5 mm en el proceso. (society, 2012)

2.5.3 Principios del Proceso

Para lograr la unión, se concentra el calor de un arco eléctrico establecido entre los bordes de las piezas a soldar y una varilla metálica, llamada electrodo, produciéndose una zona de fusión que, al solidificarse, forma la unión permanente.

En el instante en que la punta del electrodo queda en contacto con el material, el circuito se activa de forma momentánea. Después, el electrodo se retira hasta mantener una distancia controlada de 1,5 a 3 mm, lo que permite la formación del arco eléctrico. El calor funde un área restringida del material base y la punta del electrodo, formando pequeños glóbulos metálicos, cubiertos de escoria líquida, los cuales son transferidos al metal base por fuerzas electromagnéticas, con el resultado de la fusión de dos metales y su solidificación a medida que el arco avanza (AWS, 2020), según puede verse en la figura 10. Para dar inicio a la formación del arco, se desliza el electrodo sobre la superficie del material base, se genera una chispa que produce temperaturas cercanas a los 5000 °C. Esta energía provoca la fusión

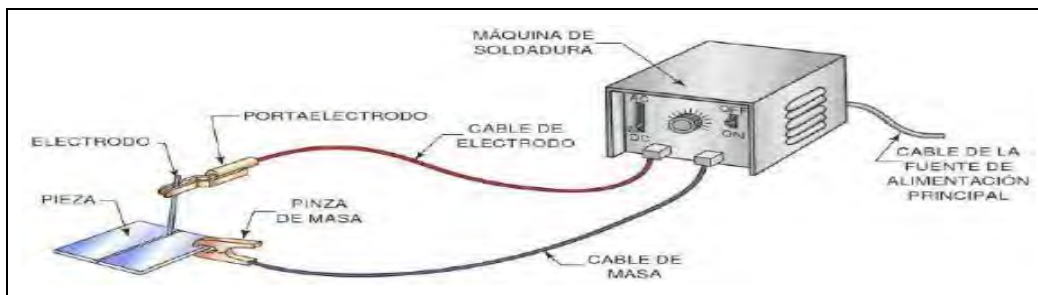
tanto del electrodo como dicha superficie que toca en su desplazamiento. A medida el electrodo se consume, el operador desplaza el material fundido que fluye durante la unión, creando el cordón de soldadura.

Mientras el procedimiento de la soldadura avanza, el calor se disipa a través del metal base, que resulta en la disminución de temperatura a un valor inferior al de fundición. Esto causa que la porción del baño de fusión que ya no está expuesta al arco comience a solidificarse, dando lugar a la formación del cordón de soldadura

A lo largo del proceso de soldadura, el electrodo va fundiéndose progresivamente, formando mínimas partículas líquidas que se fusionan con el baño de fusión, Esto termina una vez que el electrodo se consume por completo.

Al circular una corriente eléctrica por un material conductor, se genera calor debido al efecto térmico. Paralelamente, Los gases generados por el recubrimiento del electrodo actúan como un escudo protector para el baño de soldadura, evitando así la exposición al oxígeno y nitrógeno del aire. El revestimiento contiene un alma o núcleo, una varilla cuya composición debe ser igual a la del metal base y que puede presentar diferentes longitudes y diámetros (society, 2012).

Figura 10
Diagrama del proceso SMAW

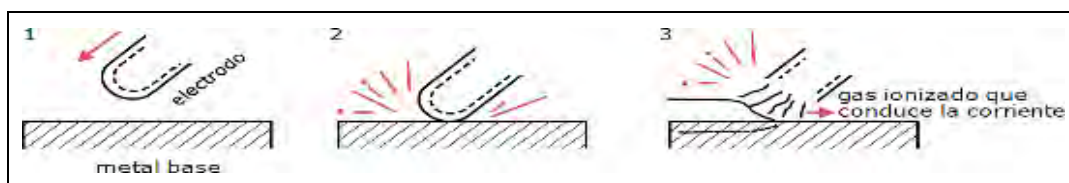


Fuente: Alonso, C. (2012). Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto. Cano Pina Ceysa.

La fuente de calor principal se genera mediante el arco eléctrico en varios métodos de soldadura, generando elevadas concentraciones de energía térmica y radiación. Consiste en una descarga intensa de corriente que a partir del electrodo y recorre a la pieza, por medio de los gases que se desprenden del revestimiento. Cuando se frota el electrodo contra el metal, el calor ioniza el gas, haciéndolo conductor. Una vez que el electrodo se retira, el gas ionizado facilita el flujo de corriente y se establece el arco. La existencia de elementos de fácil ionización, como el sodio y el potasio, en el revestimiento favorece esta ionización. Este gas conductor se denomina columna de plasma, y la corriente consiste en electrones que viajan desde el cátodo (polo negativo) hasta el ánodo (polo positivo) del equipo de soldadura, como se muestra en la figura 11 (society, 2012).

Figura 11

Gas ionizado para la conducción de corriente



Fuente: (Marcos. 2005)

2.5.4 Transferencia Metálica

Durante la fusión del electrodo, se generan gotas de metal fundido junto con el revestimiento, cuyo tamaño varía según el tipo de electrodo y la corriente utilizada. La dimensión de estas partículas líquidas afecta la calidad del cordón de manera directa: las gotas finas favorecen un arco más estable y cordones más uniformes, especialmente en soldadura con corriente alterna, además de acelerar el proceso. En cambio, las gotas gruesas tardan más en fundirse, lo que permite su uso en aberturas amplias o en soldaduras verticales descendentes, donde se requiere mayor control del aporte.

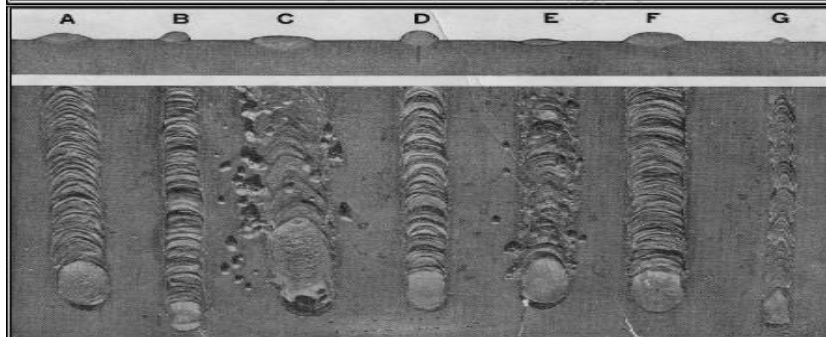
2.5.5 Variables del Proceso

Los parámetros controlables en los procesos de soldadura son aquellos que se ajustan para hacer óptimo el proceso. Para lograr resultados de calidad, es fundamental comprender cómo cada variable influye en las propiedades y características del procedimiento, según se presenta en la Figura 12

Figura 12

Propiedades en diferentes condiciones del acero y la soldadura

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



Fuente: Oerlikon (2008)

De acuerdo con Gómez (2021), las variables que permiten un control continuo o una medición sencilla son más eficaces como parámetros de control frente a aquellas que no pueden medirse directamente o solo modificarse de forma indirecta. Para iniciar el proceso de soldadura, resulta imprescindible establecer de antemano algunas de estas variables, denominadas:

2.5.5.1 Variables preseleccionadas

Algunas de estas variables son el diámetro y la composición química del alambre-electrodo. Para elegir los parámetros de soldadura de forma adecuada hay que considerar

aspectos como el tipo y calibre del material, la posición de trabajo, el modo de transferencia metálica que se necesita y las propiedades mecánicas que se desean conseguir.

2.5.5.2 Variables primarias

Tras definir las variables preseleccionadas, las variables operativas regulan aspectos tales como la geometría del cordón, la estabilidad del arco y las condiciones de soldeo, las cuales incluyen la velocidad de alimentación y el volumen de material depositado. Estas variables afectan directamente la calidad final de la unión. Entre ellas se incluyen la tensión de arco, la corriente de soldadura y la velocidad de avance (AWS, 2020).

2.5.6 Variables en el proceso SMAW.

Con el fin de llevar a cabo una soldadura de manera correcta, es necesario identificar y ajustar previamente diversas variables que tienen un impacto directo en la evolución y la calidad del proceso de unión.

a) Diámetro del electrodo

En general, la mejor opción es usar el mayor diámetro de electrodo que sea factible, considerando el calibre del material, la estructura de soldadura y el tipo de unión, debido a que estos valores determinan dicha elección. Esto permite lograr una mayor deposición de material a lo largo del proceso. Existe una relación directa del aporte térmico con el flujo de corriente, parámetros como la tensión del arco y la rapidez de desplazamiento, todos ellos influenciados por las dimensiones del electrodo.

Un mayor tamaño resultara en un aumento del aporte térmico. Por lo tanto, en aplicaciones o materiales que requieren bajo aporte de calor, se recomienda el uso de electrodos de menor diámetro. En términos generales, se deben usar:

- ✓ En aplicaciones donde se requiere un bajo aporte térmico, como el punteado, La soldadura de piezas de espesor reducido, las primeras pasadas en soldaduras múltiples o trabajos en posición cornisa, vertical y bajo techo, se recomienda utilizar electrodos de pequeño diámetro (2,0 – 2,5 – 3,25 y 4,0 mm), ya que estos permiten mayor control térmico y mejor adaptación a condiciones de acceso limitado o geometrías complejas.
- ✓ Para uniones de piezas de espesor medio o grueso, así como en soldaduras en disposición plana y trabajos de recargue, se recomienda el uso de electrodos de mayor diámetro, ya que permiten un mayor aporte de material y una mayor eficiencia en procesos de alta demanda térmica
- ✓ La utilización de grandes diámetros puede dar lugar a un cordón de soldadura excesivo, innecesario y costoso económicamente, pudiendo también actuar como concentrador de tensiones debido a un perfil inadecuado. (AWS, 2020)

b) Intensidad de soldeo

Esta variable resulta esencial porque controla la cantidad de calor suministrado durante el proceso. Por ejemplo, al usar electrodos de diámetro pequeño, se precisan corrientes de menor intensidad, lo que disminuye el calor aplicado. La intensidad de corriente debe regularse dependiendo del tipo de unión y la postura en la que se va a soldar para asegurar una fusión correcta sin afectar la calidad del cordón. Una vez que el arco se ha establecido, es posible modificar la intensidad según el tipo de baño de fusión generado.

- ✓ Un cordón de gran tamaño puede indicar un exceso de intensidad de corriente, por lo que será necesario ajustarla a la baja para evitar sobrecalentamiento y defectos en la soldadura.

- ✓ Cuando el baño de fusión es reducido, suele indicar una intensidad insuficiente, por lo que será necesario incrementar el valor de corriente para asegurar una correcta penetración y estabilidad del arco. (AWS, 2020)

Cada electrodo, en función de su diámetro, posee un rango de intensidades en el que puede utilizarse, en ningún caso se deben utilizar intensidades por encima de ese rango ya que se producirían mordeduras, proyecciones, intensificación de los efectos del sopleo magnético e incluso grietas. (AWS, 2020)

c) Longitud de arco

La longitud del arco es la distancia entre la punta del electrodo y el metal que se va a soldar. Esta distancia del arco se determina por las dimensiones del electrodo, la orientación de soldadura y la intensidad aplicada. Como regla general, debe mantenerse una distancia equivalente al diámetro del electrodo, salvo en el caso de electrodos de tipo básico, donde se recomienda una longitud de arco-equivalente a la mitad de su diámetro

Resulta crucial que la longitud del arco se mantenga constante para prevenir variaciones en el voltaje y la intensidad de la corriente, lo cual podría generar una penetración irregular en la soldadura. Un arco excesivamente corto tiende a ser inestable, con la posibilidad de que se produzcan cortocircuitos mientras se transfiere el metal. En contraste, un arco que es demasiado largo se vuelve menos preciso e intenso y reduce la eficacia del gas protector y del fundente generado por el revestimiento del electrodo. Esto puede resultar en la contaminación del cordón y en la creación de porosidad a la presencia de oxígeno e hidrógeno, comprometiendo la calidad del depósito metálico.

d) Velocidad de soldeo

No hay una ecuación precisa que pueda determinar la velocidad de desplazamiento,

puesto que esta está sujeta a la destreza del soldador, quien debe lograr un equilibrio apropiado entre su ritmo de avance y los demás parámetros del proceso. Sin embargo

- ✓ 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). (Gómez, 2021)
- ✓ Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases (produciéndose poros). (Mejías, 2020)
- ✓ Una velocidad de desplazamiento reducida provoca la creación de un cordón con un perfil ancho y convexo, con penetración limitada. La causa de esto es que el arco permanece demasiado tiempo sobre el metal ya solidificado generando el denominado efecto “colchón”, en el cual la energía se disipa en el material de aporte en lugar de concentrarse adecuadamente en el metal base, afectando la eficiencia térmica y la calidad de la unión

“En la práctica, hay que intentar que el arco vaya ligeramente adelantado al baño, pero depende de la posición de soldadura”. (Gómez. 2021)

Corriente de soldadura

La elección del electrodo que se usara es el componente principal para establecer la corriente de la soldadura, Debido a que este condiciona tanto el tipo de alimentación eléctrica como el equipo requerido. El primer aspecto a considerar es la accesibilidad de corriente en la zona de trabajo.

A pesar de que la “corriente continua” (CC) es la más usada en aplicaciones de soldadura, existe una creciente variedad de electrodos que también pueden utilizarse con

“corriente alterna” (CA), lo que amplía las opciones de configuración. De acuerdo con las condiciones de operación y las exigencias del proceso. En la tabla 2, se da la comparación entre la corriente continua y corriente alterna. (AWS, 2020) “Desde el punto de vista de los costes de soldadura, la CA es más barata, pero como este factor tiene cada vez menos importancia en el coste total, no tiene relevancia a la hora de seleccionar el tipo de corriente”. (Mejías, 2020)

Tabla 2

Comparación entre corriente continua y corriente alterna

Parámetro	Corriente Alterna	Corriente Continua
Cebado de arco	No es fácil especialmente en diámetros pequeños, se debe aplicar sustancias para facilitar el cebado, en la superficie de la unión.	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	Dado que la caída de tensión es mínima, este sistema resulta especialmente adecuado para realizar soldaduras en puntos alejados de la fuente de alimentación, sin comprometer la estabilidad del arco ni la calidad del cordón.	Utilizar cables lo más cortos posible, ya que una mayor longitud incrementa la resistencia eléctrica y provoca una caída significativa 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 El efecto es muy acusado, especialmente cerca de los bordes o de más.
Soplo magnético	Prácticamente inexistente.	Aumenta con la intensidad

Fuente: Gómez (2021)

De manera más general, pueden identificarse las ventajas y limitaciones características asociadas a cada tipo de corriente utilizada en soldadura, lo que permite orientar su selección según las condiciones operativas y los requisitos del proceso.

- ✓ La corriente continua (CC) es compatible con todos los tipos de electrodos, mientras que la corriente alterna (CA) presenta limitaciones de compatibilidad según el tipo de revestimiento.
- ✓ La soldadura en chapas delgadas resulta más compleja cuando se utiliza corriente alterna, debido a la menor estabilidad del arco.
- ✓ Los transformadores son más económicos que los rectificadores equivalentes, ofrecen mayor eficiencia energética y presentan mínimas pérdidas en circuito abierto, en comparación con convertidores o rectificadores

En procesos con corriente alterna (CA), el efecto de soplo magnético es prácticamente nulo, lo que contribuye a una mayor estabilidad direccional del arco en ciertas condiciones operativas. “Actualmente existen electrodos en los que, salvo para altas intensidades, este efecto es relativamente pequeño”. (AWS. 2020). Adicionalmente, es esencial considerar que el equipo de soldadura debe tener la capacidad de suministro de corriente adecuada al diámetro del electrodo seleccionado. Como referencia práctica, la intensidad necesaria puede estimarse mediante la ecuación 1, la cual permite ajustar los parámetros eléctricos al tipo de electrodo utilizado.

$$I = k \times (d - 1) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

I: Intensidad de corriente (Amp)

d: Diámetro de corriente (Amp)

k: Constante que depende del tipo de electrodo (Amp/mm)

La tabla 3 presenta los valores de la constante, establecidos según el tipo de electrodo utilizado, lo que permite ajustar correctamente la intensidad de la corriente de

soldadura, la cual varía por las dimensiones del electrodo.

Tabla 3

Valor de la constante k

Valor de k (Amp/mm)	Tipo de electrodo
55	Oxidante, básico, rutilo delgado
60	Ácido y rutilo medio
70	Gran rendimiento

Fuente: SWEISS (2025)

Si bien la fórmula y tabla de valores de la constante k , aunque corresponden a literatura pasadas, se ajusta mejor a electrodos de pequeños diámetros, es por esta razón que se sigue usando. En relación a la polaridad en la corriente continua (CC), Para su selección, se debe considerar tanto el material base como el tipo de electrodo utilizado. No obstante, es importante destacar que la polaridad inversa suele proporcionar una mayor penetración en el cordón de soldadura.³

2.6 Posiciones de Soldeo en las Juntas Soldadas

De acuerdo con las figuras 13, 14 y 15 las distintas orientaciones de soldadura definidas conforme a las especificaciones de las normas EN ISO 4063 y AWS A3.0, facilitando su identificación y clasificación en función del tipo de junta y orientación espacial.

La importancia de esta clasificación trasciende la mera identificación. Cada posición de soldadura presenta retos únicos para el soldador, afectando directamente la aplicación del material de aporte y la formación del cordón de soldadura. Por ejemplo, la soldadura en posición sobre cabeza (posición 4G en AWS o PE en ISO) es considerada una de las más difíciles debido a la fuerza de la gravedad, que tiende a hacer que el metal fundido gotee, requiriendo un control meticuloso para asegurar una buena penetración y un acabado sin defectos. En contraste, la posición plana (1G en AWS o PA en ISO) es la más sencilla, ya que la gravedad ayuda a que el metal fundido se deposite de manera uniforme, permitiendo

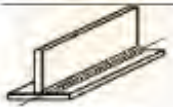
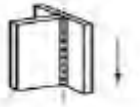
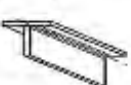
una mayor velocidad de soldadura. Comprender estos desafíos es crucial para seleccionar el método, el equipo y la calificación del soldador adecuados para cada aplicación específica.

Tabla 4
Posiciones de soldadura en chapas a tope

Norma (EN ISO 4063)	Norma (AWS A3.0)	Descripción técnica	Croquis
PA	1G	Chapa horizontal – Soldadura plana	
PC	2G	Chapa vertical – Soldadura en comisa	
PF	3G ascendente	Chapa vertical – Soldadura vertical ascendente	
PG	3G descendente	Chapa vertical – Soldadura vertical descendente	
PE	4G	Chapa horizontal – Soldadura bajo techo	

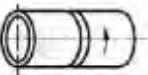
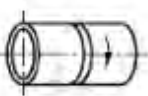
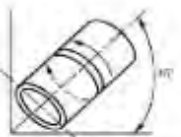
Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

Tabla 5
Posiciones de soldadura en chapas en ángulo

Norma EN ISO 4063	Norma AWS A3.0	Descripción técnica	Croquis
PA	1F	Chapa inclinada 45°. Soldadura plana acunada.	
PB	2F	Chapa horizontal. Soldadura en rincón.	
PF	3F ascendente	Chapa vertical. Soldadura vertical ascendente.	
PG	3F descendente	Chapa vertical. Soldadura vertical descendente.	
PD	4F	Chapa horizontal. Soldadura bajo techo.	

Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

Tabla 6
Posiciones de soldadura en tubos a tope

Norma EN ISO 4063	Norma AWS A3.0	Descripción técnica	Croquis
PA	1G	Tubería horizontal rotando – Soldadura plana	
PC	2G	Tubería vertical fija – Soldadura en cornisa	
PH	5G ascendente	Tubería horizontal fija – Soldadura plana, vertical ascendente y bajo techo	
PJ	5G descendente	Tubería horizontal fija – Soldadura plana, vertical descendente y bajo techo	
H-L045	6G ascendente	Tubería fija inclinada a 45° – Soldadura en todas las posiciones (plana, vertical, techo)	

Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

2.7 Tipos de Juntas

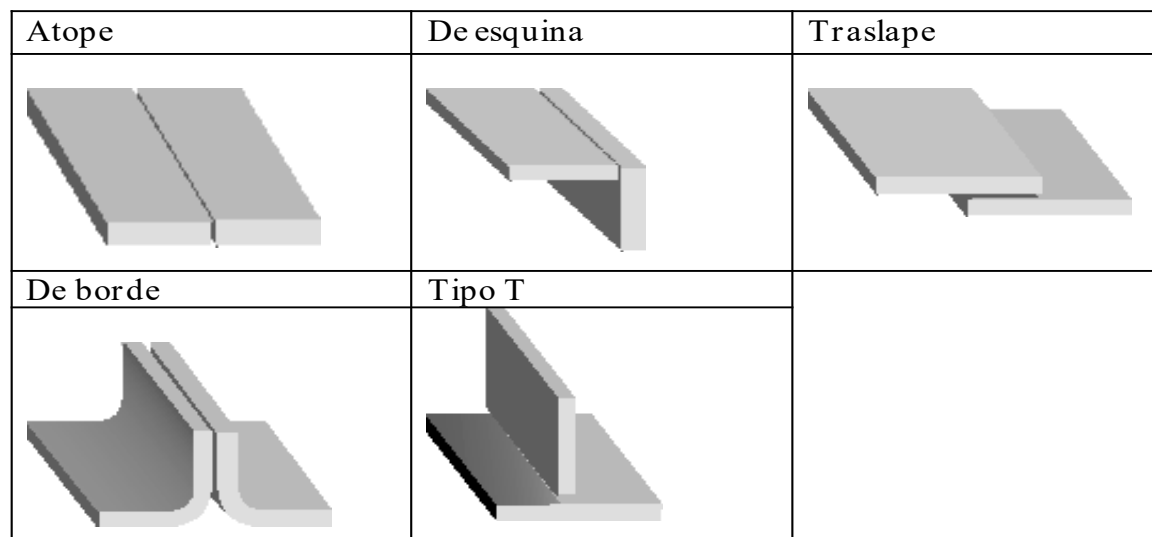
Al posicionar las piezas de acero para formar una junta, estas pueden adoptar una de cinco configuraciones básicas, tal como se representa en la Figura 16, según los criterios de diseño y tipo de unión requerida. Los tipos de juntas son las descripciones de posiciones relativas de los materiales que van a ser unidos y no implica un tipo específico de soldadura. (Masabanda, 2009)

La correcta selección del tipo de junta es un paso crítico en el diseño de cualquier estructura soldada, ya que determina no solo la forma en que los componentes se unirán, sino también la distribución de las tensiones y el rendimiento mecánico de la unión. Por ejemplo, una junta a tope se usa frecuentemente cuando las piezas están en el mismo plano y se

necesita que el espesor del material se mantenga constante a lo largo de la unión, como en tuberías o recipientes a presión.

En cambio, una junta de solape se prefiere cuando se requiere mayor área de contacto entre las piezas para distribuir las cargas de manera más amplia. Otras configuraciones como la junta de esquina, la junta en T o la junta de borde se eligen en función de la geometría de la estructura y de las fuerzas que esta deberá soportar, demostrando que la elección de la junta va de la mano con la integridad estructural y la seguridad del conjunto soldado.

Figura 13
Tipos de junta



Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

2.8 Zonas Metalúrgicas de la Soldadura

En soldadura se puede identificar las zonas principales siguiente: (AWS, 2020). La tabla presentada permite identificar de forma clara y estructurada las cinco zonas fundamentales que conforman una unión soldada, cada una con características metalúrgicas y funcionales distintas. Esta clasificación es especialmente relevante en procesos como

SMAW sobre aceros bonificados, donde el control térmico y la selección adecuada del electrodo son determinantes para evitar defectos críticos.

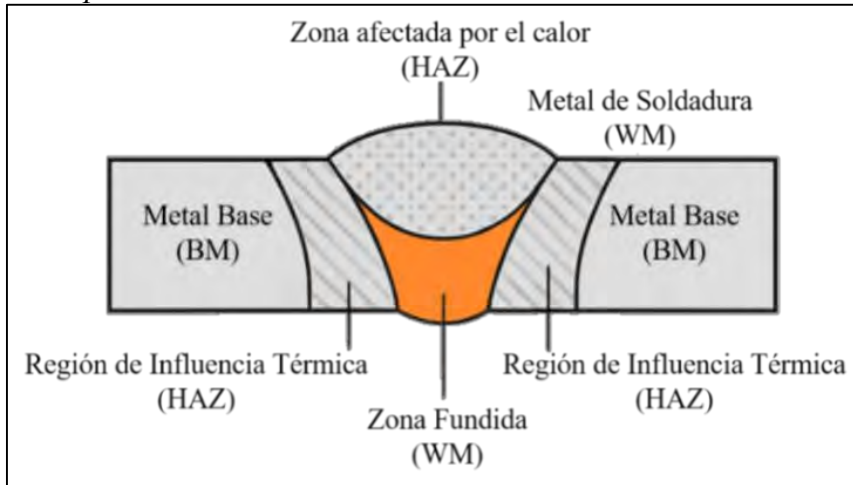
Tabla 7
Zona de una Unión Soldada

No	Símbolo	Nombre de la zona	Descripción técnica
1	BM	Metal base	Material original que no ha sido afectado térmicamente ni modificado por la soldadura.
2	HAZ	Zona afectada por el calor	Región del metal base que ha sufrido cambios microestructurales por el calor del proceso, sin llegar a fundirse.
3	FZ	Zona fundida	Área donde el metal base y el metal de aporte se han fundido y solidificado.
4	WM	Metal de soldadura	Material depositado por el electrodo o alambre, que forma el cordón de soldadura.
5	IR	Región de influencia térmica	Subzona dentro de la HAZ donde ocurren transformaciones metalúrgicas críticas.

Fuente: Elaboración propia

La “zona afectada por el calor” (HAZ) constituye la superficie con mayor vulnerabilidad desde la perspectiva metalúrgica, debido a que puede experimentar cambios en su micro-estructurales, como la formación de martensita en aceros como el AISI 4140, especialmente si no se implementan procedimientos adecuados de pre-calentamiento y post-calentamiento. Por otro lado, la zona fundida (FZ) y el metal de soldadura (WM) deben garantizar integración química y mecánica con el metal base, lo que implica una correcta elección del material de aporte, como por ejemplo el electrodo E8018-B2.

Dentro de la HAZ, la región de influencia térmica (IR) es especialmente crítica para evaluar parámetros como la dureza, tenacidad y la potencial aparición de fisuras, por lo cual debe ser sometida a inspección meta-lográfica y a ensayos destructivos o no destructivos que aseguren la integridad y confiabilidad de la unión soldada. (AWS, 2020)

Figura 14*Principales zonas de la soldadura*

Fuente: Elaboración propia

La imagen presenta las cinco zonas clave de una unión soldada según AWS A3.0 y EN ISO 6520, fundamentales para comprender los cambios térmicos y metalúrgicos en aceros como el AISI 4140. El Metal Base (BM) es el material original sin alterar, cuya integridad requiere control térmico. La “Zona Afectada por el Calor” (HAZ) resulta crucial, como experimenta transformaciones tales como la formación de martensita o pérdida de tenacidad si no se aplican correctamente los procedimientos de pre-calentamiento y post-calentamiento. La Zona Fundida (FZ), núcleo de la unión, Es la zona donde se funde el metal base y el material de aporte.

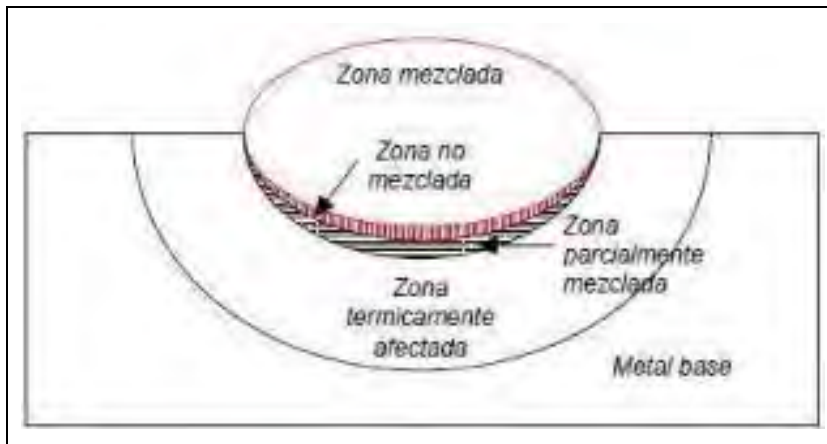
El Metal de Soldadura (WM) debe ser químicamente compatible con el BM para evitar problemas de disolución y fisuración. La Región de Influencia Térmica (IR), aunque estrecha, concentra los gradientes térmicos más severos y es clave para el análisis de dureza y micro-estructura.

La correcta identificación y comprensión de estas zonas permite optimizar parámetros de soldadura, seleccionar electrodos adecuados y definir criterios de inspección y calidad conforme a normas como AWS D1.1, ASME IX e ISO 15614.

a) Zona de fusión

“Es la zona formada solamente por el metal que se solidifica desde el estado líquido. Durante la fusión se producen transformaciones químicas, físicas y estructurales. Se diferencian tres regiones en la zona de fusión”, ver la figura 15. (Fosca, 2007)

Figura 15
Regiones de la zona de fusión



Fuente: Pérez Cargua & Pullas Rea (2009)

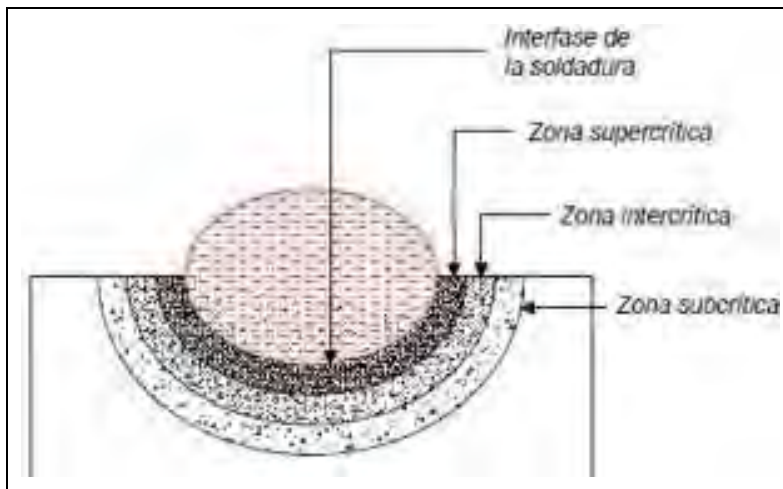
- ✓ Zona mezclada: Corresponde a la porción predominante del cordón de soldadura, formada por la fusión integral entre la base y el metal de aporte dentro del baño de soldadura, lo que garantiza la cohesión estructural de la unión.
- ✓ Zona no mezclada: Es una capa adyacente a la línea de fusión. (Pérez Cargua & Pullas Rea, 2009, pág. 57)
- ✓ Zona principalmente fundida: Está ubicado en el metal base. Esta región corresponde a la transición entre la ZAC y la ZF. (Fosca, 2007)

b) Zona Afectada por el Calor

Debido a la exposición a temperaturas suficientemente altas, esta zona experimenta cambios micro-estructurales en estado sólido. Las transformaciones micro-estructurales que genera la acción térmica tienen una influencia notable en las características mecánicas y metalúrgicas de la junta soldada. Para los aceros, la “zona afectada por el calor” (ZAC ó HAZ) se clasifica en tres áreas distintas: super-crítica, inter-crítica y sub-crítica, cada una determinada por el rango de temperatura alcanzado durante el proceso. Estas regiones se representan en la figura 19, donde se presentan los efectos térmicos en el metal base.

Figura 16

Regiones de la zona afectada por el calor



Fuente: Pérez Cargua & Pullas Rea (2009)

“En ese sentido, el tamaño de la ZAC es una indicación de la magnitud de cambios estructurales. Para predecir las propiedades de esta zona, debe conocerse la cantidad, magnitud y crecimiento del grano y el ciclo térmico de la soldadura”. (Fosca, 2007)

Asimismo, en las zonas super-crítica se distinguen sub-zonas específicas: una correspondiente al crecimiento de grano, donde las altas temperaturas favorecen el aumento del tamaño de los cristales, y otra asociada al refinamiento de grano, caracterizada por una

re-estructuración que reduce su dimensión, mejorando ciertas propiedades mecánicas del material.

c) El Metal Base

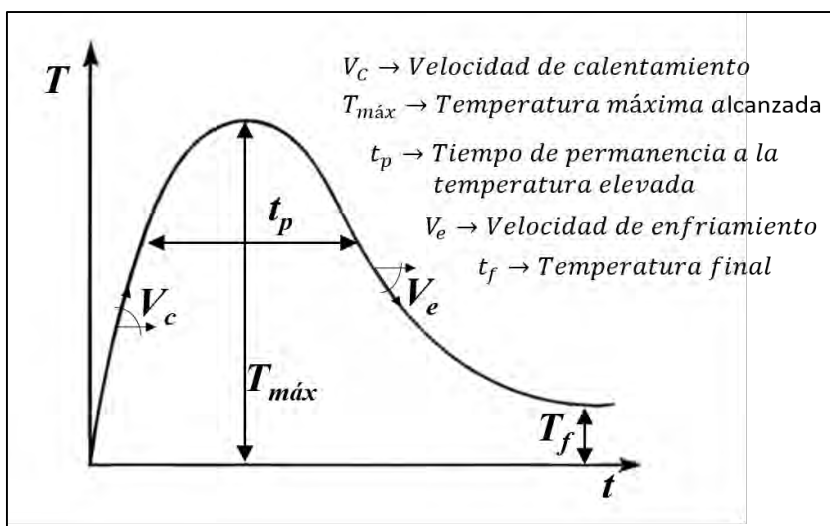
Es el material original sobre el cual se realiza la soldadura y que no ha sufrido fusión durante el proceso. Sin embargo, puede experimentar alteraciones térmicas en las zonas adyacentes a la junta, conocidas como la “Zona Afectada por el Calor”. El material base aporta la resistencia estructural principal e influye en gran medida en las características mecánicas, químicas y metalúrgicas de la unión soldada

2.9 Ciclo Térmico de la Soldadura

Se conoce “ciclo térmico” a la fluctuación de la temperatura en un periodo determinado de tiempo en una zona del metal base adyacente a la soldadura. Esta variación térmica, que influye directamente en los cambios micro-estructurales y tensionales del material, están establecidas en la figura 17.

Figura 17

Ciclo térmico de la soldadura



Fuente: Elaboración propia

Los parámetros fundamentales que caracterizan un “ciclo térmico” serían los siguientes:

- ✓ Temperatura inicial (T_0): Corresponde al valor térmico de partida en el punto analizado del metal base antes de la aplicación del calor.
- ✓ Velocidad de calentamiento: Representa la pendiente ascendente de la curva térmica desde T_0 en procesos de soldadura, esta velocidad suele ser considerada alta, alcanzando valores aproximados desde $^{\circ}\text{C}$ por segundo.
- ✓ Temperatura máxima o pico térmico (T_{max}): Es la temperatura más elevada registrada en un punto específico del metal base. Este parámetro es clave para determinar la posibilidad de que ocurra transformaciones micro-estructurales.
- ✓ Velocidad de enfriamiento: Se define como la pendiente descendente de la curva térmica a partir de una determinada temperatura. Este parámetro es importante en la determinación de micro-estructuras en materiales como los aceros estructurales comunes, que pueden sufrir transformaciones de fase durante el enfriamiento. (AWS, 2020).

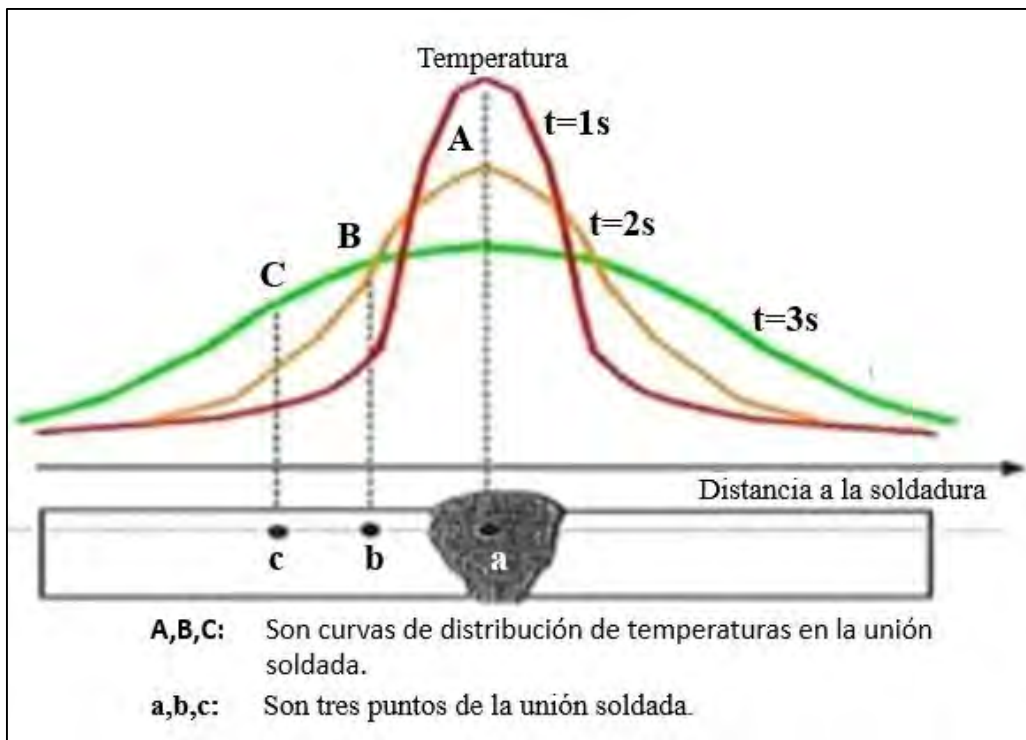
Es preciso señalar que el ciclo térmico es único para cada punto, dada la heterogeneidad térmica existente en el soldeo, que se deriva de la aplicación de una fuente (A.Garcia, 2010, pág. 78). En consecuencia, cada sección del componente experimenta un ciclo térmico específico, determinado principalmente por su ubicación respecto a la zona de soldadura, además de otras variables como la geometría de la pieza y los parámetros del proceso térmico.

Adicionalmente, es factible construir una curva de temperatura-distancia desde el análisis conjunto de los ciclos térmicos correspondientes a distintos puntos del metal base. Como se presenta en la Figura 18 es visible como varia la temperatura en relación a la distancia de la fuente de calor.

“Estas curvas representan la repartición térmica en un instante de tiempo determinado”. (García, 2010).

Figura 18

Distribución de temperatura del ciclo térmico



Fuente: Elaboración propia

La figura ilustra como varia la distribución térmica en una unión soldada mediante tres curvas de temperatura, identificadas como A, B y C, que corresponden a los instantes $t = 1\text{ s}$, $t = 2\text{ s}$ y $t = 3\text{ s}$, respectivamente. En la curva A, correspondiente al primer segundo, se observa el pico térmico más alto, concentrado en el centro de la soldadura, lo cual señala el momento de máxima aportación de calor al material. Con el avance del tiempo, la curva B (t

= 2 s) refleja una disipación progresiva del calor, evidenciada por un ensanchamiento del perfil térmico y una disminución de la temperatura máxima.

Finalmente, la curva C ($t = 3$ s) muestra una distribución térmica más homogénea y extendida, con valores de temperatura significativamente menores en toda la sección, representando el proceso de enfriamiento del conjunto soldado.

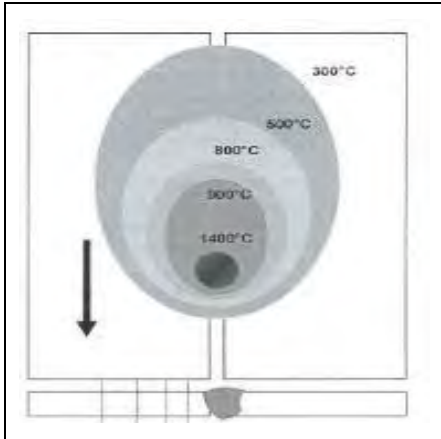
Respecto a los puntos señalados en el esquema inferior, a, b y c, estos corresponden a zonas específicas dentro de la junta soldada. El punto (a) se encuentra en el centro del cordón de soldadura, establecida como Zona Fundida (FZ), donde se alcanzan las temperaturas máximas y se producen transformaciones metalúrgicas intensas. El punto (b) se encuentra en la “Zona Afectada por el Calor” (HAZ), en la cual dichas temperaturas son lo suficientemente elevadas para inducir modificaciones micro-estructurales sin llegar a la fusión.

Finalmente, el punto (c) representa el Metal Base (BM), alejado del centro térmico, con temperaturas reducidas que no provocan alteraciones significativas en la micro-estructura. La Figura N.º 19 presenta las curvas isométricas correspondientes al proceso de soldadura a tope. Tanto la distribución térmica como las trayectorias isométricas están influenciadas por varios factores que:

El baño fundido funciona como el principal foco térmico de carácter más permanente. En este punto, los parámetros relevantes a considerar incluyen la corriente, el voltaje que se aplique y el ritmo de avance del proceso. “La masa de metal base, que absorbe el calor. Aquí el factor determinante es el espesor de la pieza a soldar y la configuración del tipo de junta (a tope, en filete, etc.)” (Zou y Zhang, 2022)

Figura 19

Curvas isométricas de una plancha sometida a soldadura a tope



Fuente: Zou y Zhang (2022)

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

A continuación, se presenta los aspectos que inciden:

a) Aporte de calor (heat input).

“El input térmico es la energía aportada por un proceso de soldadura cuando se realiza un cordón por unidad de longitud, es expresado en Joules por milímetro (J/mm). Para procesos de soldadura por arco eléctrico, el input térmico es estimado por la ecuación 2”.
(Wang y Zhou, 2024)

$$H_{net} = \frac{(V \cdot I)}{v} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

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

I = Intensidad de corriente (Amp)

V = Tensión eléctrica (Volt)

v = Velocidad de soldeo (mm/s)

La ecuación 2, posibilita conocer “La energía bruta aportada por la máquina” (H). Sin embargo, parte de ésta se pierde antes de llegar a la soldadura, debido a procesos de radiación, convección y conducción en el arco y en la pieza (Silva y Sousa, 2020). En ese sentido, es de interés el cálculo de la energía neta aportada (Hnet), que es el producto del input térmico bruto por el rendimiento del proceso de soldadura, como se muestra en la ecuación 3 (Wang y Zhou, 2024)

$$H_{net} = f \cdot \frac{V_x}{v} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

f: Eficiencia térmica

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

Tabla 8

Eficiencia térmica de los procesos de arco

Proceso	Eficiencia
GTAW	20 – 50 %
GMA	70 – 85 %
W	
SMAW	70 – 80 %
SAW	90 – 99 %

Fuente: García (2010)

b) Temperatura inicial de la chapa (o temperatura de pre-calentamiento)

El metal base debe alcanzar una temperatura de pre-calentamiento mínimo tanto en toda su sección como en una zona adecuada que rodea la unión, Previo al inicio del proceso de soldadura. Su principal propósito es disminuir la velocidad de enfriamiento del cordón de soldadura y de la “Zona afectada por el calor”, contribuyendo así a minimizar tensiones térmicas, a fin de prevenir la creación de micro-estructuras frágiles y minimizar el riesgo de agrietamiento

c) Geometría de la soldadura

Comprende aspectos como el calibre del material base, la configuración y dimensiones del cordón de soldadura, así como el ángulo de unión entre piezas que están involucradas.

d) Características térmicas del material.

El material base experimenta un ciclo térmico a lo largo del proceso de soldadura complejo que influye significativamente en sus propiedades físicas y metalúrgicas. Las principales características térmicas relevantes son las siguientes: (Contreras y Briones ,2019)

- Conductividad térmica (k): Capacidad del material para transmitir calor, lo que afecta la distribución térmica y la morfología del baño de fusión.
- Difusividad térmica (α): La conducción térmica la densidad y calor específico al estar relacionados; determina la velocidad a la cual el calor se propaga en el material.
- Calor específico (C_p): Es la energía que se necesita para aumentar la temperatura del material, influenciando el aporte térmico requerido para el proceso.
- Temperatura de fusión: Umbral térmico que marca el comienzo de la liquefacción del metal base durante la soldadura.
- Coeficiente de expansión térmica: Factor que condiciona los esfuerzos residuales y las alteraciones generadas durante el enfriamiento.

Estas propiedades varían con la temperatura y tienen un impacto directo sobre la “Zona Afectada por el Calor”, la penetración del cordón de soldadura y la formación de micro-estructuras, condicionando la calidad y desempeño de la unión final.

Tabla 9
Conductividad Térmica en Aceros

Temperatura (°C)	Conductividad térmica k (W/m·K)	
	AISI 1020	AISI 4140
20	51	42
100	48	40
300	44	37
500	40	34
700	36	31
900	32	28

Fuente: Contreras y Briones (2019)

La tabla indica que el acero aleado AISI 4140 posee una “Conductividad térmica” moderadamente baja en comparación con aceros al carbono como el AISI 1020, presentando además una disminución continua con el incremento de la temperatura, desde aproximadamente 42 W/m·K a 20 °C hasta 28 W/m·K a 900 °C. Esta característica térmica implica una menor capacidad del material para disipar a lo largo del proceso de soldadura, lo cual resulta en una mayor concentración térmica en la “Zona Afectada por el Calor”. Dicha acumulación favorece la formación de fases frágiles, como la martensita, si no se realiza un control adecuado del ciclo térmico, aumentando la susceptibilidad a fisuras en frío, sobre todo debido a la alta templabilidad del acero y la posible presencia de hidrógeno atrapado.

Debido a estas propiedades, es indispensable implementar un control térmico riguroso que incluya un pre-calentamiento adecuado (recomendado entre 200 y 300 °C), un aporte térmico controlado y un enfriamiento monitorizado para evitar transformaciones micro-estructurales no deseadas y preservar la tenacidad de la unión soldada. Asimismo, la baja “Conductividad térmica” del AISI 4140 impacta en la eficiencia energética del proceso, ya que se requiere mayor energía para mantener temperaturas homogéneas durante la soldadura, lo que puede incrementar el consumo térmico en técnicas como soldadura por arco o por

resistencia. Por tanto, El control térmico resulta esencial para incrementar la calidad y la vida útil de las uniones en este material.

e) Diámetro del electrodo

Una dimensión mayor del electrodo exige un aporte térmico superior de esta forma se lograr su fusión. Aunque este factor tiene una incidencia limitada, afecta las dimensiones de la emisión de calor utilizada

Es crucial que ciertos intervalos de temperatura causen cambios en la micro-estructura del metal, las cuales inciden directamente en las características mecánicas de la unión soldada. En los aceros, dichas modificaciones metalúrgicas suelen ocurrir cuando el material se expone a temperaturas que van desde el punto crítico inferior ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta la temperatura de fusión ($1480\text{ }^{\circ}\text{C}$). Cuando se realiza una soldadura, las regiones de la pieza que alcancen valores entre los límites arriba indicados, experimentarán cambios significativos en su micro-estructura y por lo tanto en las propiedades mecánicas (AWS, 2020).

2.11 Cálculo del Ancho de la ZAC

La aplicación principal de la ecuación que determina la temperatura máxima de un punto específico es el cálculo de la anchura de la “Zona Afectada por el Calor” (ZAC) durante la soldadura. No obstante, para obtener una estimación precisa de dicha anchura, es necesario identificar el límite más distante de la ZAC respecto al cordón de soldadura, utilizando como referencia el valor máximo de temperatura alcanzado en ese extremo. Dicho valor térmico debe coincidir con alguna transformación estructural o alteración en las propiedades del material base.

Si bien la ecuación que determina la temperatura máxima resulta altamente útil, es fundamental reconocer las limitaciones inherentes a su aplicación. Esta fórmula es válida principalmente en procesos de pasada única con penetración completa, ya sea en operaciones de soldeo o corte térmico, sin que el calibre de la chapa represente una restricción. Asimismo, puede aplicarse en soldaduras por arco con penetración total, siempre que el número de pasadas no exceda de cuatro. La ecuación 3 puede aplicarse sobre la base de una por pasada, sin embargo, la temperatura entre pasadas, aquella a la cual la zona de soldadura se enfría entre una y otra pasada, puede considerarse como un valor de T_0 en la ecuación del máximo de temperatura. (Silva y Sousa, 2020)

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_o} \right) \right] \quad Ec. 4$$

Donde:

Y =Parámetro térmico adimensional o de sensibilidad, Variable (1/K)

T_{max} =Temperatura máxima alcanzada en el proceso, Kelvin (K) o °C

$T_{fusión}$ =Temperatura de fusión del metal base o de aporte, Kelvin (K) o °C

T_o =Temperatura inicial del metal base, Kelvin (K) o °C

Este tipo de ecuación resulta útil para evaluar la proximidad térmica al punto de fusión del material, estimar la sensibilidad térmica de la “Zona Afectada por el Calor”, establecer las condiciones de nucleación y crecimiento de fases durante los procesos de solidificación, así como para analizar la efectividad térmica en los procesos de aporte energético empleados en la soldadura.

2.12 Velocidad de Enfriamiento

Tras establecer la anchura de (ZAC) en la unión soldada, uno de los aspectos más

determinantes del ciclo térmico es la “Velocidad de enfriamiento”. Una vez que alcanzar la temperatura máxima el metal fundido, la rapidez para disipar el calor tiene un impacto de forma significativa en la evolución de la estructura metalúrgica y en características mecánicas de la ZAC. Este fenómeno adquiere relevancia en aceros sometidos a tratamientos térmicos.

Al estudiar el ciclo térmico de un punto determinado dentro de la “Zona Afectada por el Calor” (ZAC), es importante destacar que existen múltiples velocidades, las cuales varían en función de la temperatura que alcanza el acero durante el proceso de enfriamiento.

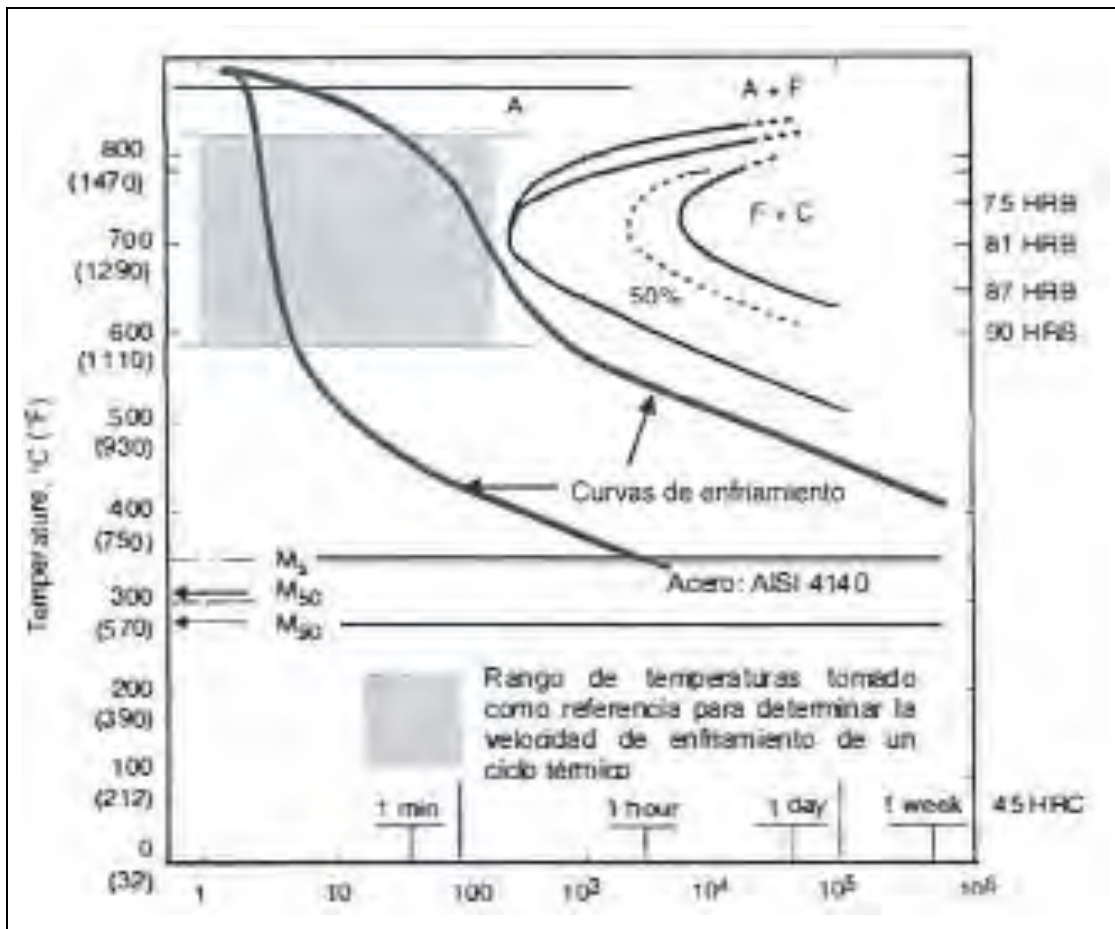
De hecho, el rango de temperaturas críticas más importante para evaluar la velocidad de enfriamiento del acero comprende los 800 °C y los 500 °C. Este rango corresponde a la sección superior de la curva en “S”, tal como se aprecia en la Figura 20, la cual presenta una curva TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) correspondiente a un acero AISI 4140 aleado con cromo y molibdeno (Cr-Mo). La figura muestra dos curvas de enfriamiento superpuestas, las cuales provienen de un ciclo térmico específico.

La función de estimar la “Velocidad de enfriamiento” es predecir si la soldadura inducirá la formación de micro-estructuras frágiles. Esto ocurre cuando dicha velocidad de enfriamiento es tan rápida que evita el punto crítico en la curva TTT, lo que resulta en la transformación a martensita, también conocida como curva en “S”, lo cual está directamente vinculado con la “velocidad crítica de temple” (VCT).

El enfriamiento del acero tiene lugar dentro del rango de temperaturas próximo a la “nariz” de la curva TTT, aproximadamente entre 800 °C y 500 °C. En esta ventana crítica, la velocidad de enfriamiento empleada para caracterizar el ciclo térmico a lo largo el proceso de soldadura resulta determinante, dado que influye directamente en las transformaciones de fases y, en consecuencia, en la calidad final de la unión soldada.

Figura 20

La curva TTT de un acero AISI 4140 muestra las curvas de enfriamiento típicas y el rango de temperaturas clave para evaluar la velocidad de enfriamiento en soldadura.



Fuente: Wang y Zhou (2024)

La martensita es uno de los micro-constituyentes más frágiles que pueden desarrollarse en la zona soldada; No obstante, hay otros productos de transformación o combinaciones de ello que pueden deteriorar la tenacidad del cordón de soldadura y, por ende, deben evitarse. Estos compuestos se generan a partir de enfriamientos acelerados desde la temperatura de austenización.

Como consecuencia, se deben usar procedimientos que reduzcan las altas velocidades de enfriamiento para soldar aceros al carbono y de baja aleación. El control riguroso de este parámetro térmico depende de múltiples factores, entre los cuales destacan el tipo de acero,

el calibre del material base, el método de soldadura empleado y la cantidad de calor de aporte aplicada durante el proceso.

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

El cálculo y la comparación de velocidades de enfriamiento en procesos de soldadura exige un criterio detallado de condiciones térmicas y geométricas bajo las cuales se desarrollan, ya que referirse de manera genérica a la “velocidad de enfriamiento” resulta impreciso debido a que este parámetro varía según la posición dentro del material y el momento temporal considerado, al igual que el gradiente térmico. El método más adecuado es determinar la velocidad de enfriamiento a través del eje longitudinal del cordón de soldadura, dentro del intervalo de temperatura crítica (T_c), definido como el rango térmico donde ocurren transformaciones metalúrgicas relevantes, típicamente entre 800 °C y 500 °C en aceros al carbono. Por debajo del punto de fusión, dicha velocidad en la soldadura y en la “zona afectada por el calor” (ZAC) adyacente tiende a mantenerse relativamente constante respecto a la posición, siempre que las condiciones térmicas sean homogéneas y no existan discontinuidades geométricas o materiales.

Para aceros al carbono y de baja aleación, la temperatura de referencia más adecuada para evaluar la velocidad de enfriamiento se ubica cercana a la “nariz” perlítica del “Diagrama Tiempo-Temperatura-Transformación” (TTT), donde comienzan a formarse micro-constituyentes como la perlita y la bainita. Si bien no es estrictamente necesario fijar una temperatura única, es fundamental que el rango térmico seleccionado, conocido como temperatura crítica (T_c), se mantenga constante en todas las evaluaciones para asegurar coherencia en los cálculos y comparaciones térmicas. Para la mayoría de estos aceros, un valor representativo de T_c se sitúa alrededor de 550 °C, lo que permite estimar con suficiente

precisión la velocidad de enfriamiento en el intervalo más sensible a las transformaciones micro-estructurales.

La aplicación práctica más importante de las ecuaciones que determinan la velocidad de enfriamiento es el cálculo de los requisitos de pre-calentamiento en procesos de soldadura; por ejemplo, cuando se soldan chapas de gran espesor que requieren uniones con múltiples pasadas (superiores a seis), “La velocidad de enfriamiento” (R) puede estimarse utilizando la Ecuación 5.

$$R = \frac{2\pi K(T_c - T_o)^2}{H_{net}} \quad Ec. 5$$

En esta expresión:

R = Velocidad de enfriamiento en el eje central de la soldadura (°C/s), justo cuando el punto alcanza la temperatura crítica T_c.

K = Conductividad térmica del metal (J/mm s °C)

T_c = Temperatura crítica o de referencia para el enfriamiento (°C)

T_o = Temperatura inicial del metal antes del aporte térmico (°C).

H_{net} = Energía neta aportada por unidad de longitud (J/mm).

Por otro lado, cuando se emplean chapas de menor espesor que requieren menos de cuatro pasadas, la velocidad de enfriamiento se calcula utilizando la Ecuación 6.

$$R = 2\pi K \rho C \left[\frac{t}{H_{net}} \right]^2 \cdot (T_c - T_o)^3 \quad (Ec. 6)$$

Donde se agregan los siguientes términos:

P = Densidad del metal (g/mm^3)

C = Calor específico del metal ($\text{J/g } ^\circ\text{C}$)

T = Espesor de la chapa (mm)

Aunque la velocidad de enfriamiento en las zonas próximas a la zona fundida presenta ligeras variaciones respecto al eje central, las ecuaciones mencionadas son aplicables tanto al cordón de soldadura como a la “Zona Afectada por el Calor” (ZAC) inmediata. La distinción entre chapas gruesas y delgadas se basa en la manera en que el calor fluye: en chapas gruesas, la transferencia térmica es tridimensional, dispersándose hacia abajo y a los laterales, mientras que en chapas delgadas predomina un flujo bidimensional. Para clarificar esta situación, Se introduce una magnitud adimensional, el “Espesor relativo de la chapa” (r), Ecuación 7.

$$r = t \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_o)}{H_{net}}} \quad (\text{Ec.7})$$

Criterios de aplicación:

- Si $r > 0,9$: aplicar ecuación para chapas gruesas.
- Si $r < 0,6$: aplicar ecuación para chapas delgadas.
- Si $0,6 \leq r \leq 0,90$: ambas ecuaciones presentan cierto margen de error.

Para simplificar, se puede adoptar un valor de referencia de $r = 0,75$ como umbral: valores superiores a este indican un comportamiento típico de chapa gruesa, mientras que valores inferiores corresponden a chapas delgadas.

Bajo este criterio, el error en la estimación de la velocidad de enfriamiento generalmente no supera el 15 %, y es aún menor cuando se emplea para determinar los requisitos de pre-calentamiento.

2.13 Temperatura de pre-calentamiento

El método propuesto por Seferian basado en sus investigaciones, utiliza varias expresiones para calcular el “carbono equivalente” (C_t). Este valor es planteado como la adición del “carbono equivalente” de carácter químico, que permite evaluar el efecto de los componentes aleantes sobre el comportamiento del acero durante el proceso de soldadura.

$$C_t = C_e + C_s \quad \text{Ec.8}$$

$$C_e = C + \frac{M_n}{6} + \frac{C_r + M_o}{5} + \frac{N_i + C_u}{15} \quad \text{Ec.9}$$

$$C_s = 0,005 \cdot e \cdot C_e \quad \text{Ec.10}$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_t - 0,25} \quad \text{Ec.11}$$

Donde:

T_p =	Temperatura de pre-calentamiento	°C
C_t =	Carbono equivalente total	Adimensional
C_e =	Carbono equivalente químico	Adimensional
C_s =	Factor de corrección por espesor	Adimensional
e =	Espesor de la chapa	mm
C =	Porcentaje de carbono en el acero	% p/p
M_n =	Porcentaje de manganeso	% p/p
C_r =	Porcentaje de cromo	% p/p
N_i =	Porcentaje de níquel	% p/p
M_o =	Porcentaje de molibdeno	% p/p
C_u =	Porcentaje de cobre	% p/p

Las ecuaciones desde la 8 hasta la 11 representan el método original propuesto por Seferian (Fosca, 2007), un enfoque ampliamente utilizado para el análisis térmico en procesos de soldadura. En particular, la determinación del “carbono equivalente” (Ecuación 9) cuenta con diversas expresiones, las cuales varían según el objetivo específico del análisis, ya sea mantener la tenacidad del material o controlar la susceptibilidad a la formación de

grietas, conforme a las recomendaciones establecidas en la norma AWS (2020). Este método permite evaluar con precisión las propiedades metalúrgicas y mecánicas afectadas por el incremento de calor durante la soldadura. Generalmente, el método de Seferian se representa de manera gráfica para facilitar su interpretación y aplicación práctica; por ejemplo, la Figura 21 muestra dicho gráfico, que fue elaborado a partir del resumen de los cálculos consignados en la Tabla 10, proporcionando así una referencia visual que simplifica la revisión para el diseño y control del proceso de soldadura.

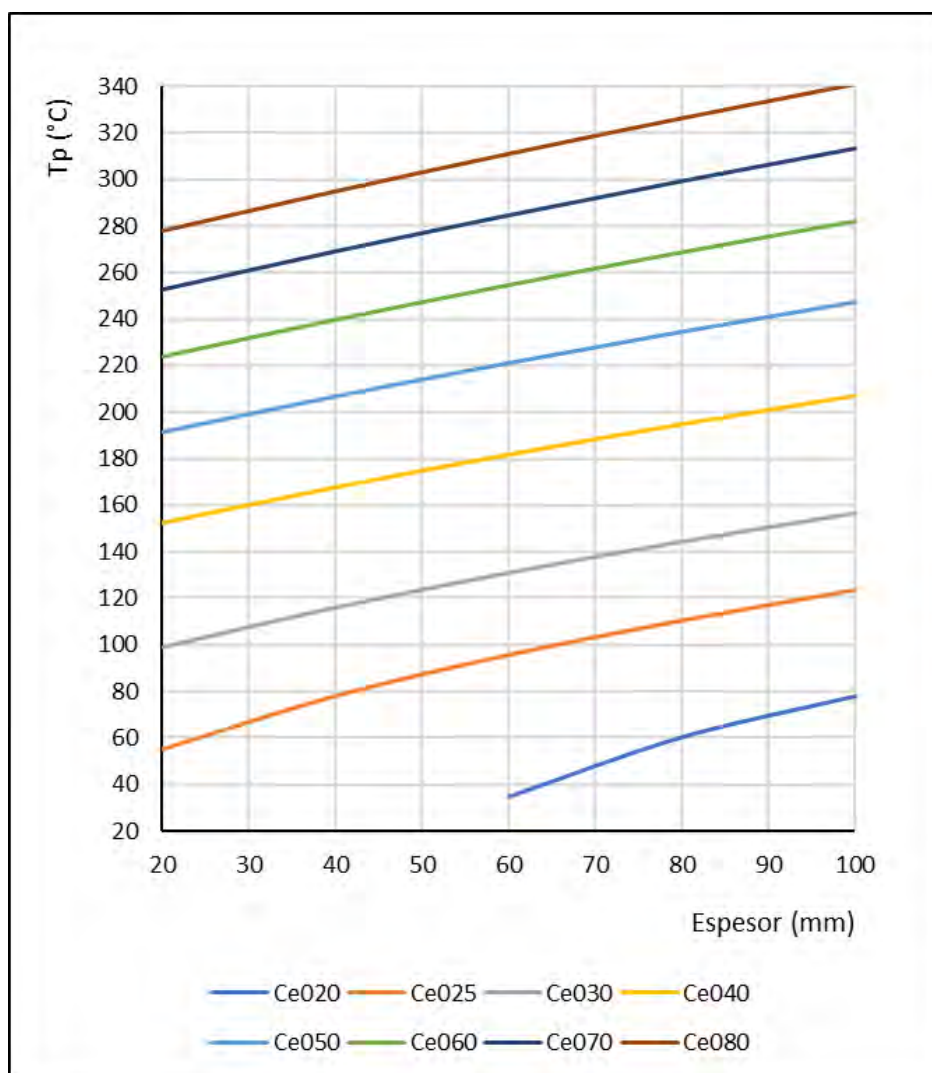
Tabla 10
Temperatura de Pre-calentamiento

Ce	Espesores (mm)				
	20	40	60	80	100
0,20			35,00	60,62	78,26
0,25	55,34	78,26	95,85	110,68	123,74
0,30	98,99	116,08	130,96	144,31	156,52
0,40	152,56	167,85	181,87	194,87	207,06
0,50	191,70	207,06	221,36	234,79	247,49
0,60	224,11	239,95	254,80	268,84	282,18
0,70	252,39	268,84	284,34	299,04	313,05
0,80	277,80	294,92	311,09	326,46	341,14

Fuente:(ASTM International, 2020)

Para determinar los valores de temperatura de pre-calentamiento, se determinaron con el uso de las ecuaciones 8,10 y 11, con los espesores del metal base y “carbono equivalente” químico de la tabla.

Figura 21
Gráfico de Seferian.



Fuente: propia

La gráfica presentada permite visualizar la correlación del grosor del material y la temperatura de pre-calentamiento requerida, con base al “carbono equivalente químico” (Ce). Se observa que, para todos los valores de Ce, la temperatura de pre-calentamiento T_p se incrementa progresivamente con el espesor, lo que refleja la necesidad de compensar la mayor masa térmica y la menor disipación de calor en chapas gruesas. Las curvas son aproximadamente lineales, lo que facilita su uso práctico. Por ejemplo, la curva Ce020 indica que para espesores entre 60 y 100 mm, basta con pre-calentar entre 35°C y 80 °C, mientras

que para Ce080, el rango se eleva desde 280 °C hasta 340 °C (para espesores de 20 mm hasta 100 mm).

Esto demuestra que el “carbono equivalente” es un parámetro crítico para evaluar la susceptibilidad al agrietamiento y la necesidad de pre-calentamiento, especialmente en aceros de alta aleación o con mayor dureza potencial. La gráfica es útil como herramienta de consulta rápida en campo o en diseño de procedimientos para el soldado.

2.14 Carbono Equivalente

Las estrategias más aplicadas para definir la capacidad de soldado de los aceros consisten en medir el endurecimiento en la “Zona Afectada por el Calor” (ZAC). Generalmente, rangos elevados de endurecimiento en esta región se consideran señales de posibles problemas, que incluyen el agrietamiento a temperatura ambiental y un área de unión de comportamiento quebradizo, susceptibilidad a la corroerse bajo tracción o quebradizo inducido por hidrógeno, entre otros.

La máxima resistencia que puede alcanzar el acero está determinada sobre todo por su porcentaje de “carbono equivalente” (% C.E.). Sin embargo, la dureza real que se manifiesta bajo el cordón de soldadura no depende únicamente de la composición química en el acero, así como de su templeza ante los ciclos térmicos que establece el tiempo del proceso de soldado, donde intervienen múltiples factores adicionales.

Dado que el carbono es el elemento con mayor influencia sobre el proceso de templeado y dureza final en el acero, estableciendo el término “carbono equivalente” (CE) para designar un coeficiente que asocia la composición del material con su propensión a desarrollar estructuras de baja tenacidad en el procedimiento de soldado.

2.14.1 Expresión de carbono equivalente (CE)

El “carbono equivalente” (CE) de un acero constituye un indicador de su tendencia potencial a experimentar fisuración, ya sea durante el proceso de soldadura o en etapas posteriores a la solidificación

El “carbono equivalente” ofrece datos importantes acerca de varios aspectos, tales como:

- ✓ Estimación de la templabilidad del acero.
- ✓ Permite la evaluación de la sensibilidad a la fisuración en frío, útil para definir la temperatura mínima de pre-calentamiento o la tolerancia frente a la fisuración inducida por hidrógeno.
- ✓ Análisis del comportamiento en servicio, incluyendo la susceptibilidad al agrietamiento por sulfuros y a la corrosión bajo tensión.

Aunque existen diversas fórmulas para calcular el “carbono equivalente” (CE), a continuación, se presentan algunas de las expresiones más utilizadas actualmente.

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

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

La ecuación desarrollada por Dearden y O’Neil (1940) es válida para aceros que superen el 0,18 % de contenido de carbono, así como para procesos de soldadura que demanden un enfriamiento lento, es decir, cuando el tiempo de enfriamiento entre 800 °C y 500 °C ($t_{8/5}$) supera los 12 segundos. Los elementos de la aleación se expresan en porcentaje en masa (peso).

b) Expresión tipo PCM (parámetro de composición).

Propuesta por Ito y Bessyo.

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

Con el fin de establecer la temperatura mínima de pre-calentamiento en las uniones soldadas, el código AWS D1.1 se basa en esta fórmula.

c) El tipo CEMW

Propuesta por DUREN (1981)

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

Ambas fórmulas son adecuadas para aceros con contenido de carbón inferior a 0,22 % y bajo condiciones de enfriado acelerado, es decir, cuando $t_{8/5}$ es menor de 6 seg. La expresión mejora la correlación en condiciones de soldado en sitio reales, donde la rapidez de enfriado suele estar más elevadas, con valores típicos de $t_{8/5}$ entre 2 y 3 segundos.

d) Formula del CEN.

Propuesta fue hecha por Yurioka (1981).

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

La expresión $A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot \tanh[20(C - 0,12)]$ define un factor de acomodación aproximado a 0,5 si se tiene contenido de carbono inferior a 0,08 %, y tiende a 1 si supera el 0,18 %. La fórmula proporciona estimación razonable de acero de hasta 0,25 % de carbono.

El criterio general asociado al “carbono equivalente” (CE) establece que, a medida que el valor de CE aumenta, mayor será la dificultad para soldar el acero. Para minimizar el riesgo de agrietamiento en frío debido a la formación de estructuras de baja tenacidad en el

cordón de soldado, el CE se recomienda no supere el rango de 0,35 a 0,40, según el grosor de la chapa y la restricción de la unión.

Adicionalmente, el código ANSI/AWS D1.1 contempla la clasificación de aceros en base a su ubicación dentro del diagrama de Graville, lo cual permite evaluar su comportamiento frente a la fisuración en frío.

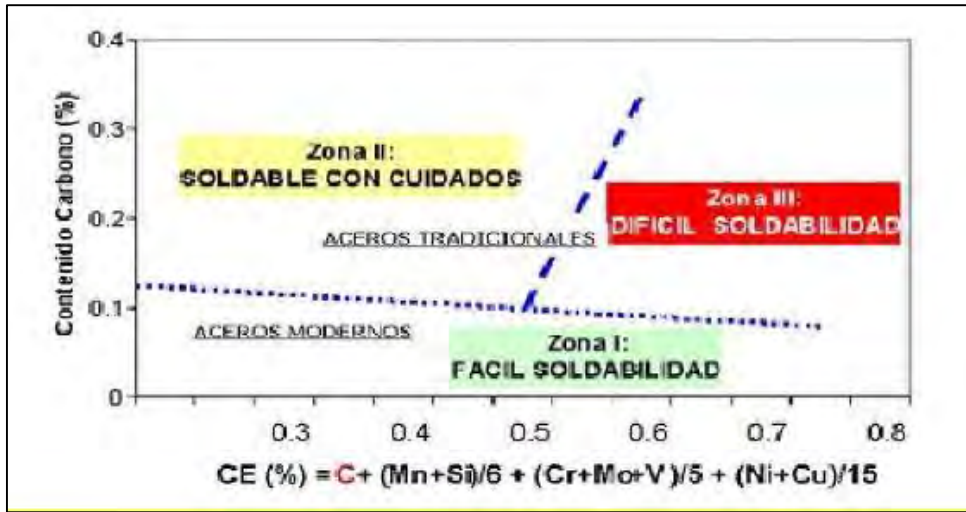
2.15 Diagrama de Graville para evaluar la capacidad de soldado

El diagrama de Graville es un instrumento eficaz que analiza la capacidad de soldado de aceros, especialmente en lo referente a la vulnerabilidad al agrietamiento en frío. Este análisis es fundamental en el valor de “Carbono Equivalente” (CE %), que permite estimar el comportamiento del acero en la “zona afectada por el calor” (ZAC) durante el proceso de soldado. Conforme el porcentaje de “carbono equivalente” aumenta, también lo hace el riesgo de que aparezcan fisuras en frío.

El diagrama de Graville también permite determinar si se requiere pre-calentar o llevar a cabo tratamientos térmicos después de soldar, en función de la composición en el acero. Aunque no considera el espesor del material, El gráfico muestra una relación directa entre el contenido de carbón y el valor del “carbono equivalente” (CE %), lo que facilita la evaluación del riesgo de fisuración y la selección de medidas preventivas adecuadas. En la figura 22. se identifican las zonas de amenaza asociadas a la capacidad de soldado de los aceros, las cuales coinciden con las representadas en la figura 23, dado que ambas ilustraciones comparten el mismo esquema gráfico de referencia.

Figura 22

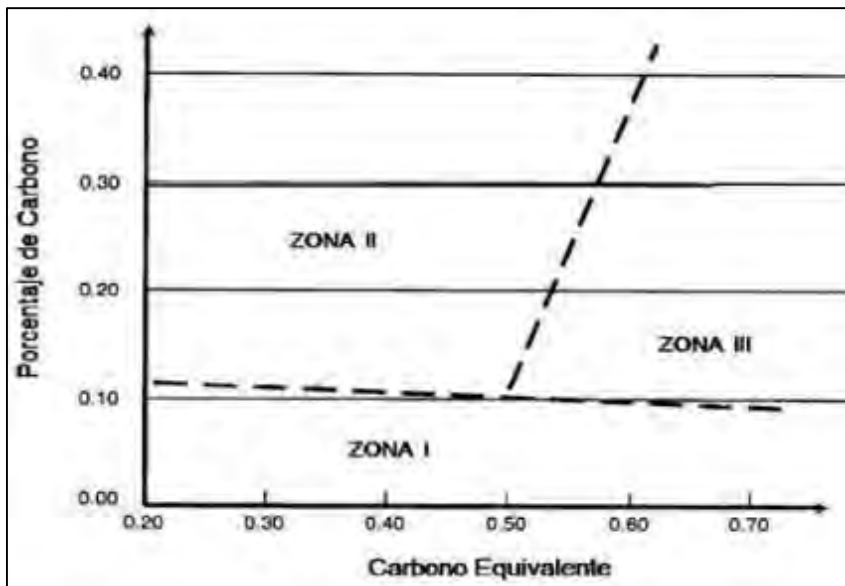
Zonas que indica los grados de soldabilidad



Fuente:(AWS, 2017).

Figura 23

Diagrama de Graville.



Fuente: (AWS, 2017)

Las figuras anteriormente expuestas presentan tres zonas diferenciadas que permiten evaluar el nivel de riesgo asociado a la soldabilidad del acero, según su composición química.

Estas zonas se describen a continuación:

La primera zona I corresponde a aceros de cantidad de carbón bajo y capacidad baja de tenacidad. Estos materiales no presentan susceptibilidad significativa a la fisuración en frío, por lo que no requieren pre-calentamiento ni medidas especiales de control térmico durante el proceso de soldadura.

La segunda zona incluye aceros con contenido de carbón más alto, aunque con baja capacidad de tenacidad. Esta zona, la amenaza de agrietamiento en ZAC puede reducirse controlando la rapidez de enfriado, principalmente ajustando el aporte de calor. El pre-calentamiento puede aplicarse en menor medida como medida complementaria.

La tercera zona abarca aceros con contenido altos de carbono y alta dureza. Estos materiales presentan una alta probabilidad de generar estructuras frágiles propensos a grietas, independientemente del procedimiento de soldadura utilizado. En estos casos, se recomienda aplicar pre-calentamiento obligatorio y considerar tratamientos térmicos posteriores para reducir tensiones residuales y mejorar la integridad de la unión soldada.

Desde el enfoque de selección de parámetros de soldadura, el diagrama de Graville permite establecer criterios según la composición requerida en el acero. Si el material se ubica en la Zona II, se recomienda emplear procesos de soldadura con bajo contenido de hidrógeno y aplicar pre-calentamiento como medida preventiva.

En cambio, si el acero se encuentra en la tercera zona, además de utilizar procesos con hidrógeno bajo y calentamiento previo, resulta necesario incorporar tratamientos por temperatura posteriores a la soldadura para reducir tensiones residuales y minimizar el riesgo de fisuración

2.16 Temperatura de pre-calentamiento (Método de Seferian)

Un método propuesto por Seferian basado en sus investigaciones, en el cual introduce una expresión para calcular el “carbono equivalente total” (Ct). Este enfoque considera la

suma de un “carbono equivalente químico”, integrando los efectos de los elementos que se encuentra en el acero.

$$C_t = C_s + C_e \quad Ec.16$$

$$C_e = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13} \quad Ec.17$$

$$C_s = 0.005 * e \text{ (mm)} * C_e \quad Ec.18$$

Donde:

Cs: carbono equivalente del espesor (%)

e: espesor de la pieza (mm)

Ce: carbono equivalente químico (%)

(Cg): depende de la composición química del acero y de un carbono equivalente del espesor

(Cs) o llamado también Seferian.

Finalmente, para obtener la “temperatura de pre-calentamiento” (Tp) se aplica la formula desarrollada por Seferian: (Fosca, 2007)

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_t - 0,25} \quad Ec.19$$

2.17 Ensayos Destructivos en Uniones Soldadas

a) Ensayo de 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”.

Para determinar el valor de la dureza de un material, se emplean diversas fórmulas según el método utilizado. Entre las principales escalas de medición se encuentran Brinell, Vickers,

Knoop y Rockwell, cada una con criterios específicos de aplicación en función del tipo de material y las condiciones del ensayo.

- **Dureza Rockwell (Hardness Rockwell series C.)**

En contraste con otros métodos, el “Ensayo Rockwell” mide la dureza según la profundidad de penetración que alcanza el indentador, en lugar de basarse en el diámetro o las diagonales de la huella. Esta característica permite agilizar el proceso de medición, ya que el equipo utilizado para la escala Rockwell está diseñado específicamente para registrar la deformación residual de manera directa.

La dureza Rockwell, se calcula mediante la siguiente fórmula general:

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad \text{Ec.20}$$

Donde:

HR = Valor de dureza Rockwell

N = Constante de la escala (depende del tipo de escala A, B, C etc)

H = Profundidad de penetración permanente del indentador (mm)

S = Factor de sensibilidad de la escala (mm por unidad de dureza)

Tabla 11

Escala de dureza Rockwell

Indentador	Tipo Escala	N	S (mm)
Esferocónico	Normal	100	0,002
	Superficial	100	0,001
Bola	Normal	100	0,002
	Superficial	130	0,001

Fuente: propia

Para el “Ensayo de dureza Rockwell”, la constante N y el factor S son parámetros fundamentales en la fórmula que relaciona la profundidad de penetración con el valor de dureza. La constante N representa el valor base de la escala Rockwell correspondiente al tipo de indentador y carga utilizada, mientras que el factor S indica cuántas unidades de dureza corresponden a cada incremento de profundidad (generalmente expresado en mm). En la tabla 12 y 13 se presentan las distintas escalas de dureza Rockwell, cada una adaptada a diferentes tipos de materiales y condiciones de prueba.

La prueba de dureza Rockwell consiste en evaluar la resistencia a la penetración de un indentador (cono de diamante o bola de acero endurecido), bajo carga estándar que varía típicamente entre 60, 100 y 150 kgf, dependiendo de la escala utilizada (A, B, C, entre otras). Este método permite determinar la dureza del material a través de la profundidad de la indentación provocada por la aplicación controlada de la carga

Este método se aplica principalmente en materiales metálicos de espesor medio a grueso, como aceros al carbono, aceros templados, aleaciones de cobre, aluminio y fundiciones, donde se requiere evaluar la dureza en todo el volumen del material.

Es ampliamente utilizado en control de calidad, diseño de tratamientos térmicos y selección de materiales estructurales.

Tabla 12
Escalas de dureza Rockwell

Escala	Indentador	Carga (kgf)	Color dial	Aplicaciones típicas de la escala
B	Bola de 1/16 pulg (1.588 mm)	100	Rojo	Aleaciones de cobre, aceros suaves, aleaciones de aluminio, hierro maleable, etc.
C	Diamante (cono)	150	Negro	Aceros, hierros fundidos duros, hierro maleable perlítico, titanio, acero cementado profundo, etc.
A	Diamante (cono)	60	Negro	Carburos cementados, acero delgado, acero con cementación superficial
D	Diamante (cono)	100	Negro	Acero delgado, acero con cementación media, hierro maleable perlítico.
E	Bola de 1/8 pulg (3.175 mm)	100	Rojo	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio, metales para cojinetes.
F	Bola de 1/16 pulg (1.588 mm)	60	Rojo	Aleaciones de cobre recocido, chapas delgadas y blandas.
G	Bola de 1/16 pulg (1.588 mm)	150	Rojo	Hierro maleable, aleaciones cobre-níquel-zinc y cupro-níquel. Límite superior G92 para evitar deformación de la bola.
H	Bola de 1/8 pulg (3.175 mm)	60	Rojo	Aluminio, zinc, plomo.
K	Bola de 1/8 pulg (3.175 mm)	150	Rojo	Metales para cojinetes y otros materiales muy blandos o delgados. Usar la bola más pequeña y la carga más alta sin efecto de yunque.
L	Bola de 1/4 pulg (6.350 mm)	60	Rojo	Igual que la escala K.
M	Bola de 1/4 pulg (6.350 mm)	100	Rojo	Igual que la escala K.
P	Bola de 1/4 pulg (6.350 mm)	150	Rojo	Igual que la escala K.
R	Bola de 1/2 pulg (12.70 mm)	60	Rojo	Igual que la escala K.
S	Bola de 1/2 pulg (12.70 mm)	100	Rojo	Igual que la escala K.
V	Bola de 1/2 pulg (12.70 mm)	150	Rojo	Igual que la escala K.

Fuente: ASTM E28 (2024).

Tabla 13
Escalas de dureza superficial Rockwell

Carga total de ensayo, kgf (N)	Escala N – Indentador de diamante	Escala T – Bola de 1/16 pulg (1.588 mm)	Escala W – Bola de 1/8 pulg (3.175 mm)	Escala X – Bola de 1/4 pulg (6.350 mm)	Escala Y – Bola de 1/2 pulg (12.70 mm)
15 (147)	15N	15T	15W	15X	15Y
30 (294)	30N	30T	30W	30X	30Y
45 (441)	45N	45T	45W	45X	45Y

Fuente: ASTM E28 (2024).

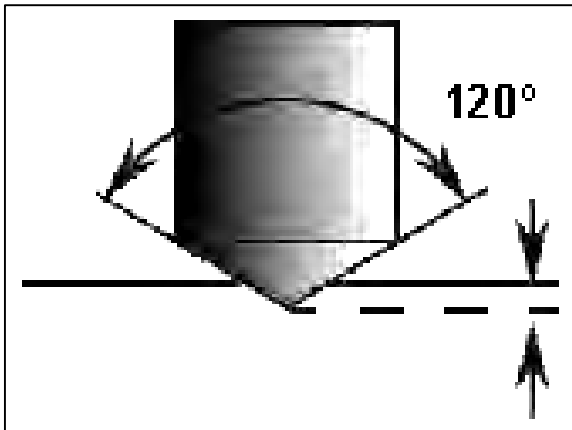
La dureza Rockwell superficial, por su parte, se emplea para evaluar materiales delgados, recubrimientos superficiales o piezas con cementación o nitruración, donde las cargas estándar podrían causar deformación excesiva o penetrar más allá de la capa tratada. Este método utiliza cargas reducidas de 15, 30 o 45 kgf, y escalas específicas como 15N, 30T, 45W, entre otras, según el tipo de indentador y el tamaño de la bola.

La medición se basa igualmente en la profundidad de penetración, pero con mayor sensibilidad para detectar variaciones superficiales. Es ideal para chapas, piezas tratadas térmicamente en superficie, componentes electrónicos o materiales no metálicos con baja resistencia volumétrica.

La escala Rockwell C (HRC) utiliza un indentador cónico de diamante con el ángulo de apertura en 120°, sometido a la carga de 150 kgf (figura 24). Se utilizada en la medición de dureza del aceros templados y materiales de alta resistencia mecánica.

El valor de dureza Rockwell (HR) se determina a partir de una relación matemática que vinculaque tan profundo penetra el indentador con la resistencia del material al ensayo. Esta fórmula permite obtener un valor numérico estandarizado, el cual es representativo de la dureza del material evaluado.

Figura 24
Cono de diamante



Fuente:(AWS, 2017).

a) Ensayo de doblado

El ensayo tiene como propósito determinar: ductilidad y calidad del material de soldadura depositado. El método consiste en deformar una probeta en forma de "U" para luego realizar una inspección visual de la zona que ha sido sometida a la deformación. Este tipo de ensayo se utiliza habitualmente para la calificación de procedimientos de soldadura, además de para verificar la habilidad técnica de los soldadores. Entre las variantes más comunes se encuentra el ensayo de doblado transversal de lado, que permite analizar la integridad de la unión en un sentido perpendicular al eje de la soldadura.

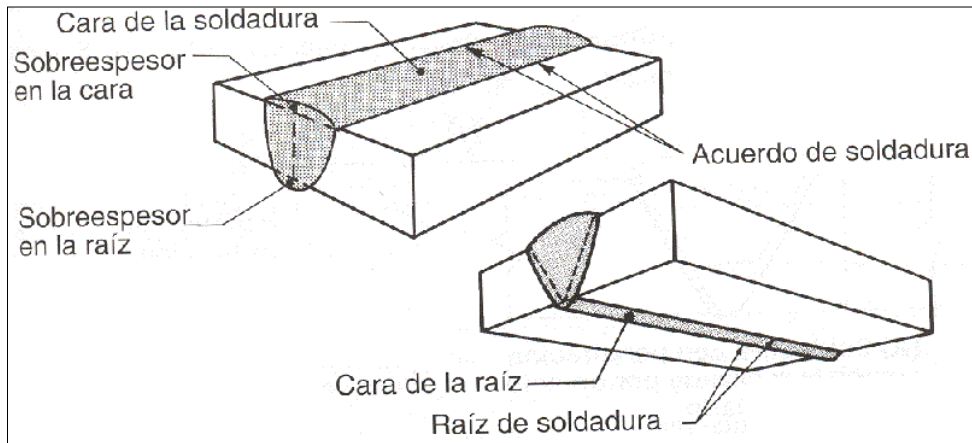
- ✓ Doble transversal de raíz
- ✓ Doble transversal de cara
- ✓ Doble longitudinal de cara
- ✓ Doble longitudinal de raíz. (CESOL 2013).

Como se aprecia la figura 25 muestra la configuración de la matriz utilizada en el ensayo de doblez, así como las variantes correspondientes al doblado externo (cara) y al doblado interno (raíz). Estas pruebas permiten analizar la continuidad, ductilidad y presencia

de discontinuidades en la zona soldada, proporcionando información clave para la calificación de procedimientos y personal técnico.

Figura 25

Depósito de soldadura en cara y raíz



Fuente: Walteros Larrotta (2010)

El ensayo de doblez es cualitativo y busca comprobar que las probetas no evidencien grietas visibles tras la deformación.

Para que el ensayo sea considerado aceptable, deben cumplirse los siguientes criterios establecidos por la normativa aplicable.

- ✓ Las discontinuidades superficiales no deben exceder los 3 mm en ninguna dirección.
- ✓ La suma total de discontinuidades individuales con dimensiones entre 1 mm y 3 mm no debe superar los 10 mm en conjunto.

2.18 Ensayos Destructivos y no Destructivos

Ensayos no Destructivos

Se trata de métodos no destructivos que permiten evaluar la integridad de materiales, componentes o estructuras, así como medir de forma cuantitativa ciertas propiedades físicas sin alterar la funcionalidad del objeto inspeccionado. Estos ensayos no afectan a las propiedades, dimensiones y uso de las piezas ensayadas. (Destructivos, A. d. 2009).

Inspeccionar soldaduras usando ensayos no destructivos en materiales como acero, titanio y aluminio permite identificar grietas, poros, falta de penetración, inclusiones y otras discontinuidades que puedan afectar la capacidad estructural de uniones soldadas.

Las técnicas de “Ensayo no destructivo” más empleados en la identificación de debilidades en soldaduras incluyen técnicas especializadas que permiten identificar discontinuidades sin comprometer la integridad del componente evaluado.

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

a) Inspección visual.

Considerada la Prueba No Destructiva (PND) más utilizadas, se aplica a lo largo de toda la secuencia de operaciones de los procesos productivos, comenzando desde la admisión de material. Su objetivo principal es garantizar las uniones soldadas a través de la detección temprana de discontinuidades visibles. La soldadura de sellado de los perfiles huecos de acero requiere inspección visual. (Destructivos, 2009).

b) Inspección por líquidos penetrantes

El método de líquidos penetrantes se utiliza para identificar y evaluar fisuras y discontinuidades que estén abiertas en la superficie de materiales sólidos que no presentan porosidad. Se trata de uno de los métodos de “Ensayo no destructivo” más utilizados actualmente, debido a su aplicabilidad en materiales tanto magnéticos como no magnéticos. Su versatilidad lo convierte en una herramienta eficaz para inspecciones en campo o zonas

de difícil acceso, y ofrece una amplia variedad de técnicas y niveles de sensibilidad que permiten adaptarse a diferentes geometrías y dimensiones de las piezas evaluadas. También es apropiado en entornos de producción de piezas pequeñas en período de tiempo relativamente corto. (Destructivos, 2009). La diferencia entre ambos tipos radica en su característica distintiva principal, la cual determina su aplicación específica dentro del proceso de inspección.

- ✓ Los penetrantes fluorescentes incorporan colorantes que emiten luminiscencia cuando se exponen a luz ultravioleta, lo que permite una detección precisa en condiciones de baja iluminación.
- ✓ Los penetrantes que no son fluorescentes poseen colorantes contrastes visibles para luz blanca, facilitando la inspección en entornos convencionales sin necesidad de equipos especiales.

Ambos tipos de líquidos penetrantes se aplican mediante el mismo procedimiento, que se compone de las siguientes etapas principales del ensayo:

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

- **Limpieza inicial de la muestra**

Antes del ensayo de aplicación del penetrante las superficies debe limpiarse de contaminantes (grasas, óxidos, escorias o recubrimientos). Empleándose, limpiadores como detergentes, disolventes o decapantes.

Finalizada esta etapa, es imprescindible asegurar que la pieza esté completamente seca para garantizar la efectividad del ensayo.

- **Aplicación líquido penetrante**

Se puede aplicar a través de tres métodos: inmersión en piscinas o envase, pulverización tipo spray o aplicación directa con brocha. En la práctica, suele utilizarse un pigmento rojo para facilitar la visualización de las discontinuidades.

Para que el penetrante sea eficaz en inspecciones, debe cumplir con ciertas características esenciales.

- ✓ Alta resistencia a la evaporación, que permite mantener su efectividad durante el tiempo de penetración.
- ✓ Aplicación sencilla y uniforme sobre la superficie del material.
- ✓ Capacidad para penetrar micro-fisuras y cavidades estrechas mediante acción capilar.
- ✓ Aptitud para permanecer en discontinuidades amplias, sin escurrirse fácilmente.
- ✓ Conservación del color o fluorescencia, incluso después del tiempo de exposición.
- ✓ Dificil remoción una vez que ha ingresado en la discontinuidad, asegurando una detección confiable.
- ✓ Capacidad de formar capas delgadas, lo que mejora la sensibilidad del ensayo.
- ✓ Buena absorción en defectos superficiales, facilitando la revelación posterior.
- ✓ Propiedades físico-químicas seguras: producto atóxico, no corrosivo, además de no inflamable. Presentar estabilidad durante el almacenamiento y tener un costo accesible.

- **Intervalo de exposición al penetrante**

Resulta fundamental respetar el período de penetración establecido, ya que garantiza que el líquido se infiltre adecuadamente en las irregularidades de la pieza. Este intervalo, indicado por el fabricante en el envase del producto, debe ser controlado rigurosamente para asegurar la eficacia del ensayo.

- **Eliminación del líquido sobrante**

La remoción del exceso de penetrante puede efectuarse mediante distintos métodos, tales como la inmersión de la pieza, la aplicación por pulverización o el rociado con líquido limpiador dentro de un baño específico. La elección del método dependerá del tipo de pieza, del producto utilizado y de los requerimientos del procedimiento de ensayo.

- **Aplicación del líquido revelador**

El material de revelado, de color blanco frecuentemente, se coloca cuidadosamente mediante inmersión, rociado o pulverización, considerando su alta volatilidad. Tras su aplicación, las áreas de la pieza que retengan trazas del líquido penetrante se evidencian de forma visible, facilitando su identificación.

- **Examen de la pieza**

Las discontinuidades se manifiestan de manera nítida y precisa a lo largo de la superficie examinada. Para los líquidos penetrantes fluorescentes, la inspección debe realizarse bajo iluminación ultravioleta, utilizando lámparas de vapor de mercurio.

. En cuanto a los líquidos penetrantes tradicionales, la observación se efectúa bajo luz natural, donde las imperfecciones se evidencian como manchas rojas en las áreas comprometidas.

- **Limpieza posterior a la soldadura**

“Hay que eliminar todo tipo de resto de líquidos, ya sean penetrantes o reveladores, limpiándolos con disolventes, detergentes, etc.”. (Destructivos, 2009)

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”.

Entre los ensayos de dureza más utilizados se encuentra:

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

b) Ensayo de doblado

El propósito del ensayo es determinar la deformación plástica y calidad en el área de soldadura. Implica el doblado de la probeta en forma de “U” para posteriormente inspeccionar visualmente la región deformada.

Este método se emplea en la calificación de la técnica de soldadura, como en la comprobación de la destreza de soldadores y operadores de equipos.

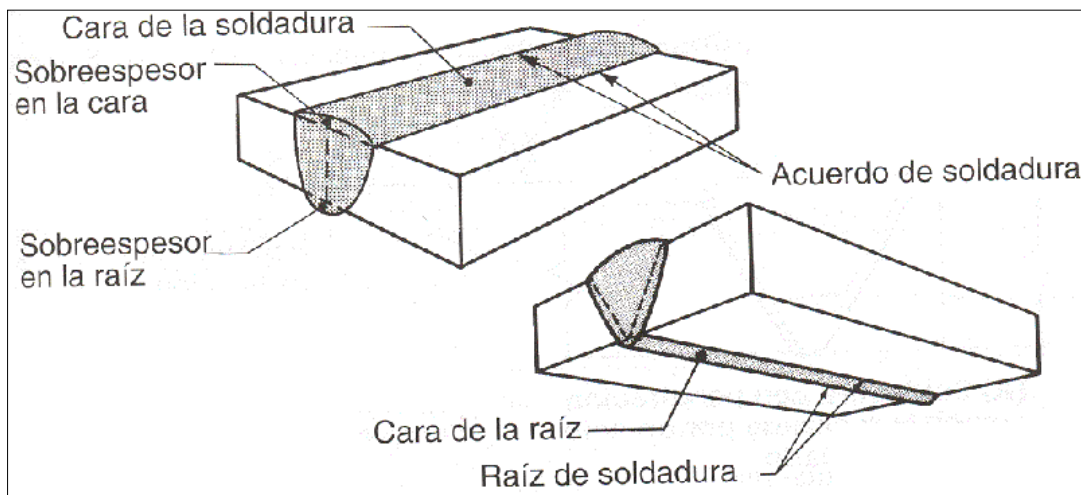
- ✓ Doble transversal de raíz
- ✓ Doble transversal de cara

- ✓ Doble longitud de cara
- ✓ Doble longitud de raíz (Cesol, 2013).

La figura 26 ilustra la configuración de la matriz utilizada en el ensayo de doblez, así como los tipos de doblez aplicados sobre la probeta: el doblez en la parte externa (cara) y el doblez en el fondo (raíz), ambos fundamentales para analizar la continuidad y resistencia de la soldadura en sus zonas críticas.

Figura 26

Depósito de soldadura en cara y raíz.



Fuente: Walteros Larrotta (2010)

Estos ensayos tienen carácter cualitativo, ya que su objetivo principal es verificar que las probetas sometidas a prueba no presenten fisuras ni discontinuidades visibles tras el proceso de deformación.

Para que el ensayo sea considerado válido, deben cumplirse los siguientes criterios de aceptación establecidos por la normativa correspondiente.

- ✓ Los defectos detectados en la superficie no deben tener una longitud superior a 3 mm, sin importar su dirección.

- ✓ En conjunto, en una unión soldada la suma de las discontinuidades no debe ser mayor de 10 mm, y las longitudes permitidas deben estar entre 1 mm hasta 3 mm.

Estos criterios dependerán de la longitud de la soldadura, el espesor del material base, el tipo de juntas, y de las especificaciones de la obra.

2.19 Las Discontinuidades en Soldadura

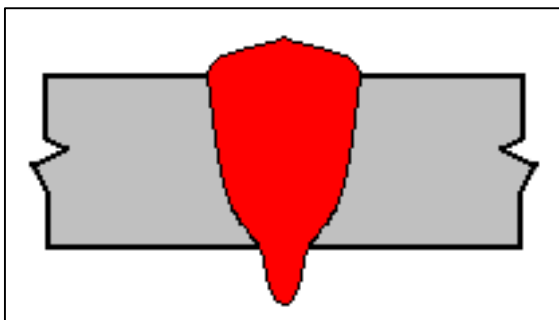
Los defectos de soldadura se dividen en dos categorías, internas y superficiales, basándose en su posición.

Discontinuidades Superficiales

- a) *Exceso de penetración*: Es el resultado de un movimiento que permite al electrodo penetrar en los biseles, los cuales son distribuidos en esas áreas. Causa que el material chorree al interior y puede retener escoria o no en su interior. Este defecto puede producir en soldadura de gaseoductos, desgaste por erosión. La imagen radiográfica da una densidad más clara en el centro del ancho de la imagen, ya sea extendida a lo largo de la soldadura o en gotas circulares aisladas, pudiendo presentar en su interior una mancha deforme negra figura 27.

Figura 27

Exceso de penetración



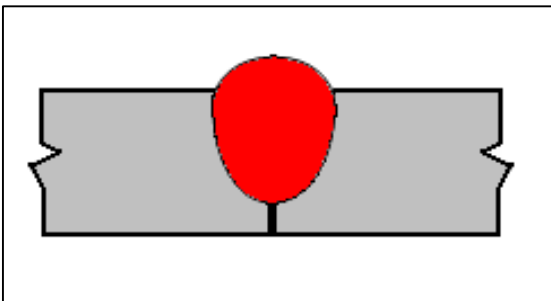
Fuente:(AISI, 2017).

- b) *Falta de penetración*: Al ser visibles desde la cara posterior, las imperfecciones en las uniones en U o en V pueden clasificarse como superficiales. A menudo la raíz de la

soldadura no quedará adecuadamente rellena con metal dejando un vacío que aparecerá en la radiografía como una línea negra oscura firmemente marcada, gruesa y negra, continua o intermitente reemplazando el cordón de la primera pasada. Puede ser debida a una separación excesivamente pequeña de la raíz, a un electrodo demasiado grueso, a una corriente de soldadura insuficiente, a una velocidad excesiva de pasada, penetración incorrecta en la ranura. La presencia de este defecto es típicamente inaceptable, lo que exige la eliminación del pase de soldadura defectuoso y la repetición completa del proceso (ver Figura 28).

Figura 28

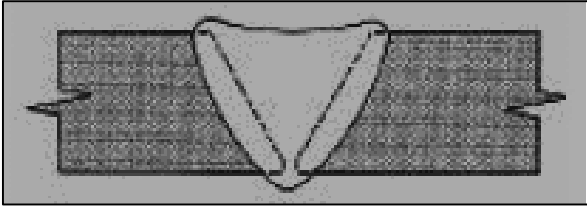
Falta de penetración



Fuente:(AISI, 2017).

- c) *Concavidades*. Hay dos tipos de estas discontinuidades, una de ellas es la deficiencia en el relleno que se refleja en la concavidad externa, se caracteriza por la falta de soldadura en la superficie del cordón, causada por una insuficiente aplicación del metal aportado por el electrodo durante el procedimiento de SMAW.

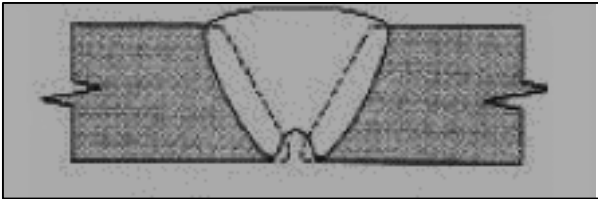
En la imagen radiográfica, esta discontinuidad se manifiesta como una zona de mayor oscuridad en comparación con las piezas base, indicando una menor densidad en la soldadura. Esta área se extiende a lo largo de todo el ancho de la imagen (ver figura 29)

Figura 29*Concavidad externa*

Fuente:(AISI, 2017).

La concavidad interna corresponde a una deficiencia de refuerzo en el área interior en el cordón de soldado, especialmente en la primera pasada. Este defecto se produce cuando el material depositado es insuficiente y, tras el enfriamiento, el espesor resultante es inferior al del material base.

En la imagen radiográfica, se observa como una zona de menor densidad que se extiende en la raíz de la soldadura (ver figura 30)

Figura 30*Concavidad interna*

Fuente:(AISI, 2017).

d) *Socavaduras de borde*: también denominadas mordeduras de borde, son cavidades o hendiduras formadas en el acero base, ubicadas en la raíz o al refuerzo del cordón de soldadura. Estas se generan cuando el material base se funde pero no es adecuadamente rellenado con el metal de aporte, dejando una ranura sin cubrir.

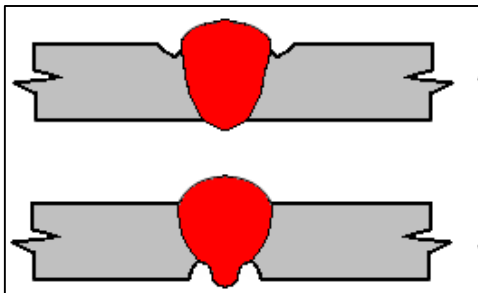
En la imagen radiográfica, se identifican como zonas de pérdida de material en los bordes del cordón (ver figura 34).

Corrección de causas

- ✓ ·Calor Excesivo: se debe ajustar el amperaje del generador de corriente para evitar sobrecalentamiento del material base.
- ✓ Electrodo inadecuado: es necesario sustituir el electrodo por uno que se adecúe a las características del proceso y del material.
- ✓ Manipulación incorrecta: se recomienda mejorar la técnica de movimiento manual para asegurar una aplicación uniforme y controlada.
- ✓ Arco muy intenso: se debe regular la intensidad del arco para evitar defectos asociados al exceso de energía.
- ✓ Velocidad inadecuada: es fundamental corregir el avance de la soldadura y optimizar la velocidad de desplazamiento (del electrodo) para lograr una fusión adecuada.

Figura 31

Socavaduras o mordeduras de borde



Fuente:(AISI, 2017).

- e) *Quemado*: discontinuidad que se presenta en la zona de la raíz, donde ocurre un exceso de penetración que provoca que el metal de aporte atraviese completamente la junta, generando una expulsión del material. Este defecto se origina por condiciones de calor excesivo en un área localizada, comúnmente asociadas a una corriente demasiado alta, una velocidad de avance lenta o una manipulación inadecuada del electrodo. Como

consecuencia, se produce la destrucción total de biseles. La figura 32, la discontinuidad es visible.

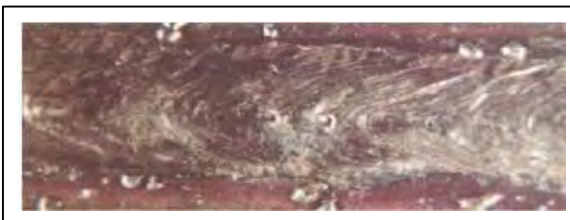
Figura 32
Quemado



Fuente:(AISI, 2017).

- f) *Salpicaduras*: imperfecciones caracterizadas por esferas pequeñas de metal que se depositan aleatoriamente sobre el cordón de soldadura y sus alrededores. Su aparición puede estar asociada a la presencia de humedad en el revestimiento del electrodo, Así como otras causas. Esta discontinuidad se puede ver en la Figura 33

Figura 33
Salpicaduras de metal.



Fuente:(AISI, 2017).

- g) *Falta de continuidad del cordón*: Ocurre cuando al interrumpir la soldadura y posteriormente se reanuda el procedimiento de soldado de forma incorrecta. Su severidad es muy variable ya que, en los casos más severos, pueden considerarse auténticas faltas de fusión transversales, en tanto que, en otras ocasiones, son simples surcos normales al eje del cordón. Su aspecto radiográfico es el de una línea oscura u oblicua, relativamente nítida figura 34.

Figura 34*Falta de continuidad del cordón*

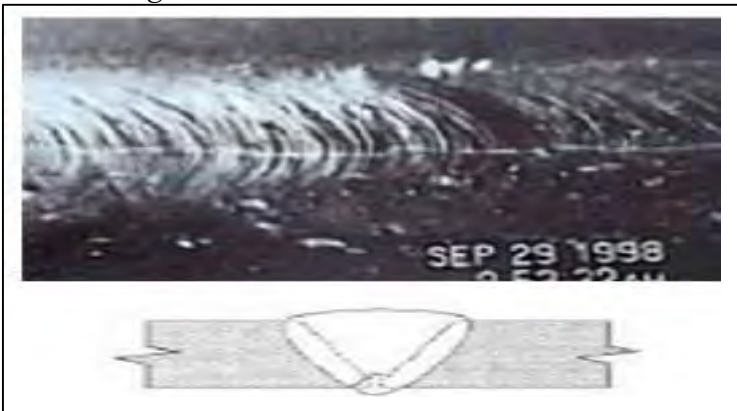
Fuente:(AISI, 2017).

Discontinuidades Internas

Se clasifican en:

a) Fisuras longitudinales

Las grietas se manifiestan en el cordón de soldadura, comúnmente como resultado de movimientos durante el proceso o posteriores a la solidificación. También pueden presentarse en la inter-fase entre el acero base y el aporte del electrodo. El defecto es particularmente común en materiales gruesos si el enfriamiento es repentino o si no se aplica el pre-calentamiento necesario. La Figura 35 ilustra esta discontinuidad.

Figura 35*Fisuras longitudinales*

Fuente:(AISI, 2017).

b) Fisuras transversales

Estas fisuras se generan principalmente en aceros de alta dureza debido a la interacción de ciertos elementos que, al enfriarse hasta alcanzar la temperatura ambiente, provocan la formación de grietas. Estas fisuras pueden limitarse al cordón de soldadura o extenderse hacia el metal base circundante, comprometiendo la integridad de la unión.

Estas fisuras se generan principalmente en aceros de alta dureza, como resultado de la interacción de ciertos parámetros que, durante el enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente, provocan la formación de grietas. Dichas fisuras pueden permanecer limitadas a las capas de soldadura o extenderse hacia el acero base. Esta discontinuidad se ve en la Figura 36

Figura 36

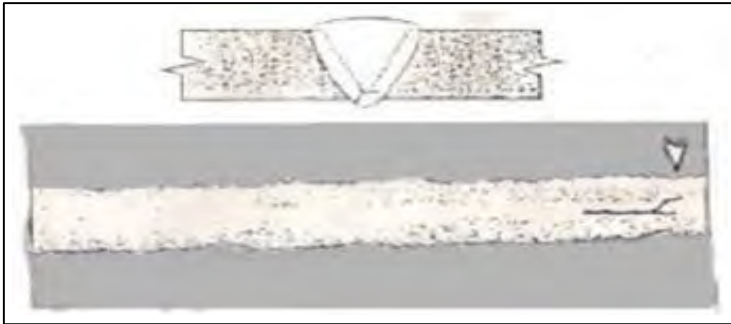
Fisuras transversales



Fuente:(AISI, 2017).

c) Fisura de interrupción o arranque (de cráter)

Durante el reinicio del procedimiento de soldado, especialmente al colocar el nuevo electrodo, podrían generar grietas con morfología estrellada. Estas se originan por el efecto combinado de un enfriamiento abrupto seguido de un recalentamiento localizado, lo que induce tensiones térmicas en el material. Se clasifican como fisuras en caliente. Esta discontinuidad es visible en la Figura 37.

Figura 37*Fisura de interrupción*

Fuente:(AISI, 2017).

d) Fisuras periféricas al cordón

La causa principal de las fisuras es la omisión de un pre-calentamiento adecuado, una condición crucial en algunos tipos de aceros. Son frecuentes en materiales de alta dureza, donde la “zona afectada por el calor” (ZAC) desarrolla estructura de martensítica como consecuencia del recorrido de la temperatura versus tiempo en el ciclo térmico. También pueden presentarse en piezas de gran espesor. Ilustrada en la figura 38

Figura 38*Fisuras en la zona afectada por el calor*

Fuente:(AISI, 2017).

e) Falta de penetración

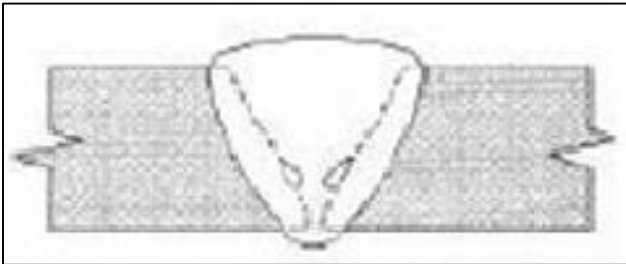
La falla en la penetración ocurre en la raíz debido a que la temperatura no logra fusionar adecuadamente esa área. En configuraciones de junta tipo X o K, la raíz se ubica en el centro del cordón, por lo que la ausencia de metal de aporte en dicha región constituye una discontinuidad estrictamente interna. Esta condición se representa en la figura 39

Figura 39*Falta de penetración*

Fuente:(AISI, 2017).

f) Deficiencia en la fusión

La deficiencia de la fusión suele producirse cuando no se alcanza la temperatura mínima para una correcta fusión del electrodo y el metal base previamente a la deposición de la soldadura, solidificado. Esta discontinuidad impide la correcta unión entre los materiales involucrados. Se muestra en la figura 40

Figura 40*Falta de fusión*

Fuente:(AISI, 2017).

- **Inadecuada fusión entre capas sucesivas.**

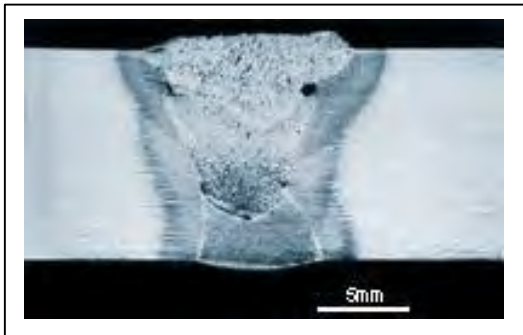
La discontinuidad ocurre en las interfaces de la soldadura, ya que no se logra una fusión adecuada entre cordones adyacentes del metal aportado o en la unión del metal base con la capa de soldadura. Generalmente, se origina debido a la presencia de una fina capa de óxido en las superficies, causada por un calentamiento insuficiente del metal base o la

aplicación de un volumen excesivo de metal de soldadura, lo que impide que los óxidos, la escoria o las impurezas migren hacia la superficie.

Esta discontinuidad se presenta en las inter-fases de la soldadura, donde no ocurre una fusión adecuada entre capas contiguas de metal de aporte o entre el metal base y el cordón de soldadura. Generalmente, se debe a la presencia de una delgada capa de óxido en las superficies, la cual puede originarse por insuficiente calentamiento del metal base o por la deposición de un volumen elevado de metal de soldadura que impide la migración de óxidos, escoria o impurezas hacia la superficie

Esta falta de fusión también puede originarse por una corriente insuficiente o por una deficiencia en el arco eléctrico por falta de pericia. Cuando el arco se concentra sobre uno de los lados, el otro puede quedar sin fundirse adecuadamente, generando una discontinuidad en la unión. Esta condición se representa en la figura 41

Figura 41
Falta de fusión



Fuente:(AISI, 2017).

Discontinuidades Como Inclusiones

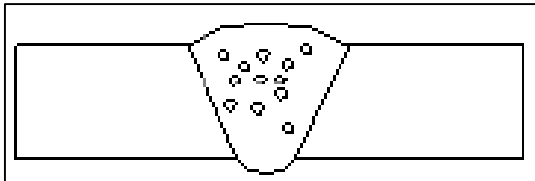
a) Inclusiones gaseosas

Durante el proceso de soldadura, pueden generarse gases en el metal fundido debido a diversas causas. Si estos gases no logran escapar antes de la solidificación, quedan atrapados en el cordón, formando discontinuidades internas.

Cuando se presentan en forma de cavidades redondeadas, se denominan porosidades esféricas; si adoptan una morfología alargada, se clasifican como porosidad tubular o vermicular. Esta discontinuidad se observa en la figura 42

Figura 42

Inclusiones gaseosas



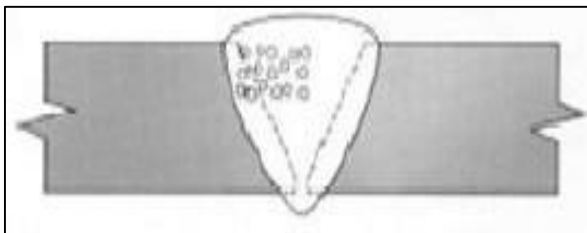
Fuente:(AISI, 2017).

b) Porosidad agrupada

Esta forma de porosidad (nidos de poros) se genera principalmente por la presencia de agentes oxidantes o por una humedad excesiva en el revestimiento del electrodo. También puede deberse a capas de oxidadas existentes superficialmente en los biseles (chaflanes), que liberan gases atrapados durante la fundición. Los poros resultantes suelen presentar un tamaño uniforme en toda la zona afectada. Ilustración en la figura 43

Figura 43

Porosidad agrupada



Fuente:(AISI, 2017).

c) Porosidad alineada

Esta discontinuidad suele presentarse en la pasada de base del cordón de soldadura, como resultado de dificultades en la penetración del electrodo. Puede estar asociada a una regulación eléctrica inadecuada en relación con el tipo de fundente empleado, especialmente

en procesos realizados con máquinas automáticas. Asimismo, puede influir la acumulación localizada de ciertos componentes del fundente. Esta condición se representa en la figura 44.

Figura 44
Porosidad alineada

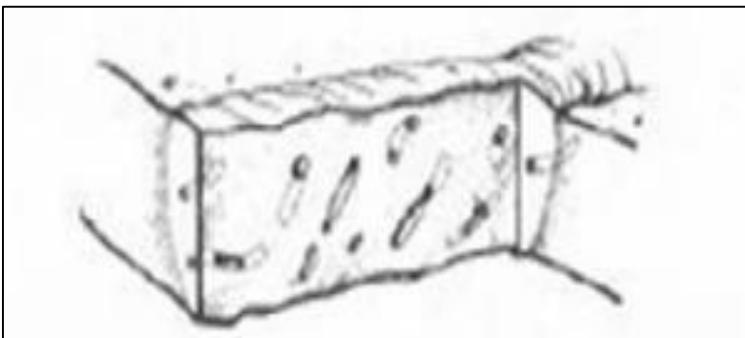


Fuente:(AISI, 2017).

d) Inclusiones no metálicas

Estas discontinuidades se originan por la presencia de agentes externos, los cuales pueden provenir del propio material de aporte. La evidencia de este defecto en la unión soldada debilita la unión. La Figura 45 ilustra esta discontinuidad.

Figura 45
Inclusiones no metálicas



Fuente:(AISI, 2017).

e) Inclusiones de escoria aisladas

Es frecuente que las escorias queden atrapadas en el metal de soldadura mientras se solidifica. Estas inclusiones están compuestas principalmente por residuos de carbono,

óxidos de metales y compuestos silíceos, y afectan la continuidad y resistencia de la unión.

Esta discontinuidad se representa en la figura 46

Figura 46

Inclusión de escoria aisladas



Fuente:(AISI, 2017).

Las escorias pueden originarse tanto por el recubrimiento del electrodo como del aporte que se funde utilizado en el proceso de soldadura. Las inclusiones de escoria están comúnmente relacionadas a condiciones como falta de penetración, fusión incompleta, presencia de una raíz para el cordón inicial muy grande, diseño de junta en “V” muy estrecha, así como deficiencias en la técnica del soldador.

f) Escorias alineadas

Este tipo de discontinuidad se genera por movimientos incorrectos del electrodo durante la aplicación manual de la soldadura, lo que provoca que las inclusiones se alineen a lo largo de los costados del cordón. En procesos automáticos, el defecto suele originarse por una calibración deficiente del generador de corriente o debido falta de mantenimiento, lo que permite que el fundente quede atrapado en el centro del cordón. Se trata de una discontinuidad particularmente agresiva que compromete seriamente la integridad de la unión. Esta condición se observa en la figura 47.

Figura 47
Escorias alineadas.

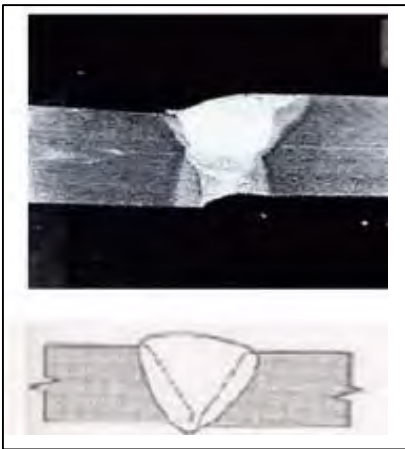


Fuente:(AISI, 2017).

g) Desalineado (high low).

La figura 48 muestra el deslizamiento de las partes a soldar

Figura 48
Desalineado



Fuente:(AISI, 2017).

2.20 Calificación del Procedimiento

Previo al inicio de la fase productiva, es necesario desarrollar y calificar un procedimiento de soldadura detallado que garantice que las uniones generadas cumplan con los parámetros mecánicos y metalúrgicos especificados. La eficiencia de la unión soldada

será verificada mediante la aplicación de ensayos destructivos y no destructivos, siguiendo las normas técnicas vigentes.

Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

El WPS “Welding Procedure Specification” es un procedimiento elaborado y validado por el área técnica (ingeniería), cuyo propósito es proporcionar instrucciones precisas al personal encargado de ejecutar e inspeccionar las soldaduras durante la etapa de producción.

Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)

El PQR “Procedure Qualification Record” es el procedimiento técnico que respalda y valida el WPS. En él se asientan las variables empleadas durante la ejecución de la prueba de soldadura, así como los parámetros arrojados por los ensayos aplicados a las diferentes condiciones de unión. Este registro constituye la evidencia documental de que el procedimiento propuesto cumple con los requisitos técnicos exigidos para su aplicación en producción.

Calificación de Soldadores (WPQ)

Los ensayos de calificación de desempeño se documentan en el certificado de calificación del soldador o en el registro de desempeño. Este informe contiene los resultados de las pruebas exigidas por el código aplicable, con el objetivo de verificar la capacidad del soldador para ejecutar uniones libres de discontinuidades y con calidad aceptable según los criterios establecidos.

CAPITULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis General y Específicos

Hipótesis General

La velocidad de enfriamiento en el procedimiento de unión soldada por arco manual con electrodo revestido (SMAW) tiene un impacto significativo en la unión soldada con acero base AISI 4140, y se espera que las variaciones en esta velocidad influyan en la formación de fisuras, la micro-estructura de las soldaduras, las propiedades mecánicas (dureza) y la calidad general de las uniones soldadas.

Hipótesis Específicas

- Existe una correlación directa entre la rapidez de enfriado y la aparición de fisuras en las uniones soldadas del acero AISI 4140 mediante el proceso SMAW; velocidades de enfriamiento más elevadas incrementan la probabilidad de formación de fisuras en la ZAC y el metal de aporte.
- La micro-estructura y la extensión de la “zona afectada por el calor” (ZAC) en soldaduras de acero AISI 4140 realizadas por SMAW varían significativamente en función de la velocidad de enfriamiento, generando diferencias en la proporción de fases como martensita, bainita y perlita.
- La dureza del depósito de soldadura utilizando el procedimiento SMAW y acero base AISI 4140 se incrementa con el aumento de la rapidez de enfriado, afectando la tenacidad y la efectividad de la unión.

3.2 Variable Independiente y Dependiente

Variable Independiente

- Velocidad de enfriamiento
- Tipo de electrodo
- Parámetros de operación

Variables Dependientes

- Formación de fisuras
- Micro-estructura y “Zona Afectada por el Calor” (ZAC)
- Propiedades Mecánicas (dureza, tenacidad, impacto, ductilidad, fatiga y resistencia al impacto)

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Ámbito de Estudio

Las actividades se realizan en el taller metalúrgico de la “Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, en Cusco”, Perú.

4.2 Tipo o Nivel de Investigación

a) Exploratorio

Abordará de manera exhaustiva cada aspecto relacionado con el desarrollo del trabajo, mediante el análisis detallado de los parámetros involucrados. Para ello, se formularán hipótesis pertinentes y se identificarán las variables clave que orientan el interés científico del estudio.

b) Descriptivo

Esta investigación se desarrolla a partir de la descripción del problema en un contexto espacial específico, lo que permite abordar la situación de manera localizada y pertinente. Asimismo, el enfoque adoptado resulta el más adecuado para atender la problemática planteada, considerando tanto su origen como las condiciones en las que se lleva a cabo su desarrollo.

c) Correlacional

Esta investigación busca identificar o definir la correlación existente entre variables en del procedimiento de unión SMAW y las modificaciones de las características del acero base, mediante la evaluación de hipótesis formuladas y sujetas a verificación empírica. El enfoque adoptado permite establecer relaciones significativas sin implicar necesariamente una dependencia directa entre los factores analizados.

d) Explicativa

La presente investigación tiene como objetivo informar sobre un aspecto específico de la realidad, interpretando dentro de un marco teórico de referencia. Este enfoque busca comprender el porqué de los fenómenos mediante el análisis de relaciones causales que permiten establecer vínculos de causa y efecto entre las variables estudiadas.

4.3 Población y Muestra

Población

La población esta constituidas por todas aquellas uniones donde se utiliza el procedimiento SMAW donde el acero base es el AISI 4140.

Muestra

La muestra es no probabilística y consiste en la selección de cuatro probetas de uniones soldadas mediante el proceso SMAW, utilizando como metal base planchas de acero AISI 4140. En estas probetas se identifican cambios en los parámetros mecánicos atribuibles a las diferentes velocidades de enfriamiento presentes en las uniones soldadas.

4.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Técnicas

Las diferentes técnicas para la inspección visual fueron aplicadas como parte del proceso de evaluación, considerando que las probetas estarán sujetas tanto a ensayos no destructivos como destructivos. La información resultado de la investigación será sistematizada, analizada y procesada rigurosamente, con el fin de interpretar los resultados y derivar conclusiones pertinentes al objeto de estudio.

4.5 Viabilidad

La ejecución del presente trabajo es factible, ya que se dispone de todos los recursos, herramientas y equipos indispensables para el adecuado desarrollo de las actividades experimentales y analíticas previstas.

CAPITULO V

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO EXPERIMENTAL

5.1 Maquinaria y Equipos

a) Máquina de soldar

Con el fin de llevar a cabo las soldaduras en las planchas se usó la máquina para soldar perteneciente al taller metalúrgico de la “Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica”. A continuación, se detallan sus principales características técnicas: 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 Foto 1, se muestra el generador de corriente utilizado.

Foto 1.

Generador de Corriente



b) Equipo de ensayo de doblado.

La Foto 2 muestra el equipo instalado en el taller metalúrgico “Escuela de Ingeniería Metalúrgica”, se muestra el equipo utilizado para realizar los ensayos de doblado (guiado en U), el cual opera con una presión de trabajo de hasta 20 toneladas, permitiendo valorar la ductilidad y resistencia de las uniones soldadas bajo condiciones controladas.

Foto 2.

Fuente de Poder

**c) Durómetro portátil**

La Foto 3, muestra el durómetro portátil empleado en la evaluación de la dureza de las probetas soldadas. Este instrumento permite realizar mediciones rápidas y confiables directamente sobre la superficie del material, sin necesidad de extracción de muestras.

Foto 3.

Durómetro portátil



- **Características:**

- ✓ Botón SNAP para captura rápida de imágenes.
- ✓ Enfoque manual ajustable entre 50x y 1600x.
- ✓ Rango de enfoque: de 8 mm a 1000 mm.
- ✓ Iluminación LED: 8 luces con ajuste de intensidad de brillo.
- ✓ Compatibilidad: Windows Vista, XP, 7, 8 y 10 (32 y 64 bits).
- ✓ Resolución de imagen: 1600×1200p, 1280×960p, 640×480p, 480×360p.
- ✓ Resolución de video: 1600×1200p, 1280×960p, 640×480p, 480×360p.
- ✓ Rango de ampliación: desde 20x hasta 1600x.

d) Microscopio digital portátil

La Foto 4, presenta el microscopio portátil utilizado durante el proceso de inspección visual. Este instrumento permite la observación detallada de la superficie de las probetas, facilitando la identificación de discontinuidades y características morfológicas relevantes para el análisis técnico.

Foto 4.

Microscopio digital portátil



- **Característica**

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

e) Material utilizado

- ✓ Productos para líquidos penetrantes

La Foto 5, muestra un conjunto de productos de líquidos penetrantes utilizado para la ejecución del correspondiente ensayo no destructivo.

Foto 5.

Productos de Ensayo Líquidos penetrantes



- **Características:**

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

Se trata de productos en aerosol que se utilizan para encontrar defectos como grietas, poros, entre otros

- ✓ 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 Utilizados Para Preparar las Muestras

a) Material base

En esta investigación, se emplearon de material base planchas de AISI 4140, clasificado como acero templado y revenido, también conocido como acero bonificado. La Figura 49 muestra las probetas que se usaron en los ensayos, que poseen propiedades mecánicas que las convierten en aptas para aplicaciones estructurales y de alta exigencia, especialmente en procesos de soldadura y evaluación metalúrgica.

La ficha técnica correspondiente al acero AISI 4140 se presenta en el anexo 2, donde se detallan los parámetros físico-químicos y mecánicos. Donde se obtuvieron los valores utilizados en los cálculos de esta investigación. Posteriormente, se identificaron las planchas, muestras y probetas utilizadas en los diferentes ensayos.

Foto 6.

Planchas AISI 4140 cortadas



5.1.1.1 Composición química del acero AISI 4140:

Los elementos químicos del ASTM AISI 4140 se especifican en la Tabla 14.

Tabla 14

Composición química del acero ASTM AISI 4140

C(%)	Si (%)	Mn(%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo(%)
0.38-0.43	≤0.4	0.75-1	≤0.035	≤0.04	0.8-1.1	0.15-0.25

Fuente:(AISI, 2017).

5.1.1.2 Propiedades mecánicas.

La Tabla 15, muestra las características mecánicas del AISI 4140.

Tabla 15

Características del AISI 4140

Resistencia en estado Recocido		CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN ESTADO BONIFICADO						
máx. N/mm ²	Dureza Brinell máx.	Diámetro mm.		Límite de fluencia N/mm ²	Resistencia a la tracción N/mm ²	Elongación (Lo = 5d) % mín.	Estricción % mín.	Resiliencia según DVM Joule
		desde	hasta					
770	241		16	835	1030 - 1250	10	40	34
		16	40	715	930 - 1130	11	45	41
		40	100	595	830 - 1030	12	50	41
		100	160	530	730 - 900	13	55	41
		160	250	490	690 - 840	14	55	41

Fuente: Catálogo BHÖLER – VOESTALPINE

a) Material de aporte.

En la fase experimental de la presente investigación se empleó el electrodo E8018-B6, seleccionado por sus propiedades específicas para la soldadura de aceros aleados como el AISI 4140. La ficha técnica correspondiente a este consumible se encuentra detallada en el anexo 1, donde se especifican sus características químicas, mecánicas y condiciones de aplicación.

El electrodo E8018-B6 es un consumible revestido (tipo básico), cuya aleación del metal depositado está compuesta principalmente por acero al cromo-molibdeno con una composición aproximada de 5 % Cr y 0,5 % Mo. Es especialmente recomendado para la soldadura de tuberías sometidas a condiciones exigentes.

Entre sus principales características destacan su excelente comportamiento frente a la deformación y capacidad de carga, una vez aplicada la energía térmica correspondiente, así como una notable estabilidad de arco y baja generación de chisporroteo durante el proceso. Se recomienda su uso con corriente continua en polaridad directa (polo positivo al electrodo).

5.1.1.3 Aplicaciones Típica

- ✓ Para soldar aceros tipo CrMo (5% Cr - 0,5% Mo).
- ✓ 12CrMo 19-5, X12CrMo5; ASTM A182 Gr. F5, ASTM A199 Gr. T5, ASTM A213 Gr. T5, ASTM A335
- ✓ Gr. P5.
- ✓ ASTM A336 ClF5, ASTM A369 Gr.FP5, ASTM A387 Gr.5 Cl 1 y 2.
- ✓ Análisis químico y propiedades del electrodo E-8018-B6

El análisis químico del aporte del E-8018-E6, así como las especificaciones de fabricación, se presentan en la tabla 16 y tabla 17 respectivamente. Estos datos permiten evaluar la composición elemental del material aportado y su comportamiento frente a esfuerzos mecánicos, aspectos fundamentales para validar la calidad de la soldadura realizada.

La importancia de estas evaluaciones va más allá de un simple control de calidad. El análisis de la composición química, por ejemplo, permite confirmar que el material aportado cumple con los estándares especificados para una aplicación particular, asegurando que elementos como el carbono, manganeso o cromo estén en las proporciones correctas para conferir las propiedades deseadas, como la resistencia a la corrosión o la dureza. Por otro lado, la evaluación de las propiedades mecánicas, que incluye pruebas de tracción, dureza y tenacidad al impacto, determina si la soldadura es capaz de soportar las cargas de trabajo previstas sin fallar. La combinación de estos análisis valida que la unión soldada no solo tiene

la composición adecuada, sino que también posee el rendimiento mecánico necesario para cumplir con los requisitos de diseño y seguridad de la estructura.

Tabla 16

Análisis químico depositado electrodo E-8018-B6

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	----	-----

Fuente: Manual de bolsillo. Orelikon S.A.

Tabla 17

Propiedades mecánicas del electrodo E 8018-B6

Tratamiento térmico	Resistencia tracción (psi)]	la [MPa a	Límite de fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía absorbida (+20°C) [J]
Tratamiento Térmico (1)	600 – 700 (87000-101500)	-	> 460 (66700)	> 19	[+20 °C (+68 °F)] > 100 (74)

Fuente:(AISI, 2017).

5.2 Probetas Objeto de Investigación

a) Características de las probetas

Para el análisis se utilizaron 8 planchas, se identificaron con las denominaciones: desde 1A hasta 4A, y desde 1B hasta 4B. Las uniones soldadas se obtuvieron de la siguiente manera: muestra 1 (1A,1B), muestra 2 (2A,2B), muestra 3 (3A,3B) y muestra 4 (4A,4B), posteriormente se prepararon y revisaron obteniéndose las probetas No.01, No. 02, No, 03 y No. 04. En la Foto 7 se visualizan las planchas utilizadas como objeto de estudio en la presente investigación. Las especificaciones técnicas correspondientes a dichas probetas, tales como dimensiones, tipo de preparación, material base y codificación, se describen en la tabla 18.

Foto 7.

Planchas de AISI 4140 preparadas. Identificación

**Tabla 18**

Dimensiones de las planchas para las muestras

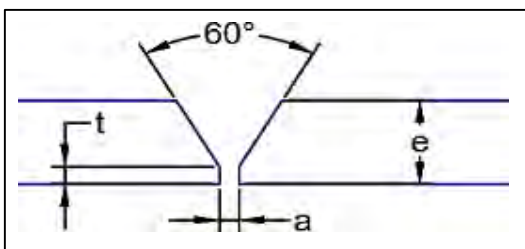
Denominación (por probeta individual)	Dimensión
Ancho (mm)	150
Longitud (mm)	200
Espesor (mm)	$\frac{1}{4}$ " (6.35 mm)

Fuente: propia

Considerando las características dimensionales y metalúrgicas de las muestras, se seleccionó la unión (junta) a tope y bisel en "V" de 60° para la preparación de las muestras. Esta clase de preparación permite una adecuada penetración y distribución del material de aporte, figura 49.

Figura 49

Nomenclatura junta a soldar



Fuente: propia

La figura 19, se detalla la nomenclatura correspondiente a la junta seleccionada para el procedimiento de unión SMAW. Esta información incluye los parámetros geométricos,

tipo de bisel, dimensiones de apertura, ángulo de preparación y demás características relevantes para la ejecución del procedimiento.

Tabla 19

Nomenclatura para la junta

Símbolo	Descripción	Probeta de experimentación
a	Cara de la raíz	2 mm
e	Espesor de la probeta.	6.35 mm
t	Abertura de raíz	2 mm

Fuente: propia

5.3 Capacidad de la Unión SAMW y AISI 4140

Cálculo de Carbono Equivalente

La figura 50, muestra una imagen del software usado.

Figura 50

Cálculo carbono equivalente

TABLA DE CÁLCULO CARBONO EQUIVALENTE			
ACEROS AL CARBONO			
Elemento químico		Introducir los porcentajes de cada uno % de los elementos indicados	
(C)	Carbono	0.005	
(Mn)	Manganeso	0.075	
(Cu)	Cobre		
(Ni)	Níquel		
(Cr)	Cromo	0.95	
(Mo)	Moibdeno	0.2	
(V)	Vanadio		
(Si)	Silicio	0.3	
Carbono equivalente (Ceq) - AWS		0.843%	$Ceq = C + [(Mn+Si)/5 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15]$ (fórmula larga incluye Si)
Carbono equivalente (Ceq) - O'Neil		0.781%	$Ceq = C + [(Mn)/5 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15]$ (fórmula larga)
Carbono equivalente (Ceq) - I corda		0.624%	$Ceq = C + [(Mn)/4]$ (fórmula corta)

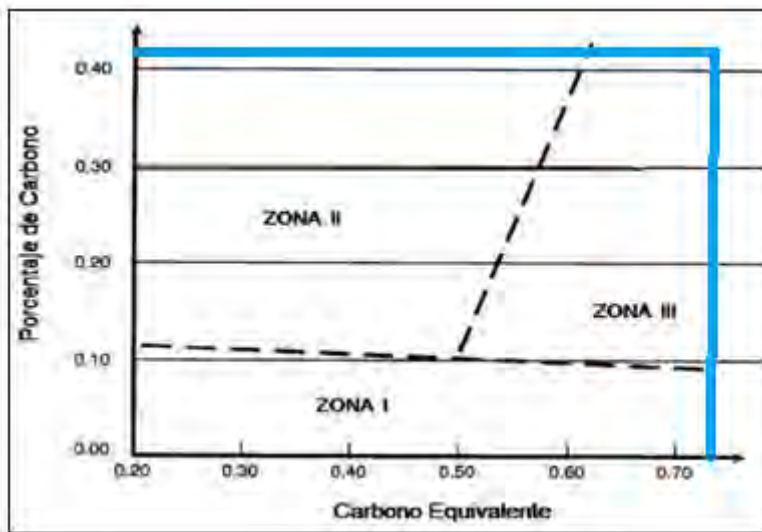
Fuente: www.protubsa.com

Haciendo uso del software de la empresa Protubsa, Se calculó un valor de “carbono equivalente” de 0.848, como se muestra en la figura correspondiente. Este resultado indica

una soldabilidad limitada, por lo que se requiere pre-calentamiento y tratamiento térmico posterior., lo nos indica que las probetas deben ser pre-calentadas.

El valor de “carbono equivalente” obtenido, figura 51, se ubica en la tercera zona del diagrama de Graville.

Figura 51
Diagrama de Graville



Fuente: Elaboración propia

Definición de la Temperatura de Pre-calentamiento para el AISI 4140.

El pre-calentamiento consiste en aumentar la temperatura del metal base justo antes de iniciar el procedimiento de unión SMAW, con el propósito de reducir la pendiente de la curva TTT. En términos prácticos, esto permite controlar la velocidad de enfriamiento, favoreciendo procesos más lentos que minimicen la creación de estructuras martensíticas de baja tenacidad.

Basado en los estudios Seferian propuso un método, en el cual plantea una expresión para determinar el “carbono equivalente total” (Ct), compuesto en primer lugar de la adición

de un componente químico de carbono equivalente, permitiendo evaluar como influyen diferentes elementos en las uniones soldadas, en este caso para el IASI 4140 por SMAW.

=

= 0.405 + +

= 0.005 * 6.35 *

A partir de los valores obtenidos, se determinó la temperatura de pre-calentamiento utilizando la fórmula propuesta por Seferian, la cual considera el “carbono equivalente” como parámetro principal para establecer condiciones térmicas adecuadas antes del proceso de soldadura.

= 350

Reemplazando valores, tenemos:

= 350

Especificaciones para la obtención de las muestras (WPS).

Las condiciones para la obtención de las muestras soldadas (donde se preparan las probetas), se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 20*Probeta No. 1, WPS*

		Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura						WPS	
Insti- tución:	Particular				Identifi- cación N°:	Probeta 1 (1A-1B)	
Proceso de soldadura:	SMAW				Soporte PQR N°:	PQR – 01	
Tipo :	Manua l	X	Automátic o:		Semiautomátic o:		Maquina: Miller- XMT 304 CC
Revisi- ón:	00	Fecha:	12 /07/2024		Revisado por:	Ing. Leonardo Avilés Hinojosa	
Diseño de la junta.				Posición			
Tipo de junta:		A tope		Ranura:		Filete:	
Tipo de soldadura:		Ranura “V”		en	Plancha :	1G	Tubería:
Abertura de raíz:		2 mm		Características eléctricas			
Talón altura de raíz o talón:		2 mm					
Angulo de ranura:		60°					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E 8018-B6		DC:		DCEP	X
Limpieza de la raíz:				Pulso:		DCEN	
Metal base				Técnica			
Datos	M.B.1	M.B.2		Aportación	Oscilació n	Recta	X
Grupo:				Pase:	Múltiple	Simple	
Especificac ión	AISI 4140			Limpieza en pases	Escobilla de acero		
Grado:				Precalentamiento			
Espesor:	6.35 mm			Temperatura de precalentamiento: (°C)			219
Diámetro:	5mm			Temperatura interpase:			----
				Postcalentamiento			
				Temperat ura:	-----	Tiempo:	-----

Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente :	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5		Composición	--	Composición	---	
Marca:	Nazca				Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:	-----						
Procedimiento de soldadura							
N.-de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamie nto. (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo de Polarida d	Amperaje (a)		
1	SMAW	E-8018-B6	5/32"	DC+	120	23	2.6
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Eliazar Delgado Collantes - Diego A. Vargas Julon.		Fecha.	12/06/2024			
Revisado por:	Ing. Leonardo Avilés H..		Institución:	Escuela Profesionales de Ingeniería Metalúrgica			

Fuente: www.protubsa.com.

Interpretación: Al aplicar los parámetros del WPS en la soldadura de la probeta 1, se detectó una deficiencia de fusión en la raíz de la unión, por penetración incompleta de aproximadamente 1 mm. Este defecto puede atribuirse a un aporte térmico insuficiente o a una preparación inadecuada de la junta, lo que limitó la correcta fusión entre los bordes.

Tabla 21*Probeta No. 02, WPS*

		Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura						WPS	
Institución:	Particular				Identificación N°:	Probeta 2 (2A-2B)	
Proceso de soldadura:		SMAW			Soporte PQR N°:	PQR – 01	
Tipo :	Manual	X	Automático:		Semiautomático:	Maquina:	Miller-XMT 304 CC
Revisión:	00	Fecha:	12 /07/2024		Revisado por:	Ing, Leonardo Avilés Hinojosa	
Diseño de la junta.				Posición			
Tipo de junta:		A tope		Ranura:		Filete:	
Tipo de soldadura:		Ranura “V” en		Plancha :	1G	Tubería:	
Abertura de raíz:		2 mm		Características eléctricas			
Talón altura de raíz o talón:		2 mm					
Angulo de ranura:		60°					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E 8018-B6		DC:		DCEP	X
Limpieza de la raíz:				Pulso:		DCEN	
Metal base				Técnica			
Datos	M.B.1	M.B.2		Aportación	Oscilación	Recta	X
Grupo:				Pase:	Múltiple	Simple	
Especificación	AISI 4140			Limpieza en pases	Escobilla de acero		
Grado:				Precalentamiento			
Espesor:	6.35 mm			Temperatura de precalentamiento: (°C)			219
Diámetro:	5mm			Temperatura interpase:			----
				Postcalentamiento			
				Temperatura:	-----	Tiempo:	-----

Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente :	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5		Composi ción	--	Composición	---	
Marca:	Nazca				Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:	-----						
Procedimiento de soldadura							
N.-de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		
1	SMAW	E-8018-B6	5/32"	DC+	140	25	2.6
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Eliazar Delgado Collantes - Diego A. Vargas Julon.		Fecha.	12/06/2024			
Revisado por:	Ing. Leonardo Avilés H..		Institución:	Escuela Profesionales de Ingeniería y Metalurgia			

Fuente: www.protubsa.com.

Tabla 22*Probeta Ni. 03, WPS*

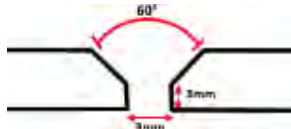
		Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura							WPS
Insti tución:	Particular				Identificaci ón N°:	Probeta 3 (3A-3B)	
Proceso soldadura:		de SMAW		Soporte PQR N°:		PQR – 01	
Tipo :	Manua l	X	Automátic o:		Semiautomátic o:	Maquina:	Miller- XMT 304 CC
Revis ión:	00	Fecha:	12 /07/2024		Revisado por:	Ing, Leonardo Avilés Hinojosa	
Diseño de la junta.				Posición			
Tipo de junta:		A tope		Ranura:		Filete:	
Tipo de soldadura:		Ranura en “V”		Plancha :	1G	Tubería:	
		Abertura de raíz:	2 mm		Características eléctricas		
Talón altura de raíz o talón:		2 mm					
Angulo de ranura:		60°					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E 8018-B6		DC:		DCEP	X
Limpieza de la raíz:				Pulso:		DCEN	
Metal base				Técnica			
Datos	M.B.1	M.B.2		Aportación	Oscilació n	Recta	X
Grupo:				Pase:	Múltiple	Simple	
Especificac ión	AISI 4140			Limpieza en pases	Escobilla de acero		
Grado:				Precalentamiento			
Espesor:	6.35 mm			Temperatura de precalentamiento: (°C)			219
Diámetro:	5mm			Temperatura interpase:			----
				Postcalentamiento			
				Temperat ura:	-----	Tiempo:	-----

Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente :	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5		Composi ción	--	Composición	---	
Marca:	Nazca				Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:	-----						
Procedimiento de soldadura							
N.-de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamie nto. (mm/seg)
		Clase	Diámetr o	Tipo de Polarida d	Amperaje (a)		
1	SMAW	E-8018-B6	5/32"	DC+	165	26	2.6
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Eliazar Delgado Collantes - Diego A. Vargas Julon.		Fecha.	18/07/2024			
Revisado por:	Ing. Leonardo Avilés H..		Institución:	Escuela Profesionales de Ingeniería y Metalurgia			

Fuente: www.protubsa.com.

Tabla 23*Probeta No. 04, WPS*

		Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura						Wps	
Institución:	Particular				Identificación N°:	Probeta 4 (4A-4B)	
Proceso de soldadura:		SMAW			Soporte PQR N°:	PQR – 01	
Tipo:	Manual	X	Automático:		Semiautomático:	Maquina: Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	00	Fecha:	12 /07/2024		Revisado por:	Ing, Leonardo Avilés Hinojosa	
Diseño de la junta.				Posición			
Tipo de junta:		A tope		Ranura:		Filete:	
Tipo de soldadura:		Ranura “V”		Plancha:	1G	Tubería:	
Abertura de raíz:		2 mm		Características eléctricas			
Talón altura de raíz o talón:		2 mm					
Angulo de ranura:		60°					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E 8018-B6		DC:		DCEP	X
Limpieza de la raíz:				Pulso:		DCEN	
Metal base				Técnica			
Datos	M.B.1	M.B.2		Aportación	Oscilación	Recta	X
Grupo:				Pase:	Múltiple	Simple	
Especificación	AISI 4140			Limpieza en pases	Escobilla de acero		
Grado:				Precalentamiento			
Espesor:	6.35 mm			Temperatura de precalentamiento: (°C)			219
Diámetro:	5mm			Temperatura interpase:			----
				Postcalentamiento			
				Temperatura:	-----	Tiempo:	-----

Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente :	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5		Composi ción	--	Composición	---	
Marca:	Nazca				Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:	-----						
Procedimiento de soldadura							
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamie nto. (mm/seg)
		Clase	Diámetr o	Tipo de Polarida d	Amperaje (a)		
1	SMAW	E-8018-B6	5/32"	DC+	180	28	2.6
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Eliazar Delgado Collantes - Diego A. Vargas Julon.		Fecha.	18/07/2024			
Revisado por:	Ing. Leonardo Avilés H..		Institución:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica			

Fuente: www.protubsa.com.

En la Foto 8, Muestra la elaboración de las muestras, donde se obtendrán las diferentes probetas.

Foto 8.

Elaboración de muestra



5.4 Cálculos Realizados

Cálculo de la Energía Neta Aportada

La determinación del calor neto, también conocido como energía de soldeo, se realizó mediante la aplicación de la siguiente ecuación, que se utiliza para medir la energía térmica transferida al material durante el proceso de soldadura.

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

$$H_{net} = \frac{120 \times 23}{2.6} \times 0.75 = 796,15 \text{ J/mm}$$

Probeta N° 2

$$H_{net} = \frac{140 \times 25}{2.6} \times 0.75 = 1009.61 \text{ J/mm}$$

Probeta N° 3

$$H_{net} = \frac{165 \times 26}{2.6} \times 0.75 = 1237.5 \text{ J/mm}$$

Probeta N° 4

$$H_{net} = \frac{180 \times 28}{2.6} \times 0.75 = 1453.85 \text{ J/mm}$$

Se encuentran resumidos en la tabla 24, los valores calculados de las energías aplicas para cada muestra.

Tabla 24

Valores de calor neto.

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión (V)	Velocidad de soldeo (mm/s)	Eficiencia térmica (%)	Calor neto (J/mm)
1	120	23	2.6	75	796,15
2	140	25	2.6	75	1009.61
3	165	26	2.6	75	1237.5
4	180	28	2.6	75	1453.85

Fuente: Elaboración propia

Determinación del Área Alterada por Calor (ZAC)

Dentro del apartado teórico se formuló la expresión correspondiente al ancho correspondiente a la “zona afectada por el calor”, la cual se empleado para el cálculo respectivo a partir de la expresión 2.4.

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_o} \right) \right] \times \left[\frac{H_{neto}}{4.13 \times \rho \times C \times t} \right] \quad [ec. 2. 4]$$

Donde:

Y = ancho de la ZAC (mm)

T_{max} = Temperatura máxima en la zona adyacente al ZAC (°C)

T_o = 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)

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

- **Datos del acero AISI 4140:**

- ✓ Temperatura de fusión: T_{fusión}=1500°C
- ✓ Temperatura máxima: T_{max}=723°C
- ✓ Temperatura inicial: T₀=219°C
- ✓ Densidad del acero: ρ=7.85 g/cm³ = 0.00785 g/mm³
- ✓ Calor específico del acero: C = 0.134 cal/g. °C = 0.561 J/g. °C
- ✓ Espesor del material: t = 6.35 mm

- **Cálculo del calor específico volumétrico para el acero AISI 4140:**

Calculamos mediante la fórmula (Ec. 2.4):

- ✓ Calor específico volumétrico= Calor específico x Densidad
- ✓ Calor específico del acero AISI 4140= 460 J/Kg.°C

- ✓ Densidad (ρ) del acero AISI 4140 (aproximadamente) = $7.850 \text{ Kg/m}^3 = 7.85 \times 10^6$

Kg/mm^3

- ✓ Calor específico volumétrico ($460 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C} \times 7.85 \times 10^6 \text{ Kg/mm}^3$

$$\text{Calor específico volumétrico} = 0.00361 \text{ J/mm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

- **Probeta 1**

$$Y = \left[\left(\frac{1}{550 - 219} \right) - \left(\frac{1}{1442.5 - 219} \right) \right] \times \left[\frac{796.15}{4.13 \times 0.00361 \times 6.35} \right] = 18.5 \text{ mm}$$

- **Probeta 2**

$$Y = \left[\left(\frac{1}{550 - 219} \right) - \left(\frac{1}{1442.5 - 219} \right) \right] \times \left[\frac{1009.61}{4.13 \times 0.00361 \times 6.35} \right] = 23.5 \text{ mm}$$

- **Probeta 3**

$$Y = \left[\left(\frac{1}{550 - 219} \right) - \left(\frac{1}{1442.5 - 219} \right) \right] \times \left[\frac{1237.35}{4.13 \times 0.00361 \times 6.35} \right] = 28.8 \text{ mm}$$

- **Probeta 4**

$$Y = \left[\left(\frac{1}{550 - 219} \right) - \left(\frac{1}{1442.5 - 219} \right) \right] \times \left[\frac{1453.85}{4.13 \times 0.00361 \times 6.35} \right] = 33.8 \text{ mm}$$

La Tabla 25, resume los anchos de las áreas con alteraciones por calor (ZAC):

Tabla 25

Ancho de la ZAC

Probeta	Ancho de la ZAC (mm)
1	18.5 mm
2	23.5 mm
3	28.8 mm
4	33.8 mm

Fuente: Elaboración propia

Determinación de la rapidez de enfriado

Previo a la estimación de la rapidez de enfriado, se determina si las probetas corresponden a una chapa gruesa o delgada mediante la ecuación denominada “espesor relativo de la chapa”:

$$r = t \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_o)}{H_{net}}}$$

Sustituyendo los valores en esta expresión, se tiene:

El resultado de “r”, siendo su unidad “Adimensional” nos indica que las probetas objeto de estudio son consideradas como “chapa delgada”, En consecuencia, La rapidez de enfriado se calcula con la expresión

$$R = 2 \pi K \rho C \left[\frac{t}{H_{net}} \right]^2 \cdot (T_c - T_o)^3$$

“Conductividad térmica” promedio para el AISI 4140, está en el orden de 0,0426 J/(mm·°C) a temperatura ambiente. Reemplazando los valores en la última expresión, se obtienen:

Probeta 1:

$$R = 2 \pi 0.0426 \times 0.00361 \left[\frac{6.35}{796.15} \right]^2 \cdot (550 - 18)^3 = 6.14 \text{ °C/seg}$$

Probeta 2:

$$R = 2 \pi (0.0426)(0.00361) \left[\frac{6.35}{1009.61} \right]^2 \cdot (550 - 18)^3 = 5.75 \text{ } ^\circ\text{C/seg}$$

Probeta 3:

$$R = 2 \pi (0.0426)(0.00361) \left[\frac{6.35}{1237.35} \right]^2 \cdot (550 - 18)^3 = 3.83 \text{ } ^\circ\text{C/seg}$$

Probeta 4:

$$R = 2 \pi (0.0426)(0.00361) \left[\frac{6.35}{1453.85} \right]^2 \cdot (550 - 18)^3 = 2.8 \text{ } ^\circ\text{C/seg.}$$

La tabla 26, evidencia mejor la influencia del aporte del calor sobre el gradiente térmico.

Tabla 26
Rapidez de enfriado

Probeta	Calor neto aportado (J/mm ²)	Velocidad de enfriamiento (°C/seg)
1	796.15	6.4
2	1009.61	5.75
3	1237.35	3.83
4	1453.85	2.8

Fuente: propia

5.5 Ensayos y Evaluación de Soldaduras

Inspección Visual

Se utiliza para comprobar la integridad del depósito, si se encuentra debilidades visuales, se deben preparar otras muestras asoldadas para ensayos posteriores. Este método de “Ensayo no destructivo” permite identificar discontinuidades en las superficies visibles de

los objetos. Siendo el método no destructivo más empleado, la inspección visual tiene un campo de aplicación muy amplio. La tabla 27, contiene resumen de la revisión visual realizada.

Tabla 27
Probetas, Revisión visual

Probeta	Discontinuidad	Causa	Calidad del deposito
1	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja, alta velocidad de soldeo	Deposito aceptable
2	Ninguna	Velocidad de soldeo aceptable Intensidad de corriente aceptable	Buena
3	Ninguna	Amperaje, velocidad de soldeo y ángulo de soldeo ideales.	Muy Buena.
4	Exceso de penetración	Exceso de recargue de material, lenta velocidad de soldeo	Deposito aceptable

Fuente: propia

Ensayo de Doblado

En este ensayo se evalúa cómo las uniones soldadas se deforman bajo una carga de flexión. Este procedimiento permite verificar la ductilidad del material, observando si la probeta puede doblarse sin presentar agrietamientos visibles.

Se elaboraron probetas con cortes transversales al eje, tanto para la superficie exterior como interior (cara y raíz), con dimensiones de 200 mm x 26 mm. Este procedimiento permite verificar la ausencia de debilidades por mala fusión de la unión soldada, así como valorar la ductilidad de las uniones soldadas.

Tabla 28*Probeta No. 01, Doblado*

	Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.							
Ensayo de doblado guiado.								PQR
Datos informativos de la probeta a ensayar								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	120	Voltaje	23	Vel. De soldeo (mm/seg)	2.3	
Tipo de estudio:	De laboratorio			N° de probeta:		1		
Norma aplicable:	ASTM E190-14			Fecha de elaboración:		25/06/2024		
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor:		Ing. Leonardo Avilés H.		
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalurgica - UNSAAC							
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm			
Resultados.								
Probeta	Lado dela prueba			Observaciones				
1	Cara			No presenta discontinuidad				
	Raiz			Presenta discontinuidad				
Aprobación:				Aprueba				

Fuente: propia

Tabla 29*Probeta No. 02, Doblado*

	Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.							
Ensayo de doblado guiado.								PQR
Datos informativos de la probeta a ensayar								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	140	Voltaje	25	Vel. De soldeo (mm/seg)	2.3	
Tipo de estudio:	De laboratorio			N° de probeta:		2		
Norma aplicable:	ASTM E190-14			Fecha de elaboración:		25/06/2024		
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor:		Ing. Leonardo Avilés H.		
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalurgica - UNSAAC							
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm			
Resultados.								
Probeta	Lado dela prueba			Observaciones				
2	Cara 			No presenta discontinuidad				
	Raiz 			No presenta discontinuidad				
Aprobación:				Aprueba				

Fuente: propia

Tabla 30*Probeta No. 03, Doblado*

	Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.							
Ensayo de doblado guiado.								PQR
Datos informativos de la probeta a ensayar								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	165	Voltaje	26	Vel. De soldeo (mm/seg)	2.3	
Tipo de estudio:	De laboratorio			N° de probeta:		3		
Norma aplicable:	ASTM E190-14			Fecha de elaboración:		25/06/2024		
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor:		Ing. Leonardo Avilés H.		
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalurgica - UNSAAC							
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm			
Resultados.								
Probeta	Lado dela prueba			Observaciones				
3	 Cara			No presenta discontinuidad				
	 Raiz			No presenta discontinuidad				
Aprobación:				Aprueba				

Fuente: propia

Tabla 31*Probeta No. 04, Doblado*

	Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.							
Ensayo de doblado guiado.								PQR
Datos informativos de la probeta a ensayar								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	180	Voltaje	28	Vel. De soldeo (mm/seg)	2.3	
Tipo de estudio:	De laboratorio			N° de probeta:		4		
Norma aplicable:	ASTM E190-14			Fecha de elaboración:		25/06/2024		
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor:		Ing. Leonardo Avilés H.		
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalurgica - UNSAAC							
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm			
Resultados.								
Probeta	Lado de la prueba			Observaciones				
4	Cara 			No presenta discontinuidad				
	Raiz 			No presenta discontinuidad				
Aprobación:				Aprueba				

Fuente: propia

Resultado:

La tabla 32, contiene los resultados de ensayos de doblado.

Tabla 32

Resultados de la prueba de doblado

Probeta		
1	Transversal de Cara	Aprobado
2	Transversal de Raíz	No aprobado
	Transversal de Cara	Aprobado
3	Transversal de Raíz	Aprobado
	Transversal de Cara	Aprobado
4	Transversal de Raíz	Aprobado
	Transversal de Cara	Aprobado
	Transversal de Raíz	Aprobado

Fuente: Elaboración propia

Análisis del resultado:

- Probeta 1: Posterior a la prueba de esta probeta evidencio fractura en el ensayo de doblez (parte interior – raíz), pero para fines de la investigación se tomó en cuenta.
- Las probetas 2,3 y 4, no evidenciaron fisuras o grietas, lo que indica que los parámetros fueron los adecuados.

Ensayo por Líquidos Penetrantes

Las muestras o probetas fueron sometidas al ensayo de líquidos penetrantes coloreados, siguiendo el procedimiento estándar que incluye las etapas de limpieza previa, aplicación del penetrante, remoción del exceso y revelado. Como resultado de este ensayo, las observaciones se detallan en la Tabla 33.

Se usaron tintes penetrantes a las probetas para determinar la existencia de discontinuidades. En los PQRs, se muestran el resultado de las pruebas realizadas.

Tabla 33*Probeta No. 01, liquido penetrante*

		Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.							
Ensayo por líquidos penetrantes								PQR	
Datos informativos de la probeta a ensayar									
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	120	Voltaje	23	Vel. De soldeo (mm/seg)	2.3		
Tipo de estudio:	De laboratorio			N° de probeta:		1			
Norma aplicable:	ASTM E165-02			Fecha de elaboración:		25/07/2024			
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor:		Ing. Leonardo Avilés H.			
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalurgica - UNSAAC								
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm				
Resultados.									
Probeta	Lado dela prueba			Observaciones					
1	Cara								
	Raiz								
Aprobación:				Aprueba					

Fuente: propia

Tabla 34*Probeta No. 02, liquido penetrante*

	Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.							
Ensayo por líquidos penetrantes.								PQR
Datos informativos de la probeta a ensayar								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	140	Voltaje	25	Vel. De soldeo (mm/seg)	2.3	
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		2		
Norma aplicable:	ASTM 165-2			Fecha de elaboración:		25/07/2024		
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor:		Ing. Leonardo Avilés H.		
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalurgica - UNSAAC							
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm			
Resultados.								
Probeta	Lado dela prueba			Observaciones				
2	Cara 			No presenta discontinuidad				
	Raiz 			No presenta discontinuidad				
Aprobación:				Aprueba				

Fuente: propia

Tabla 35*Probeta No. 03, liquido penetrante*

		Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.						
Ensayo por líquidos penetrantes.								PQR
Datos informativos de la probeta a ensayar								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	165	Voltaje	26	Vel. De soldeo (mm/seg)	2.3	
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		3		
Norma aplicable:	ASTM E165-2			Fecha de elaboración:		25/07/2024		
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor:		Ing. Leonardo Avilés H.		
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalurgica - UNSAAC							
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm			
Resultados.								
Probeta	Lado dela prueba			Observaciones				
3	Cara 			No presenta discontinuidad				
	Raiz 			No presenta discontinuidad				
Aprobación:				Aprueba				

Fuente: propia

Tabla 36*Probeta No. 04, liquido penetrante*

	Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.							
Ensayo por líquidos penetrantes.								PQR
Datos informativos de la probeta a ensayar								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	180	Voltaje	28	Vel. De soldeo (mm/seg)	2.3	
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:	4			
Norma aplicable:	ASTM E165-2			Fecha de elaboración:	25/07/2024			
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor:	Ing. Leonardo Avilés H.			
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalurgica - UNSAAC							
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm			
Resultados.								
Probeta	Lado dela prueba			Observaciones				
4	Cara 			No presenta discontinuidad				
	Raiz 			No presenta discontinuidad				
Aprobación:				Aprueba				

Fuente: propia

La Tabla 37, presenta los datos del ensayo de doblado transversal, estos se utilizan para determinar la respuesta mecánica de las uniones soldadas bajo esfuerzos de flexión.

Tabla 37

Ensayos de líquidos penetrantes

Cupón	Observaciones	Defectos
1	Presenta discontinuidad.	Falta de fusión
2	No presenta discontinuidad.	Ninguna
3	No presenta discontinuidad.	Ninguna
4	No presenta discontinuidad.	Ninguna

Fuente: propia

Prueba de Dureza

Se preparan probetas, de la zona de fusión, mediante cortes transversales al eje de la unión soldada, tal como se muestra en la Foto 9

Foto 9.

Ensayo de dureza



El funcionamiento se compone de dos etapas: inicialmente, se utiliza una carga menor para asentar el indentador sobre el material; posteriormente, se utiliza la carga de ensayo durante un tiempo establecido. Al retirar esta carga principal, se mide la deformación residual en el acero, lo que representa el valor de dureza Rockwell, mostrado en un dial analógico o en un sistema digital. En los PQRs se detallan los valores de dureza.

Tabla 38*Probeta No. 01, dureza*

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.							
ENSAYO DE DUREZA								PQR
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	120	Voltaje	25	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.6	
Tipo de estudio:	De laboratorio			N° de probeta:			1	
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:			26/07/2024	
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor: Ing. Leonardo Aviles H.			Ing. Leonardo Avilés Hinojosa.	
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:				200 mm		
RESULTADO								
Dureza				53 HRC				

Fuente: propia

Tabla 39*Probeta No. 02, dureza*

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.							
ENSAYO DE DUREZA								PQR
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	140	Voltaje	25	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.6	
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:			2	
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:			26/07/2024	
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor: Ing. Leonardo Avilés H.			Ing. Leonardo Avilés Hinojosa.	
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:				200 mm		
RESULTADO								
Dureza			50 HRC					

Fuente: propia

Tabla 40*Probeta No. 03, dureza*

		FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.							
ENSAYO DE DUREZA								PQR	
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR									
Proceso de soldado		SMAW	Amperaje	165	Voltaje		26	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.6
Tipo de estudio:		De laboratorio			Nº de probeta:				3
Norma aplicable:		ASTM E18			Fecha de elaboración:				26/07/2024
Realizado por:		Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor: Ing. Leonardo Avilés H.			Ing. Leonardo Avilés Hinojosa.	
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:				200 mm		
RESULTADO									
Dureza				45HRC					

Fuente: propia

Tabla 41*Probeta No. 04, dureza*

		FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.						
ENSAYO DE DUREZA							PQR	
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR								
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	180	Voltaje	28	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.6	
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:			4	
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:			26/07/2024	
Realizado por:	Eliazar Delgado C. Diego Vargas J.			Asesor: Ing. Leonardo Avilés H.			Ing. Leonardo Avilés Hinojosa.	
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:				200 mm		
RESULTADO								
Durez			40HRC					

Fuente: propia

La Tabla 42 presenta los datos de dureza de los depósitos.

Tabla 42
Dureza en probetas

Probeta	Velocidad de enfriamiento (°C/seg)	Tipo de microestructura	Dureza (HRC)
1	6.4	Martensita	53 HRC
2	5.75	Bainita - martensita	50 HRC
3	3.83	Bainita - martensita	45 HRC
4	2.8	Bainita - Perlita	40 HRC

Fuente: obtenida en el equipo

La Foto 10, se muestra la obtención de la deformación.

Foto 10.
Medición de la dureza



La deformación residual en la dureza Rockwell se mide directamente con el mismo equipo, sin necesidad de instrumentos externos. El sistema está diseñado para realizar la medición de forma automática y precisa, mediante un mecanismo interno que traduce la profundidad de penetración en un valor de dureza.

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 Inspección Visual en Probetas Soldadas

Basándonos en resultados obtenidos, podemos concluir lo siguiente:

- **Probeta 1:** Aunque el depósito en la cara fue adecuado, se evidenció una penetración insuficiente en la raíz (~ 1 mm). No obstante, se consideró aceptable para los fines de esta investigación.
- **Probetas 2, 3 y 4:** Presentaron depósitos satisfactorios, por lo que fueron consideradas aptas para continuar con el estudio.

6.2 Ensayo de doblado

- **Probeta 1:** Posterior a la prueba esta probeta evidencio fractura en la prueba de doblez de raíz, pero para fines de la investigación se tomó en cuenta.
- **Las probetas 2,3 y 4,** no evidenciaron fisuras o grietas, lo que indica que los parámetros fueron los correctos.

6.3 Ensayo por Líquidos Penetrantes

Con base a los hallazgos que se presentan en la Tabla 19, la Probeta 1 evidenció deficiencia de fusión en el cordón de raíz. En cambio, las Probetas 2, 3 y 4 no mostraron discontinuidades, siendo consideradas técnicamente aceptables.

6.4 Ensayo Metalográfico

La micro-estructura inicial del AISI 4140 en estado de entregable (tratado térmicamente) presenta la siguiente micro-estructura tras el proceso de temple, que implica un enfriamiento rápido desde la región austenítica, se forma martensita como estructura inicial. Esta etapa contiene una configuración “Cristalina tetragonal centrada en el cuerpo”

(BCT), caracterizada por su elevada dureza y fragilidad, que ocasionan alteraciones en la red resultado del atrapamiento de átomos de carbono.

6.5 Martensita Revenida

Luego del revenido (calentamiento controlado a una temperatura moderada, típicamente entre 500-600 °C para el AISI 4140), la martensita se transforma en martensita revenida, reduciendo su dureza y aumentando su ductilidad y tenacidad. En el transcurso del revenido, también se generan carburos de hierro, conocidos como Fe_3C o cementita. A medida que incrementa la temperatura durante el tratamiento, la forma y el tamaño de estos carburos cambian, lo que contribuye a mayores esfuerzos mecánicos y de impacto, aunque se observa una reducción gradual en la dureza.

La Figura 63 muestra una micro-estructura compuesta por martensita tratada térmicamente que se asemeja a ondas., característica de aceros templados y revenidos de medio carbono. No se evidenció la presencia de carburos en la muestra observada.

A continuación, se presenta la descripción de las micro-estructuras obtenidas bajo distintas velocidades de enfriamiento calculadas, evidenciando las variaciones morfológicas y de fase resultantes del tratamiento térmico aplicado.

- **Rapidez de enfriado de 6.4 °C/seg:**

Esta es la rapidez de enfriado más rápida entre las que se ha calculado. Presenta una micro-estructura principalmente de martensita debido al rápido enfriamiento, lo que no permite la difusión suficiente de los átomos de carbono. La martensita que se genera es sólida pero quebradiza. Se observa también pequeñas cantidades de austenita retenida.

- **Rapidez de enfriado de 5.75 °C/seg:**

Esta velocidad es ligeramente más lenta que la anterior (rapidez de enfriado de 6.4 °C/seg), sigue siendo rápida. En su micro-estructura sigue predominando la martensita, pero

con menor dureza que en el caso anterior debido a una mayor oportunidad para la difusión del carbono, la micro-estructura es un poco más refinada.

- **Rapidez de enfriado de 3.83 °C/seg:**

Esta velocidad de enfriamiento se considera un rango intermedio. En su micro-estructura presenta una combinación de martensita y bainita. La presencia de bainita se incrementa debido al mayor tiempo disponible para la difusión del carbono. Esto da lugar a una micro-estructura menos frágil en contraste con los casos anteriores.

- **Rapidez de enfriado de 2.8 °C/seg:**

Esta rapidez de enfriado se puede considerar como la más lenta de las mencionadas. Su micro-estructura presenta principalmente bainita y también se ha observado algo de perlita. La bainita formada es más tenaz que la martensita y tendrá menor dureza, ofreciendo un equilibrio entre resistencia y ductilidad.

6.6 Prueba de Dureza

Observando la tabla 42, se puede resumir en lo siguiente:

La escala de dureza adecuada para medir este tipo de acero es la escala Rockwell C (HRC).

De acuerdo a las velocidades de enfriamiento la dureza en las probetas es la siguiente:

- Enfriamiento rápido, probetas 1, (6.4 °C/seg): Debido a la alta proporción de martensita, la dureza es de 53 HRC.
- Enfriamiento rápido, probetas 2 (5.75 °C/seg): Debido a la alta proporción de martensita, la dureza es de 50 HRC.
- Enfriamiento moderado, probeta 3, (3.83 °C/seg): Con una combinación de: martensita y bainita. La dureza está en 45 HRC.

- Enfriamiento más lento, probeta 4, (2.8 °C/seg): Por su contenido de más bainita y algo de perlita, su dureza es 40 HRC.

No existe una norma, libro o artículo técnico que establezca una clasificación universal y estricta de la rapidez de enfriado en el proceso de unión (SMAW para el caso) en términos de “lento”, “moderado” o “rápido” con valores numéricos específicos. Esto se debe a que la velocidad de enfriamiento es una variable compleja, influenciada por múltiples factores y que debe evaluarse en el contexto de un ciclo térmico y un aporte de calor determinados. Sin embargo, manuales técnicos, libros de metalurgia de la soldadura y códigos de organizaciones como AWS y ASME abordan indirectamente este concepto, relacionándolo principalmente con la magnitud de energía térmica prevista como también la temperatura de pre-calentamiento aplicada durante el proceso. En este caso, se consideró que valores superiores a 5°C/s como enfriamiento rápido, de 3°C/s a 5°C/s inclusive como enfriamiento moderado, y por debajo de 3°C/s como lento, como se mencionó en el párrafo dependerá de muchos factores, quedando de parte del investigador definir los límites y ancho de los rangos.

En los anexos de este trabajo se incluyen las fichas técnicas de los electrodos utilizados. Estos documentos, proporcionados por diferentes fabricantes, detallan las propiedades clave de los consumibles de soldadura, como su composición química, las propiedades mecánicas que confieren a la unión soldada, y los parámetros de operación recomendados (corriente, polaridad, etc.).

La inclusión de estas fichas es fundamental para sustentar la elección del electrodo y para validar los resultados experimentales presentados, ya que los datos de las fichas técnicas sirven como referencia para evaluar el desempeño de las uniones soldadas.

CONCLUSIONES

Primera. Mientras mayor sea la rapidez de enfriamiento a lo largo del proceso de unión SMAW en el acero AISI 4140 incrementa la probabilidad de formación de fisuras en las uniones soldadas, como ocurrió en la probeta 1 y 2, la cual tiene un espesor de 6.35 mm y el enfriamiento fue a temperatura ambiente, donde la velocidad de enfriamiento es 6.4 °C/seg y 5.75 °C/seg. Esto se debe a que el AISI 4140 es un acero de mediano carbono y aleado, lo que lo hace susceptible a la formación de estructuras martensíticas durante el enfriamiento rápido. La martensita es una micro-estructura dura y frágil que genera tensiones internas elevadas en el material, lo que favorece la aparición de fisuras, especialmente en la “zona afectada por el calor” (ZAC).

Segunda. La rapidez de enfriado afecta significativamente los micro-componentes en las uniones SMAW en el acero AISI 4140, con una velocidad de enfriamiento más rápida (es 6.4 °C/seg y 5.75 °C/seg) en el acero AISI 4140 da lugar a una estructura más fina, con predominancia de martensita y una ZAC más estrecha, lo que puede mejorar la dureza, pero también aumenta la probabilidad de formación de fisuras y la fragilidad del material.

Tercera. Una rapidez de enfriado más elevada (6.4 °C/seg y 5.75 °C/seg) en aceros, AISI 4140 y similares, tiende a aumentar la dureza debido a la creación de martensita, una fase más resistente y quebradiza. Por el contrario, con una velocidad de enfriamiento más lenta (2.8 °C/seg), se forman fases más blandas y dúctiles como la ferrita y la perlita, lo que reduce la dureza del material. Por lo tanto, una velocidad de enfriamiento más lenta generalmente resultará en una menor dureza en lugar de una mayor.

RECOMENDACIONES

Primera. Se recomienda realizar un pre-calentamiento controlado previo al proceso de soldadura, especialmente en aceros templeables como el AISI 4140, con el fin de reducir el gradiente térmico entre el metal base y el cordón de soldadura. Esta medida contribuye a minimizar el riesgo de fisuración inducida por hidrógeno y a mejorar la tenacidad de la “zona afectada por el calor” (ZAC). El valor adecuado de pre-calentamiento debe determinarse considerando el “carbono equivalente” y el espesor del material, siguiendo criterios establecidos en normativas como AWS D1.1 o mediante métodos reconocidos, como el propuesto por Seferian.

Segunda. Es fundamental definir parámetros térmicos que permitan mantener la velocidad de enfriamiento dentro de un rango moderado, evitando así la formación de micro-estructuras frágiles como la martensita. Para lograrlo, es necesario ajustar variables clave como el aporte térmico, la temperatura interpaso y el espesor del material base. Un control adecuado del enfriamiento contribuye a mejorar la uniformidad micro-estructural en la “zona afectada por el calor” (ZAC) y a asegurar la estabilidad de las propiedades mecánicas en la unión soldada.

Tercera. Otra recomendación después de la soldadura es aplicar tratamientos térmicos, como el revenido o el alivio de tensiones, con el fin de estabilizar la micro-estructura y reducir las tensiones residuales generadas durante el proceso. Estos tratamientos favorecen la transformación de la martensita en fases más tenaces, mejorando así la ductilidad y la resistencia al impacto del material. La selección y aplicación de estos procesos deben ajustarse en función de la composición química del acero y de los requisitos funcionales específicos de la pieza soldada.

REFERENCIA

- 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. 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
- Alonso, C. (2012). *Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto*. Cano Pina Ceysa.
- ASM Handbook. . (1995). *Mechanical Testing. Metals Park, Ohio*:. American Society for Metals.
- ASTM E18 (2024). Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. Committee E28, Danvers, United States.
- ASTM International. (2020). *Standard specification for wrought alloy steel, AISI 4140 (ASTM A29/A29M)*. ASTM International.
- AWS (2020). Código de Soldadura Estructural - Acero. AWS D1.1/D1.1M. 24 Ed. Comité D1 de Soldadura Estructural. Estados Unidos de América. ISBN. 978-1-64322-088-8.
- AWS2 (2020). Términos y Definiciones Estándar Usados en Soldadura. AWS A3.0M/A3.0. Comité sobre definiciones y símbolos. ISBN. 9781-64322-124-3.
- Bhadeshia , H., & Honeycombe, R. (2006). *Steels: Microstructure and Properties*. . Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Callister, W. (2006). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Brasil: Ed. Rio.
- Chiaverini, V. (2008). *Acos e ferros fundidos*. brasil: Associac Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- Contreras, Perla y Briones, Roberto (2019). *Modelado Térmico de una Unión Soldada Mediante Elemento Finito*. Congreso Nacional de Investigación. Michoacán, México.

- Córdova Valencia, S. (2003). *Nitruración gaseosa en los aceros SAE 4340, SAE 4140, SAE 0-1, SAE 1045*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Destructivos, A. (2009). *Ensayos no destructivos- Líquidos penetrantes. Ensayos no destructivos- Líquidos penetrantes*. Madrid: Asociación Española de ensayos no destructivos.
- Devaraj, M. R., & Hemanth, J. (2021). *Effect of Cooling Rate on Mechanical Properties of ASTM Grade Steel*. En *Proceedings of the First International Conference on Advanced Scientific Innovation in Science, Engineering and Technology*.
- Echevarría, R. (2002). *efectología*. Chile: Universidad Nacional de Comahue, Santiago de Chile.
- Fosca, C. (2007). Introducción a la metalurgia de la soldadura. *Introducción a la metalurgia de la soldadura*. PUCP, Lima, Perú.
<https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadura-Carlos-Fosca-pdf>.
- Gómez, J. R. (2021). *Control del ciclo térmico de soldadura para optimizar la tenacidad en aceros de alta resistencia* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Hassan, F., & Al-Marzooq, A. (2023). *Influence of active cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured mild steel*. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 9, Artículo 1130407.
- Hernández Brito, M. (2008). *Simulación del proceso de soldadura smaw en piezas de acero al carbono media aleación (AISI 4140)*. Saltillo - Coahuila.
- Ingemecánica. (12 de Octubre de 2022). *Medición de la Dureza de los Materiales*. www.ingemecanica.com:
https://www.ingemecanica.com/tutoriales/tabla_dureza.html
- Jeffus, L. (2009). *Soldadura. Principios y aplicaciones*. CESOL (Asociación Española de Soldadura).

https://books.google.com.pe/books/about/Soldadura_Principios_y_aplicaciones.htm?id=rHynAxzh0iEC&redir_esc=y

- Krauss, G. (1999). *Martensite in steel: strength and structure*. (40-57 ed.). Materials Science and Engineering.
- Krauss, G. (2000). *Steels: heat treatment and processing principles* (6. ed ed.). Ohio: ASM International.
- Lincoln Electric. (2013). *Soldeo manual con electrodos revestidos*. Lincoln Electric. https://www.academia.edu/7303830/Manual_Lincol_Electrodos
- Marcos, C. A. (2015). *Manual de prácticas de soldadura*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Mejías García, Diego Alejandro (2020). *Efecto de la velocidad de enfriamiento en las propiedades de tracción de aceros de alta resistencia*. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Mendizábal, V. C. (2025). *Estudio del comportamiento termomecánico de aceros especiales sometidos a velocidades de enfriamiento elevadas para lograr ultra alta resistencia*. Tesis de doctorado. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Mendoza Lopez, R. K. (2017). *Influencia de la temperatura de precalentamiento sobre la micro-estructura, dureza , suceptibilidad a fisuración en frío y extensión de ZAC en la soldadura del acero AISI 9260, utilizando el proceso SMAW*. . Trujillo.
- Oerlikon. (2008). *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos*. Lima: Exsa. <https://www.soldaceros.com.pe/wp-content/uploads/2015/09/Manual-de-Soldadura-OERLIKON.pdf>
- Pérez Cargua, M. A., & Pullas Rea, L. M. (2009). *Influencia De La Utilización De Insertos De Varilla Corrugada Sobre Las Soldaduras De Perfil Estructural*. Tesis de posgrado. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf>

- Pérez Castillo, Luís Alberto (2022). *Influencia del precalentamiento y la temperatura de interpaso en las propiedades mecánicas de uniones soldadas de acero AISI 4140*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.
- Radeva, V. (2014). Ciencia De Los Materiales Manual De Prácticas. *Ciencia De Los Materiales Manual De Prácticas*. Instituto Tecnológico De Santo Domingo, Santo Domingo.
https://www.academia.edu/27978069/CIENCIA_DE_LOS_MATERIALES_MANUAL_DE_PR%C3%81CTICAS
- Sailema, P. & Solís, G. (2016). *Procesos de Soldadura*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.
- SlidePlayer. (2014). *Tecnologías de unión*. <http://slideplayer.es/http://slideplayer.es/slide/26599/>
- Silva, A. P., & Souza, L. M. (2020). *Análise da influência da velocidade de resfriamento em juntas soldadas de aço de alta resistência por meio de ensaios de microdureza e tenacidade*. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, 15(3), 205-212.
- society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.
- Soldadura y Estructura (2024). *Soldadura SMAW*. Artículo de diseño y actualización.
<https://soldadurayestructuras.com/soldadura-smaw/>
- Soldexa. (2011). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos*. Oerlikon.
<https://es.slideshare.net/RonPincu/manual-soldadura-soldexa-15139801>
- SWEISS (2025). Manual de Soldadura. chrome-extension://efaidnbmninnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sweissweld.com/assets/Manualbasicode soldaduraSWEISSMarzo2025_2-Bx0jYVmt.pdf
- Teichert, E. (1962). *Siderurgia metalografía y tratamiento térmico del acero*. . Porto Alegre: Globo.
- Totten, G. (2006). *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. Boca Raton: CRC Press.

- Valencia, A. (1992). *Tecnología de los tratamientos térmicos*. Universidad de Antioquia.
- Vasquez Vasquez, E. (2012). *ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA SOLDAR ACEROS ALEADOS COMO EL AISI-SAE 4140 Y ASTM A-36*. Bogotá.
- Viveros Hernández, Carlos Andrés (2021). Evaluación de la tenacidad y la micro-estructura de aceros aleados tratados térmicamente. Universidad de Los Andes, Colombia.
- Walteros Larrotta, G. (10 de Abril de 2010). *Manual de Soldadura Und 5 Tipos de Uniones*. es.scribd.com: <https://es.scribd.com/doc/29706904/Manual-de-Soldadura-Und-5-Tipos-de-Uniones>.
- Wang, J., Liu, D., & Zhou, Y. (2024). *Impact of welding parameters on the cooling rate and mechanical properties of AISI 4140 steel joints*. *Welding in the World*, 68(1), 1-10.
- Zou, Z., Cai, C., & Zhang, Y. (2022). *Effects of cooling rate and interpass temperature on the microstructure and mechanical properties of multi-pass welded high-strength low-alloy steel*. *Journal of Materials Processing Technology*, 300, 117424.

ANEXOS

Anexo 1.- Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
"INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 4140 POR EL PROCESO SMAW" (Investigación Tecnológica)				
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
Numerosas Fabricas hacen uso del acero AISI 4140 por su comportamiento mecánico y su alta respuesta a tratamientos térmicos. La soldadura de este acero constituye un proceso crítico dentro de los ciclos de producción y mantenimiento, por lo que es indispensable una ejecución rigurosa que garantice la calidad del producto final y minimice la aparición de defectos que puedan comprometer su integridad estructural. En nuestra región, se ha constatado que muchas factorías que trabajan con aceros sometidos a tratamientos térmicos carecen de la aplicación de técnicas de soldadura adecuadas, incrementando así el riesgo de fallas durante el servicio. Un factor decisivo en la soldabilidad del AISI 4140 es la rapidez de enfriado durante el procedimiento SMAW, dado que esta influye directamente en la creación de micro-constituyentes, como la martensita. Un enfriamiento excesivamente rápido puede generar depósitos de soldadura con alta dureza y baja tenacidad, lo que propicia la aparición de fisuras por fragilización en frío, afectando negativamente la confiabilidad de la unión soldada. Por tanto, comprender y controlar este parámetro es fundamental para asegurar un desempeño óptimo del material en servicio. Problema general ¿De qué manera influirá la velocidad de enfriamiento en la calidad y la integridad de las uniones soldadas del AISI 4140 en el proceso SMAW? Problemas específicos a) ¿Qué relación existirá entre la velocidad de enfriamiento y la formación de fisuras en las uniones utilizando el procedimiento SMAW en el AISI 4140? b) ¿Qué efecto producirá la rapidez de enfriado en la micro-estructura y el área alterada por el calor (ZAC) en las uniones de acero AISI 4140 realizadas por SMAW? c) ¿Cómo influirá la velocidad de enfriamiento en la dureza de las uniones de acero AISI 4140 en el procedimiento SMAW?	Objetivo general Determinar cómo la velocidad de enfriamiento en uniones soldadas por arco manual con electrodo revestido (SMAW) afectará la calidad y la integridad de las uniones soldadas de acero AISI 4140. Objetivos específicos d) Determinar la correlación entre velocidad de enfriamiento y creación de fisuras en las uniones utilizando la técnica SMAW en el AISI 4140. e) Determinar la micro-estructura y el área alterada por el calor (ZAC) en las uniones de acero AISI 4140 realizadas por SMAW, considerando diferentes velocidades de enfriamiento de las uniones soldadas de acero AISI 4140 en función de la velocidad de enfriamiento durante el proceso SMAW f) Identificar la dureza de los depósitos por efecto de la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero 4140 por el procedimiento SMAW.	Hipótesis general La velocidad de enfriamiento en el procedimiento de unión soldada por arco manual con electrodo revestido (SMAW) tiene un impacto significativo en la unión soldada con acero base AISI 4140, y se espera que las variaciones en esta velocidad influyan en la formación de fisuras, la micro-estructura de las soldaduras, las propiedades mecánicas (dureza) y la calidad general de las uniones soldadas. Hipótesis específicas g) Existe una correlación directa entre la rapidez de enfriado y la aparición de fisuras en las uniones soldadas del acero AISI 4140 mediante el proceso SMAW; velocidades de enfriamiento más elevadas incrementan la probabilidad de formación de fisuras en la ZAC y el metal de aporte. h) La micro-estructura y la extensión de la "zona afectada por el calor" (ZAC) en soldaduras de acero AISI 4140 realizadas por SMAW varían significativamente en función de la velocidad de enfriamiento, generando diferencias en la proporción de fases como martensita, bainita y perlita. i) La dureza del depósito de soldadura utilizando el procedimiento SMAW y acero base AISI 4140 se incrementa con el aumento de la rapidez de enfriado, afectando la tenacidad y la efectividad de la unión.	Variables independientes ● Velocidad de enfriamiento ● Tipo de electrodo ● Parámetros de operación Variables dependientes ● Formación de fisuras ● Micro-estructura y "Zona Afectada por el Calor" (ZAC) ● Propiedades Mecánicas (dureza, tenacidad, impacto, ductilidad, fatiga y resistencia al impacto)	Nivel y tipo de investigación Explorativa Abordará de manera exhaustiva cada aspecto relacionado con el desarrollo del trabajo, mediante el análisis detallado de los parámetros involucrados. Para ello, se formularán hipótesis pertinentes y se identificarán las variables clave que orientan el interés científico del estudio. Descriptiva Esta investigación se desarrolla a partir de la descripción del problema en un contexto espacial específico, lo que permite abordar la situación de manera localizada y pertinente. Asimismo, el enfoque adoptado resulta el más adecuado para atender la problemática planteada, considerando tanto su origen como las condiciones en las que se lleva a cabo su desarrollo. Correlacional Esta investigación busca identificar o definir la correlación existente entre variables en el procedimiento de unión SMAW y las modificaciones de las características del acero base, mediante la evaluación de hipótesis formuladas y sujetas a verificación empírica. El enfoque adoptado permite establecer relaciones significativas sin implicar necesariamente una dependencia directa entre los factores analizados. Explicativa La presente investigación tiene como objetivo informar sobre un aspecto específico de la realidad, interpretando dentro de un marco teórico de referencia. Este enfoque busca comprender el porqué de los fenómenos mediante el análisis de relaciones causales que permiten establecer vínculos de causa y efecto entre las variables estudiadas.

Anexo 2.- Fichas técnicas de los electrodos.

SMAW

Aceros al Carbono y Baja Aleación



CHROMOCORD 502

Electrodo revestido de tipo básico cuyo depósito es una aleación de acero cromo - molibdeno (5% Cr - 0,5% Mo), es muy recomendable para el soldeo de tuberías, dentro de sus características principales se encuentran sus excelentes valores de resistencia a la fluencia y tracción después de realizar el tratamiento térmico, muy buena estabilidad de arco y poco chisporroteo, se recomienda emplearlo en corriente continua al polo positivo.

Clasificación	
AWS A5.5 / ASME-SFA 5.5	E8018-B6

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

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,06	0,90	0,30	máx. 0,020	mín. 0,020	0,5	-	5,00	-	-

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)]
Tratamiento térmico (1)	600 – 700 (87 000 – 101 500)	> 460 (66 700)	> 19	[+20°C (+68°F)] >100 (74)

Conservación del Producto
- Mantener en un lugar seco y evitar humedad. - Almacenamiento en horno: 125 a 150°C. - Resecado de 340°C a 360°C por 2 horas.

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc.

Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente continua (DC): Electrodo al positivo DCEP / Electrodo al negativo DCEN							
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		-	65	90	125	-	-
Amperaje máximo		-	95	130	165	-	-

Pre calentamiento y Tratamiento Térmico

- Pre calentamiento en función al espesor del material entre 150°C – 250°C, recomendado.
- Temperaturas de interpase máxima entre 250°C – 300°C, recomendado.
- Tratamiento térmico (1) 740°C x 1h.

Aplicaciones

- Para soldar aceros tipo CrMo (5% Cr - 0,5% Mo).
- 12CrMo 19-5, X12CrMo5; ASTM A182 Gr. F5, ASTM A199 Gr. T5, ASTM A213 Gr. T5, ASTM A335 Gr. P5.
- ASTM A336 CIF5, ASTM A369 Gr.FP5, ASTM A387 Gr.5 Cl 1 v 2.

Anexo 3.- Electrodo E6010 WA. ALLOY CO.



WA. ALLOY CO.

Quality Management System
in accordance with
ISO 9001
Cert # 05-P0025

USA 6010 Coated Electrode

U.S. ALLOY CO.
d/ba Washington Alloy
7010-G Reames Rd.
Charlotte, NC 28216
www.walloy.com



American Welding Society
Sustaining Company Member



ALLOY DESCRIPTION AND APPLICATION;

USA 6010 is a high cellulose coated electrode designed to provide a smooth stable arc forceful enough to achieve deep penetration into the base metal. This electrode exhibits high deposition efficiency and low spatter loss. It produces a weld puddle that wets and spreads well, yet sets up fast enough to make this electrode ideal for vertical up or vertical down welding techniques. USA 6010 electrodes produce a flat weld bead with coarse ripples and a thin easily removable slag. USA 6010 electrodes may be used in the flat, horizontal, vertical or overhead welding positions.

TYPICAL WELDING PROCEDURES; DCEP

Diameter	Amps (Flat)	Volts
3/32"	50-70	25-30
1/8"	80-120	25-30
5/32"	110-160	25-30
3/16"	150-200	25-30

Procedures may vary with change in position, base metals, filler metals, equipment and other changes.

TYPICAL WELD METAL CHEMISTRY (%) & PROPERTIES

	AWS Spec.	Weld metal		AWS Spec.	Weld metal
Carbon	0.20 max	0.10			
Manganese	1.20 max	0.47	Tensile Strength (ksi)	60 min.	70
Silicon	1.00 max	0.20	Yield Strength (ksi)	48 min.	61
Phosphorus	N/A	0.014	Elongation in 2" (%)	22% min.	30%
Sulphur	N/A	0.012	Charpy V-notch at -20°F	20 ft-lbs min.	36 ft-lbs

AVAILABLE SIZES: TE 6010 = 3/32", 1/8", 5/32", 3/16"

SPECIFICATIONS: ANSI/AWS A5.1 E6010
ASME SFA 5.1 E6010

EAST COAST
7010-G Reames Rd
Charlotte, NC 28216
Tel (888) 522-8296
Fax (704) 598-6673

GULF COAST
4755 Alpine Drive #100A
Stafford, TX 77477
Tel (877) 711-9274
Fax (281) 313-6332

WEST COAST
8535 Utica Ave
Rancho Cucamonga, CA 91730
Tel (800) 830-9033
Fax (909) 291-4586



WA. ALLOY CO.

10-2010 uc

Warehouse Distribution Center – Portland, Oregon

Head Office – Puyallup, Washington

Washington Alloy Company believes that all information and data given is correct. Use this information to assist in making your own evaluations or decisions and this information should not be mistaken as an expressed or implied warranty. U.S. ALLOY CO. assumes no liability for results or damages incurred from the use of any information contained herein, in whole or in part.


U.S. ALLOY CO.

Quality Management System
in accordance with
ISO 9001:2000
Cert # 05-R0025

CERTIFICATE of Compliance

TRADE NAME: USA 6010
Specification: AWS A5.1 : ASME SFA 5.1
Classification: E6010

U.S. ALLOY CO.
dba Washington Alloy
7010-G Reames Rd.
Charlotte, NC 28216
www.weldingwire.com



American Welding Society
Sustaining Company Member



GAWDA

Chemical Composition for Weld Metal

	AWS Requirements	Typical
Carbon (C)	0.20 max.	0.10
Manganese (Mn)	1.20 max.	0.47
Silicon (Si)	1.00 max.	0.20
Phosphorus (P)	Not Specified	0.014
Sulfur (S)	Not Specified	0.012
Nickel (Ni)	0.30 max.	
Chromium (Cr)	0.20 max.	
Molybdenum (Mo)	0.30 max.	
Vanadium (V)	0.05 max.	
Mn + Ni + Cr + Mo + V	Not Specified	

Mechanical Properties for Weld Metal

	Minimum AWS Requirements	Typical
Tensile Strength	60,000 psi	70,000 psi
Yield Strength	45,000 psi	61,000 psi
Elongation in 2"	22 %	30 %
Charpy V-notch Impact Average	20 ft · lbs at -20°F	36 ft · lbs at -20°F

This certification is provided by Washington Alloy Co. with the expressed understanding that if the product supplied fails to conform to the stated specifications, there shall be no personal liability of any kind on the undersigned and the obligation and liability of Washington Alloy Co., with respect to such non-conformance or specification failure, shall be limited to a) an obligation to furnish the purchaser, at no additional charge, material that meets the specifications and conformances or b) to refund to the purchaser the full amount of money paid to Washington Alloy Co. for the return of the product in full. In no event shall Washington Alloy Co. be liable for consequential damage.

This certifies that the product supplied will meet the requirements of the noted classification and data above. Products supplied in accordance to the Quality Management System of Washington Alloy Company.

[Signature]
Certification Administrator

EAST COAST
7010-G Reames Rd
Charlotte, NC 28216
Tel (888) 522-8296
Fax (704) 598-6673

GULF COAST
4855 Alpine Drive #190
Stafford, TX 77477
Tel (877) 711-9274
Fax (281) 313-6332

WEST COAST
8535 Utica Ave
Rancho Cucamonga, CA 91730
Tel (800) 830-9033
Fax (909) 291-4586


U.S. ALLOY CO.

Warehouse Distribution Center – Dayton, Ohio

Head Office – Puyallup, Washington

Washington Alloy Company believes that all information and data given is correct. Use this information to assist in making your own evaluations or decisions and this information should not be mistaken as an expressed or implied warranty. U.S. ALLOY CO. assumes no liability for results or damages incurred from the use of any information contained herein, in whole or in part.

Anexo 4.- Electrodo E7018 WA. ALLOY CO.



WA ALLOY CO.

Quality Management System
in accordance with
ISO 9001
Cert # 05-R0028

USA 7018 Coated Electrode

U.S. ALLOY CO.
dba Washington Alloy
7010-G Reams Rd.
Charlotte, NC 28216
www.weldingwire.com



American Welding Society
Sustaining Company Member



ALLOY DESCRIPTION AND APPLICATION;

7018 is the most efficient general purpose, iron powder – low hydrogen electrode used for welding carbon steels, free-machining steels and low alloy steels with minimum yield strength of 50,000 psi. 7018 has a very good deposition rate, providing a quiet steady arc with low spatter and medium penetration. Weld deposits are of X-ray quality with easy slag removal, exceptional mechanical properties and a smooth uniform bead appearance. 7018 has excellent operator appeal and may be used in any position with AC or DC (reverse polarity). 7018 electrodes are used for many ASTM specifications. More specific applications would include process piping, cold rolled steels such as found in heavy machinery fabrications, fired and unfired pressure vessels, shop and field welding of bridges and structural steels, cast steels, shipbuilding, just about any medium carbon, low alloy steel where the welds are subject to X-ray inspection.

TYPICAL WELDING PROCEDURES; DCEP & AC

Diameter	Amps (Flat)	Volts	Diameter	Amps (Flat)	Volts
3/32"	60-100	23-27	3/16"	200-240	25-31
1/8"	90-150	24-28	7/32"	210-270	25-33
5/32"	130-200	25-31	1/4"	250-340	25-35

Use a short arc – dragging with 10-15% from 90°

Procedures may vary with change in position, base metals, filler metals, equipment and other changes.

TYPICAL WELD METAL CHEMISTRY (%) & PROPERTIES (AWS values are maximum)

	AWS Spec.	Weld metal		AWS Spec.	Weld metal
Carbon	0.15	0.07	Tensile Strength (ksi)	70	86
Manganese	1.60	0.97	Yield Strength (ksi)	58	72
Silicon	0.75	0.57	Elongation in 2" (%)	22%	31%
Phosphorus	0.035	0.012	Charpy V-notch at -20°F	20 ft-lbs min.	65 ft-lbs
Sulphur	0.035	0.011			

AVAILABLE SIZES: TE 7018 = 5/64", 3/32", 1/8", 5/32", 3/16", 7/32", 1/4"

SPECIFICATIONS; ANSI/AWS A5.1 E7018
ASME SFA 5.1 E7018

EAST COAST
825 Groves St
Lowell, NC 28098
Tel (980) 550-2002
Fax (909) 291-4586

GULF COAST
4855 Alpine Drive #100
Stafford, TX 77 477
Tel (888) 522-8296
Fax (909) 291-4586

WEST COAST
8885 White Oak, Ste104
Rancho Cucamonga, CA 91730
Tel (888) 522-8296
Fax (909) 291-4586



WA ALLOY CO.
20221 (X)

Warehouse Distribution Center – Dallas/Fort Worth & Portland, Oregon & Boston, Massachusetts Head Office – Puyallup, Washington,

Washington Alloy Company believes that all information and data given is correct. Use this information to assist in making your own evaluations or decisions and this information should not be mistaken as an expressed or implied warranty. U.S. ALLOY CO. assumes no liability for results or damages incurred from the use of any information contained herein, in whole or in part.



Quality Management System
In accordance with
ISO 9001:2000
Cert # 05-R0025

CERTIFICATE of Compliance

TRADE NAME: USA 7018
Specification: AWS A5.1 : ASME SFA 5.1
Classification: E7018

U.S. ALLOY CO.
dba Washington Alloy
7010-G Reames Rd.
Charlotte, NC 28216
www.weldingwire.com



Chemical Composition for Weld Metal

	AWS Requirements	Typical
Carbon (C)	0.15 max.	0.07
Manganese (Mn)	1.60 max.	0.97
Silicon (Si)	0.75 max.	0.57
Phosphorus (P)	0.035 max.	0.012
Sulfur (S)	0.035 max.	0.011
Nickel (Ni)	0.30 max.	
Chromium (Cr)	0.20 max.	
Molybdenum (Mo)	0.30 max.	
Vanadium (V)	0.08 max.	
Mn + Ni + Cr + Mo + V	1.75 max.	

Mechanical Properties for Weld Metal

	Minimum AWS Requirements	Typical
Tensile Strength	70,000 psi	86,000 psi
Yield Strength	58,000 psi	72,000 psi
Elongation in 2"	22 %	31 %
Charpy V-notch Impact Average	20 ft·lb: at -20°F	65 ft·lb: at -20°F

This certification is provided by Washington Alloy Co. with the expressed understanding that if the product supplied fails to conform to the stated specifications, there shall be no personal liability of any kind on the undersigned and the obligation and liability of Washington Alloy Co. with respect to such non-conformance or specification failure, shall be limited to a) an obligation to furnish the purchaser, at no additional charge, material that meets the specifications and conformances or b) to refund to the purchaser the full amount of money paid to Washington Alloy Co. for the return of the product in full. In no event shall Washington Alloy Co. be liable for consequential damage.

This certifies that the product supplied will meet the requirements of the noted classification and data above. Products supplied in accordance to the Quality Management System of Washington Alloy Company.


Certification Administrator

EAST COAST
7010-G Reames Rd
Charlotte, NC 28216
Tel (888) 522-8296
Fax (704) 598-6673

GULF COAST
4855 Alpine Drive #190
Stafford, TX 77477
Tel (877) 711-9274
Fax (281) 313-6332

WEST COAST
8535 Utica Ave
Rancho Cucamonga, CA 91730
Tel (800) 830-9033
Fax (909) 291-4586



Warehouse Distribution Center – Dayton, Ohio

Head Office – Puyallup, Washington

Washington Alloy Company believes that all information and data given is correct. Use this information to assist in making your own evaluations or decisions and this information should not be mistaken as an expressed or implied warranty. U.S. ALLOY CO. assumes no liability for results or damages incurred from the use of any information contained herein, in whole or in part.

Anexo 5.- Electrodo E8018 Pinnacle Alloys.

REV1218



Pinnacle Alloys are products of SOWESCO

ISO 9001:2008 REGISTERED

Certificate No.: 50040 & 50415

E8018-B2 DATA SHEET

Pinnacle Alloys E8018-B2
AWS CLASS E8018-B2 H4R
CODE AND SPECIFICATION DATA:
AWS A5.5 ASME SFA 5.5; UNS W52018

DESCRIPTION:
Pinnacle Alloys E8018-B2 are low-hydrogen electrodes producing weld metal that nominally contains 1.25% Cr and 0.5% Mo. They are designed to produce weld metal for high-temperature service and for matching the properties of some chromium-molybdenum base materials such as ASTM A387 Grade 11. Since all chromium-molybdenum electrodes produce weld metal which will harden in still air, both preheat and PWHT are required for most applications. Pinnacle Alloys E8018-B2 has quick and easy slag removal, which reduces clean up time. The low spatter level improves weld bead appearance and lends itself to higher depositions. Typical applications include boiler fabrication and maintenance.

TYPE OF CURRENT: Direct Current Electrode Positive (DCEP) or AC

DIAMETERS: 3/32", 1/8", 5/32", 3/16"

STORAGE & RECONDITIONING: After opening, store in an oven controlled at 220°F to 350°F to ensure a low hydrogen weld deposit. If the electrode has been exposed to the atmosphere for extended periods of time, place in 250°F oven and slowly increase temperature to 600°F; bake for one hour at 600°F.

WELDING POSITIONS: All positions
3/16" is recommended for use in flat and horizontal positions only



TYPICAL DIFFUSIBLE HYDROGEN BY GAS CHROMATOGRAPHY: 2.9 ml/100g



REV1218

Pinnacle Alloys are products of SOWESCO

 ISO 9001:2008 REGISTERED
 Certificate No.: 50040 & 50415

TYPICAL DEPOSIT COMPOSITION:

	AWS Spec	Weld Metal Analysis (%)
Carbon (C)	0.05-0.12	0.08
Chromium (Cr)	1.00-1.50	1.34
Manganese (Mn)	0.90	0.89
Molybdenum (Mo)	0.40-0.65	0.51
Phosphorus (P)	0.03	0.01
Silicon (Si)	0.80	0.66
Sulfur (S)	0.03	0.02

NOTE: Single values are maximums.

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES:

	AWS Spec (min)	SR 1 HR. @ 1275°F
Ultimate Tensile Strength	80,000 psi (550 MPa)	105,000 psi (723 MPa)
Yield Strength	67,000 psi (460 MPa)	82,000 psi (634 MPa)
Percent Elongation in 2"	19%	21%

TYPICAL WELDING PARAMETERS:

Diameter	Type of Current	Amperage	Deposition Rate (lbs/hr)	Amperage Range	Voltage Range
3/32"	DCEP or AC	100	2.47	70-110	Variable
1/8"	DCEP or AC	135	2.87	90-160	Variable
5/32"	DCEP or AC	170	3.84	130-220	Variable
3/16"	DCEP or AC	250	5.86	200-300	Variable

NOTE: Optimum conditions are in boldface type. For out of position welding, decrease amperage by 15%. These values were calculated using optimum parameters and DCEP polarity. Allowance made for 2" stub loss. Maintaining a proper welding procedure, including pre-heat and interpass temperatures, may be critical depending on the type and thickness of steel being welded.

NOTICE: The results reported are based upon testing of the product under controlled laboratory conditions in accordance with American Welding Society Standards. Actual use of the product may produce different results due to varying conditions. An example of such conditions would be electrode size, plate chemistry, environment, weldment design, fabrication methods, welding procedure and service requirements. Thus the results are not guarantees for the use in the field. The manufacturer disclaims any warranty of merchantability or fitness for any particular purpose with respect to its products.

CAUTION: Consumers should be thoroughly familiar with the safety precautions on the warning label posted in each shipment and in the American National Standards A49.1, "Safety in Welding and Cutting," published by the American Welding Society, 8669 NW 36 Street, #130, Miami, FL 33126; OSHA Safety and Health Standards 29 CFR 1910 is available from the U.S. Department of Labor, Washington, D.C. 20210.

Pinnacle Alloys SDS sheets may be obtained on the website below.

SOWESCO, LLC www.pinnaclealloys.com
 9384 Wallisville Road • Houston, Texas 77013 • 1-800-868-8363 • (713) 688-9353 • Fax (713) 688-6985
 2602 S. 50th Avenue • Phoenix, Arizona 85043 • 1-888-442-8363 • (602) 442-9353 • Fax (602) 442-9354

Anexo 6.- Ficha técnica del acero AISI 4140

FICHA TECNICA

ACERO SAE 4140



Catálogo Comercial

Aceros para Maquinarias	Normas		
	AISI/SAE	W. Nr.	DIN
Barras bonificadas	4140	1.7225	42CrMo4

Aplicaciones

Se utiliza principalmente para la fabricación de ejes, engranajes, cigüeñales, cilindros de motores, bielas, rotores, árboles de turbinas a vapor, ejes traseros, tuercas y pernos sometidos a exigencias de torsión e impacto. En el caso de aplicaciones para ejes superiores a 3" de diámetro sugerimos emplear acero AISI 4340 o 34CrNiMo6.



Composición Química (Análisis Típico, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,38 - 0,43	≤ 0,4	0,75 - 1	≤ 0,035	≤ 0,04	0,8 - 1,1	0,15 - 0,25

Propiedades del Acero

Acero aleado al cromo molibdeno, de buena penetración al temple, con buenas características de estabilidad dimensional hasta 2 ½" aprox., muy versátil y apto para esfuerzos de fatiga y torsión. Puede ser endurecido superficialmente por temple directo o por inducción obteniendo durezas sobre los 54 HRC no más allá de los 120 mm. Condición normal de entrega, bonificado, con una dureza nominal de 260 a 300 HB.

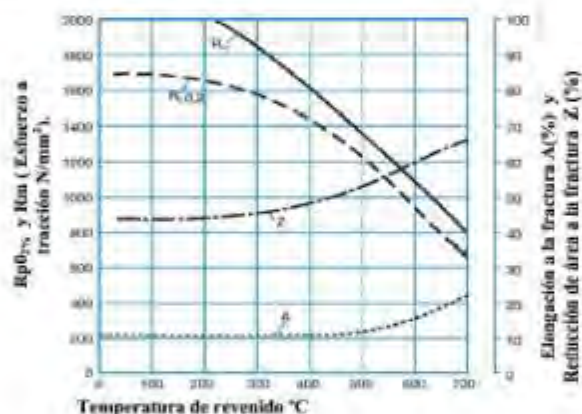


Catálogo Comercial

Propiedades mecánicas.

Diametro en mm Ø	Límite elástico min. N/mm ²	Resistencia a la tracción N/mm ² R _m min.	Elongación % A min.	Tenacidad (ISO-V) J/mm ²
≤ 16	900	1000 - 1300	10	30
> 16 ≤ 40	750	1000 - 1200	11	35
> 40 ≤ 100	650	900 - 1100	12	35
> 100 ≤ 160	550	800 - 950	13	35
> 160 ≤ 250	500	750 - 900	14	35
> 250 ≤ 500	460	690 - 840	15	38
> 500 ≤ 750	390	590 - 740	16	38

* Las propiedades descritas en la tabla anterior, corresponden a valores de propiedades mecánicas típicas para estas aleaciones, son de carácter informativo. Para este tipo de aleaciones solo se garantizan valores de dureza. Si desea valores de propiedades mecánicas específicas, favor consultar con nuestro departamento técnico.



Propiedades físicas.

Densidad	7833 Kg./m ³
Gravedad específica	7,83
Modulo de elasticidad	200 Gpa

Temperatura °C	W/m ² K
100	42,7
200	42,3
300	37,7

Temperatura °C	mm./mm. °C·10 ⁶
20 - 100	11,88
20 - 200	12,22
20 - 300	12,76

Catálogo Comercial

Tratamiento Térmico

Normalizado

Calentar la pieza hasta una temperatura de 870° C, luego enfriar al aire.

Recocido

Para un estructura predominantemente perlítica, calentar a 845° C y luego enfriar a 755° C a una razón de enfriamiento rápida, luego enfriar desde 755° C a 665° C a una razón que no exceda 14° C por hora; o calentar a 845° C, enfriar rápidamente a 675° C y mantener por 5 Horas.

Para formar una estructura esferoidal, calentar a 750° C y enfriar hasta 665° C a una razón de enfriamiento que no exceda 6° C por hora; o calentar a 750° C, enfriar rápidamente a 675° C y mantener por 9 Horas.

Temple

Austenizar a 820 - 840° C y enfriar en aceite o en baños de sales.

Revenido

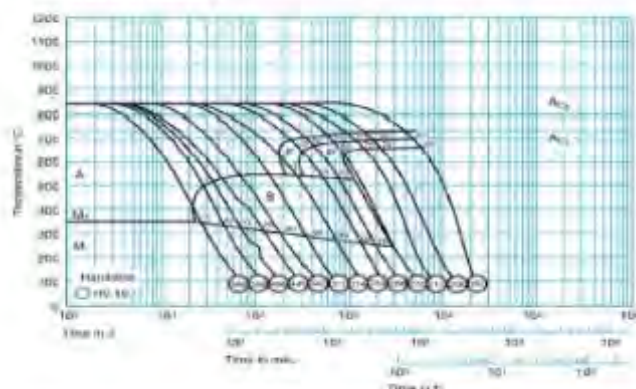
Calentar después del temple para obtener la dureza requerida.

No se recomiendan durezas por encima de 56 HRC para este acero.



Diagrama TTT – (Temperatura- tiempo- transformación)

Curva de revenido para temple en aceite



Catálogo Comercial

Recomendaciones sobre mecanizado

Los parámetros de corte que se encuentran a continuación deben ser considerados como valores guía. Estos valores deberán adaptarse a las condiciones locales existentes.

TORNEADO

Parámetros de corte	Torneado con metal duro		Torneado con acero rápido
	Torneado de desbaste	Torneado fino	Torneado fino
Velocidad de corte (vc) m/min.	90 - 160	100 - 160	12 - 20
Avance (f) mm/r	0,3 - 0,6	0,1 - 0,2	0,05 - 0,1
Profundidad de corte (ap) mm.	2 - 6	2	2
Mecanizado grupo ISO	P40 recubierto con TiAlN	P25	-

FRESADO

Fresado de acabado

Parámetros de corte	Tipo de fresa		
	Metal duro integral	Insertado metal duro	Acero rápido
Velocidad de corte (Vc) m/min.	50	100 - 150	17 ¹⁾
Avance (fz) mm/diente	0,03 - 0,2 ²⁾	0,08 - 0,2 ²⁾	0,05 - 0,35 ²⁾
Mecanizado Grupo ISO	K10, P40	P20 - P40	—

1) Para fresas de acabado de acero rápido recubierto Vc = 24 m/min.

2) Dependiendo del tipo de fresado y diámetro de corte.

Fresado frontal y axial

Parámetros de corte	Fresado con metal duro	
	Fresado de desbaste	Fresado en fino
Velocidad de corte (vc) m/min.	80 - 110	110 - 130
Avance (fz) mm/diente	0,2 - 0,4	0,1 - 0,2
Profundidad de corte (ap) mm.	2 - 5	2
Mecanizado grupo ISO	P20, P40 Carburo revestido	P10, P20 Carburo revestido o cermet

TALADRADO**Taladrado con brocas de acero rápido**

Diámetro de la broca Ø mm	Velocidad de corte (vc) m/min.	Avance (f) mm/r
5	15*	0,08 - 0,15
5-10	15*	0,15 - 0,25
10-15	15*	0,25 - 0,30
15-20	15*	0,30 - 0,35

*Para brocas de acero rápido recubiertas vc = 20 m/min.

Taladrado con brocas de metal duro

Parámetros de corte	Tipo de broca		
	Metal duro insertado	Metal duro sólido	Taladro con canales de refrigeración ¹⁾
Velocidad de corte (vc) m/min.	130-180	55	45
Avance (f) mm/r	0,05-0,25 ²⁾	0,10-0,25 ²⁾	0,15-0,35 ²⁾

¹⁾ Brocas con canales de refrigeración interna y plaqueta de metal duro.

²⁾ Dependiendo del diámetro de la broca.

Los datos técnicos y/o aplicaciones expresados en este catálogo son sólo referencias promedios y típicas para aleaciones estándar, además no son una obligación ni constituyen una exigencia contractual

Anexo 7.- Algunas operaciones realizadas durante la investigación.



Probetas de investigación



Prueba de doblado



Probetas con el kit de tintes penetrantes



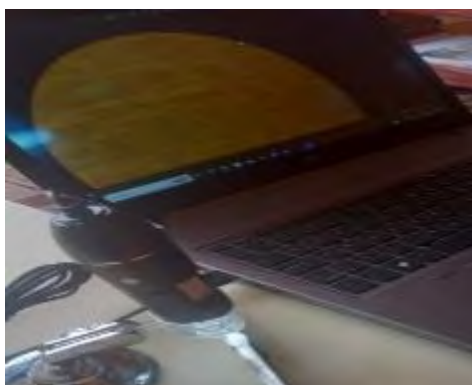
Recubriendo las probetas con tinte penetrante



Probetas cubiertas con tinte penetrante



Midiendo la dureza del cordón soldadura



Observando la micro-estructura de la probeta