

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



**TESIS**

**RECUPERACIÓN DEL ACERO AISI 4145 UTILIZADO COMO  
ALOJAMIENTO EJE PIVOT DE LA PERFORADORA PIT VIPER-271  
MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW  
(Investigación Tecnológica)**

**PRESENTADO POR:**

Br. EDGAR QUISPE CHOQUEPURI

Br. EDISON URBANO HUAMANI

CHELQQUETUMA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO METALÚRGICO**

**ASESOR:**

Dr. GUILLERMO BARRIOS RUIZ

**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 GUILLERMO BARRIOS RUIZ quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: RECUPERACIÓN DEL ACERA AISL 4145 UTILIZADO COMO ALQUANTAMENTO EIE PIVOT DE LA PERFORADORA PIT VIPER-271 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW (Investigación Tecnológica)

Presentado por: EGGAR QUISPE CHOQUEPURI DNI N° 76982028;  
presentado por: EDISON URBANO HUAMANÍ CHELOQUEYUMA DNI N°: 63371155  
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 09 %.

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

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	<input type="checkbox"/>
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.	<input type="checkbox"/>

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, 15 de enero de 2025

  
Firma

Post firma Guillermo Barrios Ruiz

Nro. de DNI 23877710

ORCID del Asesor 0000-0003-2738-297X

#### Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: old: 27259:546463127

# EDGAR QUISPE CHOQUEPURI EDISON HUAMANI ... RECUPERACIÓN DEL ACERO AISI 4145 UTILIZADO COMO ALOJAMIENTO EJE PIVOT DE LA PERFORADORA PIT VIPER-...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:546463127

Fecha de entrega

15 ene 2026, 11:53 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

15 ene 2026, 12:12 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

RECUPERACIÓN DEL ACERO AISI 4145 UTILIZADO COMO ALOJAMIENTO EJE PIVOT DE LA PERFORA....pdf

Tamaño del archivo

8.2 MB

157 páginas

28.940 palabras

170.497 caracteres

# 7% Similitud general

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




## Filtrado desde el informe

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

## Exclusiones


- N.º de coincidencias excluidas

## Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

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

-  **Texto oculto**  
10 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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

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

## **Presentación**

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores Docentes del jurado, en cumplimiento con la disposición del Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, con la finalidad de optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico; ponemos a vuestra consideración la tesis colectiva intitulada:

**RECUPERACIÓN DEL ACERO AISI 4145 UTILIZADO COMO ALOJAMIENTO EJE  
PIVOT DE LA PERFORADORA PIT VIPER-271 MEDIANTE EL PROCESO DE  
SOLDADURA SMAW  
(Investigación Tecnológica).**

El presente proyecto de la investigación tecnológica, pretende estudiar el comportamiento de las variables de la soldadura SMAW aplicadas en la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivote. El trabajo representa un interés en aplicar el conocimiento científico para fortalecer el conocimiento tecnológico en el ámbito de la soldadura y para la orientación de las personas que se dedican a la soldadura de mantenimiento de la perforadora Pit Viper 271.

**Br. Edgar Quispe Choquepuri**

**Br. Edison Urbano Huamani chelqquetuma**

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de Tesis a toda mi familia. Primeramente, a mi mamá Emilia que en paz descanse, papá (Teófilo y esposa Juliana), herman@s (Cleofe, Abdon, Lisbet, Uriel, Maribel, Sadan y Erick), quienes me inculcaron los valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

También está dedicada a mis suegros (María Escolástica y Mario), mis cuñad@s (Alex, Ximena, Milena, Lisbeth, Ruth y Kely), por su comprensión y ayuda en momentos difíciles. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad, ni desfallecer en el intento.

Para el amor de mi vida Vanessa, a ella en especial le dedico esta Tesis, por su paciencia, su comprensión, su fuerza, su amor, ser tal y como es. Es la persona que más directamente ha sufrido las consecuencias del trabajo realizado. Nunca podré estar lo suficientemente agradecido. Para mi hija, Nathsumi Daphne. Que es lo mejor que me ha pasado, y ha venido a este mundo para darme el impulso para realizar este trabajo. A todos ellos, Muchas gracias de todo corazón.

A mi asesor Dr. Guillermo Barrios Ruiz por su sabiduría y paciencia, por inspirarme a alcanzar más allá de lo que creía posible.

Por último, quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, así mismo a la facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica. y con cariño a mis profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, amigos y a todas las personas que han formado parte de mi trayecto académico.

Edison Urbano Huamani Chelqquetuma.

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de tesis a toda mi familia, mi madre Juana Choquepuri Pfuturi y a la memoria de mi padre Erasmo Quispe Choquepuri cuyo espíritu sigue vivo en cada página de esta tesis, quienes me han guiado y sostenido en cada paso de mi vida, por su constante apoyo. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación.

A mis hermanos Beltrán, Elena, Carmen, Humberto, Benita, Jhoel, Jesús, María por cada sonrisa conjunta y cada instante de respaldo sin reservas. Agradezco que siempre están presentes; en los instantes de felicidad y en los momentos más difíciles de mi vida, proporcionándome su apoyo incondicional.

A mi asesor Dr. Guillermo Barrios Ruiz por su conocimiento y paciencia, por motivarme a superar lo que pensaba ser factible, a mis amigos y a todas las personas que han participado en este periodo académico, les dedico este trabajo con gran gratitud y afecto.

Mi más profundo agradecimiento a todas las autoridades y al personal que hacen que siga adelante la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica por abrirme las puertas y permitirme completar mi proceso investigativo dentro del establecimiento de la universidad.

De igual manera mi agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, así como a la facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica, a mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica quienes durante todo mi periodo universitario me hicieron crecer día a día, como profesional, gracias por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y su amistad.

Edgar Quispe Choquepuri.

## RESUMEN

Los componentes del equipo de perforación Pit Viper 271 están sometidos a condiciones de desgaste severo, lo que exige que las piezas presenten propiedades mecánicas adecuadas para resistir los esfuerzos a los que se ven expuestas y asegurar un óptimo desempeño durante su ciclo de trabajo.

El presente trabajo de investigación aborda la problemática del desgaste en los alojamientos de la máquina perforadora, específicamente en el acero AISI 4145 utilizado como alojamiento del eje pivote. El objetivo principal fue determinar los parámetros de soldadura más adecuados para la recuperación de este material mediante el proceso SMAW.

Para ello, se prepararon cinco probetas que fueron soldadas con diferentes parámetros empleando el electrodo E11018-G. Se determinaron las variables de soldadura como la intensidad de corriente con 120 A logrando mejor calidad de recuperación, velocidad de soldeo óptimo con 2.96 mm/s que maximiza la calidad visual del cordón de soldadura, la distancia de arco según la ecuación 7 con 5mm logrando mejor equilibrio del arco de soldadura. Posteriormente, se realizaron pruebas de dureza con el Durómetro digital portátil HDT-1411 INSIZE en cada probeta, identificando las variaciones en función del calor aportado en cada pasada. Finalmente, se analizó la influencia de estas variables en la calidad del depósito mediante ensayos de dureza. Obteniendo los resultados con una dureza de 29.5HRC con un calor neto aportado de 729.72 J/mm y una intensidad de corriente de 120 A. Llegando que la intensidad de corriente influye directamente en el calor neto aportado, la penetración, la calidad visual de la soldadura.

**Palabras clave:** Pit viper, Intensidad de corriente, Resistencia al desgaste, Procesos smaw.



## ABSTRACT

The components of the Pit Viper 271 drilling rig are subjected to severe wear conditions, requiring that the parts possess adequate mechanical properties to withstand the stresses to which they are exposed and ensure optimal performance during their work cycle.

This research addresses the problem of wear in the drilling rig's housings, specifically in the AISI 4145 steel used as the pivot shaft housing. The main objective was to determine the most suitable welding parameters for the recovery of this material using the SMAW process.

To this end, five test specimens were prepared and welded with different parameters using the E11018-G electrode. Welding variables were determined, such as current intensity (120 A), which achieved the best recovery quality; optimal welding speed (2.96 mm/s), which maximizes the visual quality of the weld bead; and arc distance (5 mm, according to equation 7), which achieved better arc balance. Subsequently, hardness tests were performed on each specimen using the INSIZE HDT-1411 portable digital durometer, identifying variations based on the heat input in each pass. Finally, the influence of these variables on weld quality was analyzed through hardness tests. The results showed a hardness of 29.5 HRC with a net heat input of 729.72 J/mm<sup>2</sup> and a current intensity of 120 A. It was found that the current intensity directly influences the net heat input, penetration, and visual weld quality.

**Keywords:** Pit viper, Current intensity, Wear resistance, Smaw processes.

## Índice

Presentación .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Dedicatoria .....	iv
RESUMEN .....	v
Índice .....	vii
Índice de Tabla .....	xii
Índice de Figuras .....	xiii
Simbología .....	xv
1    Capítulo I: Planteamiento del Problema .....	17
1.1    Situación problemática .....	17
1.2    Formulación de problemas .....	18
1.2.1    Problema general .....	18
1.2.2    Problemas específicos .....	18
1.3    Justificación .....	18
1.3.1    Justificación económica .....	18
1.3.2    Justificación tecnológica .....	19
1.3.3    Justificación ambiental .....	19
1.3.4    Importancia .....	19
1.4    Objetivos de la investigación .....	19
1.4.1    Objetivo general .....	19
1.4.2    Objetivos específicos .....	20
2    Capítulo II: Marco Teórico .....	21
2.1    Antecedentes de la investigación .....	21

2.1.1	Antecedentes internacionales .....	21
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	23
2.2	Perforadora Pit Viper- 271 (PV-271).....	24
2.2.1	Diseño del equipo .....	25
2.2.2	Principales partes de la perforadora Pit Viper-271 .....	26
2.2.3	Limitaciones operacionales del equipo Pit Viper 271 .....	27
2.2.4	Tipo de acero del componente metálico de Pit Viper-271 .....	28
2.3	Tribología.....	30
2.3.1	Fricción.....	31
2.3.2	Lubricación.....	31
2.3.3	Desgaste.....	32
2.4	Desgaste de metales. ....	32
2.4.1	Desgaste abrasivo. ....	33
2.4.2	Desgaste adhesivo. ....	37
2.4.3	Desgaste por fatiga. ....	37
2.4.4	Desgaste por impacto. ....	38
2.5	Recubrimientos duros.....	39
2.5.1	Material de aporte.....	40
2.5.2	Normas AWS de electrodos para aceros de baja aleación. ....	41
2.6	El acero.....	45
2.6.1	Aceros al carbono simples.....	46
2.6.2	Aceros de baja aleación. ....	46
2.6.3	Aceros de alta aleación.....	46
2.6.4	Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA). ....	47
2.7	Metalurgia de la soldadura. ....	48

2.7.1	La zona de fusión. ....	49
2.7.2	Zona afectada por el calor. ....	49
2.7.3	Ciclo Térmico de la Soldadura.....	53
2.7.4	Diagrama hierro – carburo de hierro. ....	59
2.7.5	Soldabilidad.....	62
2.7.6	Carbono Equivalente. ....	64
2.7.7	Defectos metalúrgicos. ....	67
2.8	Proceso de Soldadura por Arco de Metal Protegido (SMAW).....	70
2.8.1	Principio de Funcionamiento.....	72
2.8.2	Ventajas y Desventajas del Proceso .....	73
2.8.3	Características del Arco.....	75
2.8.4	Variables de Soldeo del Proceso SMAW.....	78
2.8.5	Tensión del arco. ....	82
2.8.6	Intensidad de corriente. ....	83
2.8.7	Corrientes de la soldadura .....	83
2.9	Dureza .....	86
2.9.1	Escalas de dureza.....	87
3	Capítulo III: Hipótesis y Variables .....	91
3.1	Hipótesis.....	91
3.1.1	Hipótesis general .....	91
3.1.2	Hipótesis específica.....	91
3.2	Variables.....	91
3.2.1	Identificación de variables.....	91
3.2.2	Operacionalización de Variables.....	92
4	Capítulo IV: Metodología de Investigación.....	94

4.1	Tipo de investigación .....	94
4.2	Nivel de investigación .....	94
4.2.1	Nivel descriptivo: .....	94
4.2.2	Nivel explicativo: .....	94
4.3	Diseño de investigación .....	95
4.3.1	Diseño Experimental: .....	95
4.4	Enfoque de la investigación .....	95
4.5	Población de estudio.....	95
4.6	Muestra.....	95
4.7	Técnicas e instrumentos de toma de datos .....	96
4.7.1	Técnica: .....	96
4.7.2	Instrumentos: .....	96
4.8	Viabilidad de estudio.....	96
4.9	Plan de análisis de datos.....	97
5	Capítulo V: Desarrollo Experimental .....	98
5.1	Procedimiento experimental.....	98
5.2	Equipos y Materiales utilizados en la investigación. ....	99
5.2.1	Selección del metal base y material de aporte.....	99
5.2.2	Equipos, herramientas e instrumentos utilizados en la investigación. ....	102
5.2.3	Otras herramientas e instrumentos utilizados en la investigación.....	106
5.3	Procedimiento de soldadura. ....	107
5.3.1	Especificación del procedimiento de soldadura (WPS). ....	107
5.3.2	Cálculo de carbono equivalente. ....	107
5.3.3	Preparación de probetas.....	108
5.3.4	Aplicación de la recuperación mediante soldadura SMAW.....	111

5.4	Recuperación del acero AISI 4145.....	113
5.4.1	Ensayo de soldadura con distintos intensidad de corriente (A).....	113
5.4.2	Determinación de la velocidad de soldeo.....	116
5.4.3	Determinación la longitud del arco .....	118
5.4.4	Cálculo del calor neto aportado.....	119
5.5	Ensayos Destructivos y no Destructivos .....	121
5.5.1	Ensayos Destructivos .....	121
5.5.2	Ensayos no Destructivos .....	123
6	Capítulo VI: Discusión y Análisis de Resultados .....	127
6.1	Resultados .....	127
6.1.1	Intensidad de corriente (A).....	127
6.1.2	Velocidad de soldadura .....	128
6.1.3	Longitud de arco.....	130
6.1.4	Inspección visual de las probetas .....	131
6.2	Análisis de resultados.....	132
6.2.1	Intensidad de corriente .....	132
6.2.2	Velocidad de soldeo .....	132
6.2.3	Inspección visual .....	133
6.2.4	Calor neto aportado .....	133
6.2.5	Ensayo de dureza.....	133
7	Conclusiones.....	135
8	Recomendaciones .....	136
9	Referencias.....	137

### Índice de Tabla

<b>Tabla 1</b> Datos técnicos de la perforadora Pit Viper 271 .....	25
<b>Tabla 2</b> Composición química del acero AISI 4145 .....	29
<b>Tabla 3</b> Propiedades mecánicas del acero AISI 4145 .....	29
<b>Tabla 4</b> Metales de aporte y sus respectivas especificaciones AWS – ASTM. ....	40
<b>Tabla 5</b> Posición del electrodo .....	42
<b>Tabla 6</b> Composición química del electrodo E11018-G .....	44
<b>Tabla 7</b> Características típicas del metal depositado según normas AWS.....	45
<b>Tabla 8</b> Amperajes recomendados para el electrodo E11018-G .....	45
<b>Tabla 9</b> Eficiencia térmica de los procesos de arco. ....	57
<b>Tabla 10</b> Cuadro comparativo de las ventajas y desventajas de la soldadura SMAW.....	75
<b>Tabla 11</b> Comparación entre Corriente continua y alterna .....	85
<b>Tabla 12</b> Fórmulas para calcular la dureza Rockwell basada en escala utilizada. ....	90
<b>Tabla 13</b> Operacionalización de variables .....	93
<b>Tabla 14</b> Programa experimental .....	97
<b>Tabla 15</b> Tipos de aceros de baja aleación .....	99
<b>Tabla 16</b> Material base acero AISI 4145.....	100
<b>Tabla 17</b> Composición química del acero AISI 4145 .....	101
<b>Tabla 18</b> Tipos de electrodos .....	101
<b>Tabla 19</b> Composición química de los materiales de aporte .....	102
<b>Tabla 20</b> Especificaciones del equipo de soldadura.....	103
<b>Tabla 21</b> Aspectos generales del durómetro digital portátil #HDT-1411 INSIZE .....	105
<b>Tabla 22</b> Otras herramientas e instrumentos .....	106
<b>Tabla 23</b> Eficiencia térmica de los procesos de arco .....	119
<b>Tabla 24</b> Resultados de la intensidad de corriente (A).....	127
<b>Tabla 25</b> Resultados de la velocidad de soldeo.....	128
<b>Tabla 26</b> Resultados del cálculo de la longitud de arco .....	130
<b>Tabla 27</b> Resultados del examen visual. ....	131

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Equipo PIT VIPER 271 .....	25
<b>Figura 2</b> Torre, Carrusel y Varilla .....	26
<b>Figura 3</b> Equipo perforador.....	27
<b>Figura 4</b> Estructura de alojamiento en el PIT VIPER 271.....	28
<b>Figura 5</b> Desgaste de estructuras en alojamientos .....	33
<b>Figura 6</b> Desgaste abrasivo .....	34
<b>Figura 7</b> Desgaste por abrasión según el tipo de contacto .....	35
<b>Figura 8</b> Mecanismos de desgaste abrasivo según el contorno de contacto .....	36
<b>Figura 9</b> Denominación de electrodos según la AWS para el proceso SMAW .....	41
<b>Figura 10</b> Denominación para electrodo de baja aleación.....	42
<b>Figura 11</b> Clasificación de los aceros. ....	48
<b>Figura 12</b> Regiones de la zona afectada por el calor .....	50
<b>Figura 13</b> Microestructura de la ZAC en aceros.....	52
<b>Figura 14</b> Ciclo térmico de la soldadura.....	53
<b>Figura 15</b> Distribución de temperatura del ciclo térmico. ....	55
<b>Figura 16</b> Curvas isométricas de una plancha sometida a soldadura a tope. ....	56
<b>Figura 17</b> Diagrama hierro-carbono .....	60
<b>Figura 18</b> Diagrama de hierro-carburo de hierro simplificado .....	61
<b>Figura 19</b> Zonas que indica los grados de soldabilidad.....	67
<b>Figura 20</b> Difusión de hidrogeno del metal de soldadura a la ZAC en la soldadura. ....	68
<b>Figura 21</b> La soldadura por arco de metal protegido .....	71
<b>Figura 22</b> Soldadura por arco con electrodo revestido .....	73
<b>Figura 23</b> Influencia de la longitud de arco en la representación, ancho y penetración de cordón de soldadura .....	80
<b>Figura 24</b> Corriente continua de electrodo negativo, polaridad directa.....	83
<b>Figura 25</b> Corriente continua de electrodo positivo, polaridad inversa .....	84
<b>Figura 26</b> Corriente alterna .....	85
<b>Figura 27</b> Ensayo de dureza mediante un penetrador .....	86
<b>Figura 28</b> Ensayo de dureza Rockwell .....	89



<b>Figura 29</b> Identificación de variables.....	92
<b>Figura 30</b> Diagrama de flujo del procedimiento experimental .....	98
<b>Figura 31</b> Equipo de soldeo MILLER XMT 304 CC/CV .....	102
<b>Figura 32</b> Oxiacetileno.....	104
<b>Figura 33</b> Pirómetro y sus características .....	104
<b>Figura 34</b> Durómetro digital portátil #HDT-I411 INSIZE .....	105
<b>Figura 35</b> Ubicación del valor de Carbono equivalente en el diagrama de Graville. ....	108
<b>Figura 36</b> Desbaste de probetas mediante amoladora.....	109
<b>Figura 37</b> Precalentamiento de las probetas .....	109
<b>Figura 38</b> Aceros AISI 4145 y electrodos E11018 .....	111
<b>Figura 39</b> Aplicación de soldeo mediante el proceso de soldadura SMAW. ....	111
<b>Figura 40</b> Medición de Voltaje y Amperaje. ....	112
<b>Figura 41</b> Limpieza de cordones de soldadura de revestimiento entre cada pasada.....	112
<b>Figura 42</b> Ensayo de soldadura a 100A .....	113
<b>Figura 43</b> Ensayo de soldadura a 110A .....	114
<b>Figura 44</b> Ensayo de soldadura a 115A .....	114
<b>Figura 45</b> Ensayo de soldadura a 120A .....	115
<b>Figura 46</b> Ensayo de soldadura a 130A .....	115
<b>Figura 47</b> Soldadura a una corriente de soldadura de 100A .....	124
<b>Figura 48</b> Soldadura a una corriente de soldadura a 110A .....	124
<b>Figura 49</b> Soldadura a una intensidad de corriente de 115A .....	125
<b>Figura 50</b> Soldadura a una intensidad de corriente de 120A .....	125
<b>Figura 51</b> Soldadura a una intensidad de corriente de 130A .....	126
<b>Figura 52</b> Grafica de la intensidad de corriente vs calor neto aportado .....	127
<b>Figura 53</b> Grafica de la intensidad de corriente vs velocidad de soldadura .....	129
<b>Figura 54</b> Grafica de la intensidad de corriente vs longitud de arco .....	130

## Simbología

AWS:	Sociedad Americana De Soldadura.
SMAW:	Soldadura por Arco de Metal Protegido
V:	Tensión o diferencia potencial(voltio).
I:	Intensidad de corriente (Amperios).
°C:	Grados Celsius.
CA:	Corriente alterna.
CC:	Corriente continua.
ASTM:	Sociedad Americana para la prueba de materiales.
WPS:	Especificación del Procedimiento de Soldadura.
PV 271:	Pit Viper 271(equipo de perforación 271)
AISI:	Instituto Americano de Hierro y Acero.
mm:	Milímetro.
CE:	Carbono Equivalente
DCEN:	Corriente Continua de Electrodo Negativo
DCEP:	Corriente continua de electrodo positivo
DIN:	Instituto Alemán de Normalización
DOE:	Diseño de experimentos
HSLA:	Aceros de alta resistencia y baja aleación
HB:	Dureza Brinell
HR:	Dureza Rockwell
HV:	Dureza Vickers
IIW:	Instituto Internacional de Soldadura
OFW:	Soldadura oxiacetilénica
Pcm:	Parámetro crítico de soldadura
SAE:	Sociedad de Ingenieros de Automoción
WPS:	Especificación del procedimiento de soldadura)
WGS:	Sistema geodésico mundial
ZAC:	Zona afectada por el calor
CDPI:	Corriente directa polaridad invertida (+)
CDPD:	Corriente directa polaridad directa (-)

$I$ : Intensidad de corriente (Amp)

$d$ : Diámetro del electrodo(mm)

$k$ : Constante que depende del tipo de electrodo

$C_s$  : Carbono equivalente del espesor (%)

$e$ : Espesor de la pieza (mm)

$C_e$  : Carbono equivalente químico (%)

CCT: Continuous Cooling Transformation (Diagrama de Transformación por Enfriamiento Continuo).

HAZ: Heat Affected Zone(en español (Zona Afectada por el Calor)

BCT: Body Centered Tetragonal (tetragonal centrado en el cuerpo)

UNSAAC: Universidad nacional de San Antonio Abad del Cusco

PUCP: Pontificia Universidad Centro del peru

HRC: Hardness rockwell C (dureza rockwell C)

DTH:Down-The-Hole (Perforación en fondo)

$^{\circ}T$ : Temperatura

A: Amperes

PQR: Registro de Calificación de Procedimiento (Welding Academy Christchurch)

wt%: Porcentaje en peso

Pit Viper: Equipo perforadora

T1: acero (placa templada)

Dur-Cap: acero (tapa dura)

Cor-Cap: acero (tapa anticorrosiva)

## **Capítulo I:**

### **Planteamiento del Problema**

#### **1.1 Situación problemática**

A escala global y en nuestra nación en el sector metalúrgico, se ha recuperado el acero AISI 4145 empleado como soporte para el eje pivot a través del método de soldadura Arco con Electrodo Revestido (SMAW), es ampliamente utilizado para recuperación de estructuras que funcionalmente son sometidos a desgastes o daño a través de la realización de trabajos en diferentes campos. No obstante, la eficacia y la durabilidad de este procedimiento están considerablemente vinculadas a la elección adecuada del material de aporte y a los parámetros de soldadura SMAW.

A pesar de grandes avances en la metalurgia de la soldadura y la disposición de un amplio procedimiento de la soldadura se requiere conocer en detalles la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271, permanece como un reto de considerable envergadura. La ausencia de criterios precisos y específicos para la conservación del acero puede resultar en que no se satisfagan las condiciones necesarias de resistencia, tenacidad y durabilidad. Esto puede resultar en un incremento en los costos de mantenimiento, así como en posibles defectos estructurales que puedan poner en riesgo la integridad del equipo.

En consecuencia, se requiere abordar esta problemática a través de una investigación tecnológica que facilite el reconocimiento de los elementos esenciales que influyen en la recuperación del acero empleado como soporte eje pivot de la perforadora Pit Viper-271 a través del método SMAW. Esto incluye reflexiones sobre la composición química, las características

mecánicas, la microestructura resultante y la adhesión con la base de metal, entre otros aspectos. elementos de importancia.

## **1.2 Formulación de problemas**

### **1.2.1 Problema general**

¿Será posible la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271 mediante el proceso de soldadura SMAW?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- a) ¿Cómo influirá la intensidad de corriente en la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271?
- b) ¿Cómo influirá la velocidad de soldeo en la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271?
- c) ¿Cómo influirá la longitud de arco en la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271?

## **1.3 Justificación**

### **1.3.1 Justificación económica**

La mejora en la recuperación del acero AISI 4145, utilizado como alojamientos de la perforadora Pit Viper, por el proceso de soldadura SMAW, permitirá reducir costos de reposición de componentes mecánicos, así mismo permitirá incrementar la rentabilidad y cumplir tareas de la calidad que se requiera, con el fin de satisfacer a los clientes.

### **1.3.2 Justificación tecnológica**

La relevancia de esta actividad para la organización es considerable este estudio permitirá a las instituciones realizar investigación. del sector de la metalurgia de la soldadura recuperar el acero AISI 4145 utilizada como alojamientos de los equipos perforadoras, para adecuar un sistema de administración de calidad en los residuos. Adicionalmente, esto potenciará la competitividad en el sector comercial.

### **1.3.3 Justificación ambiental**

Este análisis contribuirá de manera notable a la conservación del medio ambiente al disminuir significativamente la cantidad de residuos ambientales residuos sólidos generados por la industria del acero.

### **1.3.4 Importancia**

La recuperación es importante porque el acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271 se desgastan constantemente debido a una variedad de factores que afectan su tiempo de trabajo. La recuperación de esta parte del acero utilizado como alojamiento eje pivot, mediante la soldadura es crucial en el ámbito de la metalurgia.

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo general**

Recuperar el acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271 mediante el proceso de soldadura SMAW.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- a)** Determinar la intensidad de corriente óptimo para la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271.
- b)** Determinar la velocidad de soldeo para la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271.
- c)** Determinar la longitud del arco para recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271.

## **Capítulo II:**

### **Marco Teórico**

#### **2.1 Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1 Antecedentes internacionales**

Zapata & Molina (2017) con el trabajo de investigación titulado “Recuperación de un molino vertical atox 32.5 para molienda de caliza por medio de soldadura” el desgaste es el fenómeno en el que varios materiales se debilitan debido a la abrasión, el impacto, la fatiga, la El deterioro y la corrosión, entre otros elementos. El fenómeno produce significativas pérdidas financieras debido al daño de componentes de máquinas y equipos industriales, además de una gran cantidad de impacto ambiental. La reconstrucción y conservación de materiales mediante soldadura se origina con el objetivo de mitigar los efectos perjudiciales del desgaste. Se han realizado pruebas con recubrimientos epóxicos (compuestos metálico-orgánicos), sin embargo, su duración es inferior a 6 días, lo que los hace descartados. La implementación del recubrimiento duro mediante soldadura requería de dos a cinco meses, razón por la cual se decidió emplear carburos especiales en las áreas donde se producen perforaciones ocasionadas por el desgaste. Estos carburos poseen propiedades particulares, incrementan la dureza y prolongan la vida útil de las placas de mesa.

Kumar & Verma, (2017). Efecto del recargue multicapa sobre el comportamiento metalúrgico y de desgaste del acero dulce mediante proceso SMAW. Este estudio tuvo como objetivo examinar los efectos de la aplicación de múltiples capas de recubrimiento en el comportamiento metalúrgico y la resistencia al desgaste de las aleaciones reforzadas con carburos complejos. Las aleaciones de recubrimiento resistente fueron depositadas en placas de acero al



carbono ASTM A36 en tres capas distintas, variando el número de pasadas en cada una. Las pruebas de resistencia al desgaste por adherencia se llevaron a cabo utilizando una máquina de desgaste pin-on-disc según los procedimientos estandarizados en las normas ASTM G99. Se realizaron análisis detallados de la estructura microscópica y la microdureza, junto con análisis espectrales utilizando un espectrómetro de emisión óptica. Los resultados indicaron que tanto la resistencia al desgaste como la dureza están influenciadas por factores como forma, tamaño y composición química de los carburos, además de la microestructura de la matriz compuesta por martensita y austenita retenida. Los autores concluyen que en la tercera capa la resistencia al desgaste, la dureza y la presencia de carburos eran más altas. Sin embargo, estas diferencias no eran considerablemente superiores a las observadas en la segunda capa. Además, se notó que la segunda capa experimentó un incremento significativo en comparación con la primera capa de cobertura.

Bonilla & Byron (2015) “Reconstrucción y/o reparación de piezas de fundición gris, por medio de soldadura al arco (SMAW)”, se propone un procedimiento adecuado soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, SMAW, para la recuperación de elementos mecánicos de fundición gris y nodular que han experimentado daños en el proceso de fundición. Este procedimiento específico debe cumplir con todas las exigencias mecánicas requeridas, lo que se traducirá en la obtención de estructuras metalográficas que sean plenamente compatibles de una perspectiva mecánica con los que se encuentran en el material de base. De esta manera, es fundamental establecer y aplicar las técnicas de soldadura adecuadas con el objetivo de lograr una fusión completa y una penetración profunda entre el material de base y el material de contribución en las piezas y entre el material de aporte y el material de contribución en las piezas elementos con características particulares de fundiciones gris y nodular.

### **2.1.2 Antecedentes nacionales**

Chambi (2014) en su trabajo de investigación “Análisis de la recuperación del pestillo de compuerta de cucharón de pala mecánica 3800 - 4100 por proceso de soldadura SMAW” La soldadura los procedimientos de mantenimiento junto con los revestimientos resistentes extienden la durabilidad de los revestimientos. equipos mediante la obtención de rendimientos elevados durante un período prolongado y la disminución en la incidencia de fallos. La tecnología asiste a las industrias en la prevención de la necesidad de reemplazar componentes nuevos y en la extensión de la durabilidad de la vida útil mediante la ampliación de la durabilidad de la misma de los diversos componentes empleados en el sector industrial. De este modo, se optimiza la disponibilidad de la maquinaria, lo que disminuye los costos asociados a la reposición de componentes nuevos y optimiza la vida útil de la misma. Las micro fisuras generadas durante el proceso de soldadura propician la degradación el acero del pestillo de compuerta de cucharón de pala mecánica del pestillo de compuerta de cucharón de pala. Esto se debe al tratamiento térmico del cordón de soldadura, lo que resulta en una dureza superior del metal base en comparación con el cordón de soldadura. La duración de la vida útil del pestillo de compuerta de cucharón de pala mecánica se incrementará si se lleva a cabo un análisis de soldabilidad, en lugar de limitarse a la utilización del electrodo más avanzado disponible en el mercado.

Luddey & Trujillo (2007) “Recuperación de piezas desgastadas con recubrimientos protectores” todas las industrias se observa el desgaste de componentes y maquinaria, lo que exige la minimización de este desgaste y la recuperación de estos componentes, lo que resulta en una mejora en la relación costo-beneficio. “Incrementar adicionalmente, se requieren las horas de funcionamiento y la eficacia de los dispositivos. Para una decisión de elección adecuada del tipo de protector de recubrimiento y su implementación, es imprescindible tener conocimiento de las

variaciones de deterioro a los que puede estar sujeta la pieza que se busca resguardar”. Los revestimientos resistentes tienen la capacidad de regular todas las formas de desgaste; Sin embargo, un solo recubrimiento no alcanza todas las formas de desgaste.

## **2.2 Perforadora Pit Viper- 271 (PV-271)**

Es una máquina esencial en la minería a cielo abierto y se destaca por su capacidad de perforación, resistencia y eficiencia operativa. “Su resistencia y capacidad de adaptación a diferentes condiciones mineras la convierten en una de las perforadoras preferidas en la industria minera global, lo que respalda su rendimiento en la operación.” Epiroc, (2024)

La mejor maquinaria de perforación rotatoria con tricono más eficaz para la perforación de barrenos. de 171 a 270 mm (6-3/4" a 10-5/8"). La perforación de barrenos limpios hasta una profundidad de 18 metros (59 pies) puede realizarse con un solo procedimiento. El PV-271 tiene el potencial de incrementar la eficiencia operativa al poseer una capacidad de carga de 34 toneladas (75 000 libras) sobre la broca. Para maximizar la durabilidad de los componentes y reducir el costo total de funcionamiento, el Pit Viper 271 incorpora un sistema de deslizadera de cable patentado con tensado automático. (Epiroc, 2024)

El PV-271 es adaptable a cualquier tipo de operación gracias a sus opciones para grupos de potencia diésel y eléctricos.

**Tabla 1**

*Datos técnicos de la perforadora Pit Viper 271*

Datos técnicos	
Área de aplicación principal	Perforación rotativa de barrenos para voladura
Método de perforación	Pase único rotativa y DTH
Familia de productos	Pit Viper
Profundidad de un solo paso	16,8 m
Profundidad máxima del agujero	32 m
Peso en bit	34 809 kg
Capacidad desplegable	0 kN - 311 kN
Capacidad de retroceso	0 kN - 156 Kn

*Nota: (Epiroc, 2024)*

**Figura 1**

*Equipo PIT VIPER 271*



*Nota: fotografía obtenida en la empresa EPIROC, 2024*

**2.2.1 Diseño del equipo**

Las perforadoras tienen la capacidad de ser utilizadas en una sola pasada. Se trata de una perforadora instalada en orugas, equipada con un cabezal hidráulico superior y una pasada diseñada para perforar en tronaduras rotacionales hasta una profundidad de 32,3 metros y diámetros máximos de 200 mm a 270mm. “El motor diésel acciona el compresor de aire y el sistema hidráulico de la PV-271. Los mecanismos de control eléctrico sobre las válvulas

hidráulicas regulan el funcionamiento de la perforadora, permitiendo al operador supervisar la plataforma de perforación durante el proceso de perforación. La PV-271 incorpora el compresor de aire de tornillos asimétricos de Ingersoll-Rand”. (Atlas copco - CHILENA S.A, 2022)

Las perforadoras Multi-Pass son una excelente opción para realizar perforaciones en terrenos difíciles y de acceso complicado. “Estas perforadoras, equipadas con un resistente cabezal hidráulico superior, se destacan por su eficiencia y versatilidad en una sola pasada. Gracias a su diseño montado sobre orugas, pueden desplazarse con facilidad por terrenos irregulares, garantizando un rendimiento óptimo en cada proyecto de perforación, diseñada para perforar en tronaduras rotatorias hasta una profundidad de 59.4 metros y diámetros máximos de perforación de 200 mm a 270 mm. La PV-275 y la PV-271 tienen el mismo diseño, pero su tronadura tiene una profundidad diferente”. (Atlas copco - CHILENA S.A, 2022)

### 2.2.2 Principales partes de la perforadora Pit Viper-271

**Figura 2**

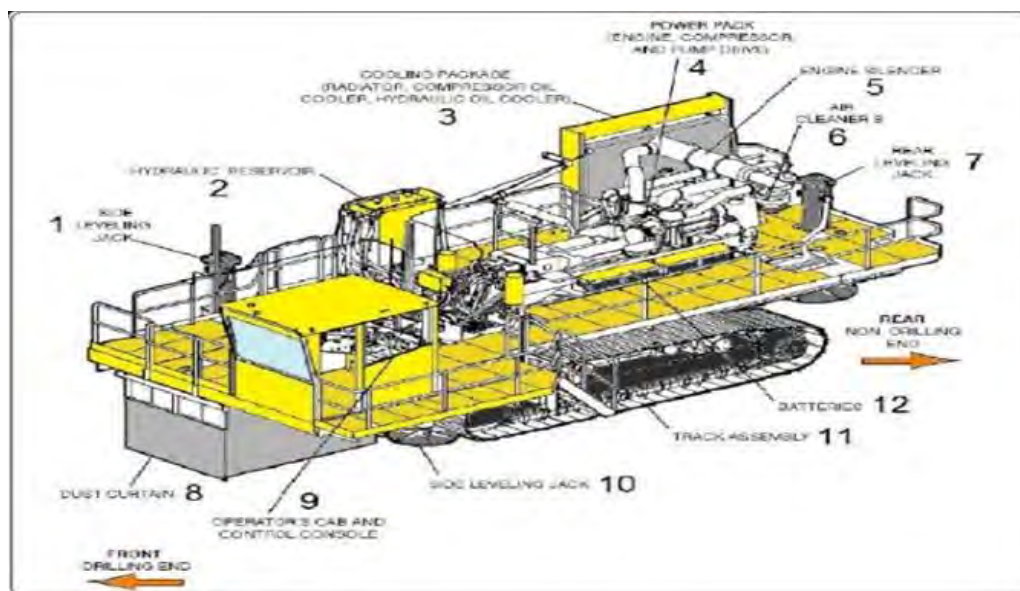
*Torre, Carrusel y Varilla*



Nata: Atlas COPCO - chilena S.A 2022.

**Figura 3.**

*Equipo perforador*



1 Cilindro de nivelación lado colector.

2 Tanque hidráulico.

3 Radiador del motor/ enfriador.

4 Motor / mando de bombas.

5 Silenciador de motor.

6 Filtros de aire de motor.

7 Cilindro de nivelación posterior.

8 Cortina de polvo.

9 Cabina.

10 Cilindro de nivelación lado cabina.

11 Carrilería.

12 Baterías.

Nota: Atlas Copco - CHILENA S.A 2022.

### 2.2.3 Limitaciones operacionales del equipo Pit Viper 271

- ❖ **Rango de Temperatura Ambiente:** diseñadas para un espectro de temperatura operativa que oscila entre 125°F (52° C) y 15°F (-10° C).
- ❖ **Presión sobre el Piso:** la serie 270 emplean un rodamiento de tipo excavadora, trabajando con una presión de diseño sobre el piso de 13 psi (8,64 kPa).
- ❖ **Máximo ángulo de ramblas permitido:** Las perforadoras están diseñadas para operar en rampas cuya inclinación no supere los 5 grados.

- ❖ **Condiciones de Operación para la Estabilidad:** La estabilidad se encuentra condicionada por factores como la ubicación de la torre, la orientación de la perforadora en la rampa, la estabilidad de la superficie y las condiciones meteorológicas del viento.
- ❖ **Limitaciones de Presión de sonido:** La perforadora 271 SPC ha sido sometida a prueba a la velocidad de operación estándar del motor, alcanzando los siguientes valores máximos: En la estación del operador, ya sea en cabina cerrada, en posición de pie o sentado, el ruido debe ser inferior a 80 decibelios.
- ❖ **Limitaciones a Exposición de Vibraciones:** La perforadora 271 SPC ha sido sometida a pruebas y los valores de aceleración a los que están sometidos los brazos no superan 2.5 metros por segundo.

**Figura 4**

*Estructura de alojamiento en el PIT VIPER 271.*



*Nota:* Fotografía tomada en la empresa Epiroc - Perú

## 2.2.4 Tipo de acero del componente metálico de Pit Viper-271

La norma AISI clasifica los aceros con un código de 4 dígitos (Ej: 1020, 4145) que indica su composición principal de: el primer dígito (1=Carbono, 2=Níquel, 3=Ni-Cr, 4=Cr-Mo, etc.) define el tipo aleación, el segundo indica el porcentaje de esa aleación principal, y los dos últimos (XX) señalan el contenido de carbono en centésimas de porcentaje (Ej: 45 = 0.45% C)

### 2.2.4.1 Acero AISI 4145

Es una clase de acero que presenta una aleación mínima de los componentes de cromo molibdeno, de alta resistencia, buena templabilidad, tiene buena ductilidad, resistencia a los golpes y resistencia al desgaste. “En comparación con los aceros al carbono, los aceros aleados son mucho más sensibles a los tratamientos mecánicos y térmicos.” Los aceros aleados pueden someterse a procesos de fusión y desoxidación únicos para tipos específicos de aplicaciones.

AISI 4145 se utiliza con frecuencia para gran mayoría gama de aplicaciones en el petróleo y el gas. “Se usa con frecuencia para fabricar herramientas de perforación de fondo de pozo, como collares de perforación. Engranajes, ejes de prensas hidráulicas, rodillos para fábricas de papel, ejes de bombas y porta herramientas son otras aplicaciones”. (Fortinox, 2022)

**Tabla 2**

*Composición química del acero AISI 4145*

TIPO	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Cu%
<b>AISI 4145</b>	0.46	0,28	1,11	0.010	0.006	1.17	0.12	0.30	0.20

*Nota: (Fortinox, 2022)*

**Tabla 3**

*Propiedades mecánicas del acero AISI 4145*

Propiedades	Métrico	Imperial
Módulo volumétrico (típico de los aceros)	140 GPa	20300 ksi
Módulo de corte (típico de los aceros)	80,0 GPa	11600 ksi
Módulos elásticos	Promedio de notas de 190-210	27557-30458 ksi
El coeficiente de Poisson	0,27-0,30	0,27-0,30
Dureza Rockwell C (HCR)	20-22	20-22

*Nota: (Fortinox, 2022)*



### 2.2.4.2 Aplicaciones del AISI 4145

Las aplicaciones según (Fortinox, 2022) del acero AISI 4145 son las siguientes:

- 1) Fabricación de piezas de los equipos perforadoras.
- 2) Collarines de perforación de equipo perforadora.
- 3) Herramientas de perforación de fondo de pozo, como collares de perforación.
- 4) También se puede usar en estado endurecido ya que las piezas de la máquina están expuestas a un desgaste intenso.
- 5) Estructuras en edificios, puentes, estaciones de ferrocarril.
- 6) Fabricación de componentes de tuberías y equipos industriales, etc.

Otros tipos de acero que compone la perforadora Pit Viper 271, y que es producido por Aceros Arequipa:

**ASTM A36/A36M:** Estructuras, puertas, ventanas, rejas

**ASTM A36/A36M, ASTM A6:** Mecánica, estructuras, ejes, pernos

**ASTM A500:** Tubo galvanizado

**ASTM A513:** Tubo laminado en frío

**ASTM A500:** Tubo laminado en caliente

## 2.3 Tribología

“La tribología es la disciplina científica enfocada en el investigar la fricción, lubricación y deterioro, sucesos que suceden cuando dos superficies se unen al deslizarse. En este campo, los

componentes fundamentales son al menos dos superficies que interactúan y su traslado relativo”. (American Society for Metals, 1992)

La meta principal del estudio en tribología es reducir y finalmente suprimir, las pérdidas de materiales provocadas por la fricción y el deterioro en todos los campos tecnológicos donde la relación entre superficies desempeña un rol fundamental. Los descubrimientos del estudio tribológico se reflejan en incrementos en la eficiencia de las instalaciones, un desempeño más eficiente, una reducción de las averías y, finalmente, en ahorros significativos (Bhushan, 2013)

### **2.3.1 Fricción**

“Hace alusión a la resistencia que surge al tratar de desplazar un objeto sólido por encima de otro que está en contacto con él. Esta resistencia se evidencia como una fuerza perceptiva que opera de manera contraria al movimiento, y se conoce como fuerza de resistencia por fricción”. (Bhushan, 2013). Los elementos que intervienen pueden ser gas y sólido, lo que se conoce como fricción aerodinámica; “De igual forma, un líquido y un sólido, denominado fricción líquida. Además, puede presentarse fricción a causa de procesos internos de disminución energética en un organismo, lo que se conoce como fricción interna”. (American Society for Metals, 1992)

### **2.3.2 Lubricación**

consiste en la aplicación de un lubricante, ya sea gas, líquido o sólido, entre dos superficies sólidas que se deslizan entre sí. El propósito principal de este procedimiento es disminuir la fricción y el desgaste, además de disipar el calor y los desechos producidos durante el deslizamiento. “El método de lubricación puede cambiar considerablemente dependiendo de varios factores, los elementos que interactúan incluyen la forma de los objetos, la textura y

rugosidad las superficies, el peso asignado, la presión y la temperatura, junto con las velocidades de deslizamiento y rotación”, (Ammerican Society for Metals, 1992)

### **2.3.3 Desgaste**

Se define por la degradación superficial o la expulsión de material de una o ambas superficies sólidas durante su movimiento, rueda o choque entre ellas. En la mayoría de las circunstancias, el deterioro ocurre debido a interacciones entre las irregularidades superficiales. “Durante el periodo el material en la superficie que interactúa puede ser reorgánico, modificando así las propiedades del sólido, al menos en la superficie o en las zonas cercanas. Sin embargo, en realidad, la pérdida de material es insignificante o incluso nula”. (Bhushan, 2013)

## **2.4 Desgaste de metales.**

Se puede definir como el deterioro de una superficie sólida a causa de la supresión o alteración de material, provocado por la interacción mecánica con otro metal, líquido o gas que está en contacto como se muestra en la figura 5. “Este procedimiento puede causar daños considerables en la superficie, y usualmente se define como un proceso de degradación gradual del material y la reducción de las dimensiones a causa de la acción mecánica. Así pues, la degradación de los metales sucede debido a la deformación plástica y la fragmentación de materiales con el paso del tiempo”. (Maleque, 2013)

La calidad de los productos metálicos se fundamenta en gran medida en el estado de sus superficies superficiales. La degradación que sufren estas superficies durante su uso es un hecho factor esencial a considerar. Este declive también posee una relevancia significativa en el ámbito de la ingeniería ya que frecuentemente es el elemento clave que limita tanto la durabilidad como

el desempeño de los componentes de una máquina. Entre las fuerzas más perjudiciales a las que se enfrentan los metales, el desgaste destaca como una de las más destructivas. (Avner, 1974)

### **Figura 5.**

#### *Desgaste de estructuras en alojamientos*



*Nota.* Registro fotográfico, Empresa Epiroc - Perú

Según (Schey, 2002), “El desgaste conlleva la reducción progresiva de la composición en la superficie funcional de los componentes. Alternativamente, se puede incrementar la resistencia al desgaste mediante el recubrimiento y modificar la superficie o alterar su forma para conseguir una mayor capacidad de resistencia al desgaste”.

#### **2.4.1 Desgaste abrasivo.**

Este tipo de deterioro es la forma más habitual de deterioro que sucede en el funcionamiento de maquinaria y equipos en el sector industrial. “El deterioro por abrasión se produce a causa de partículas de carácter sólido y duro, que pueden ubicarse tanto en uno de los componentes que interactúan como entre sí, como entre ellos los dos elementos”. (Schey, 2002).

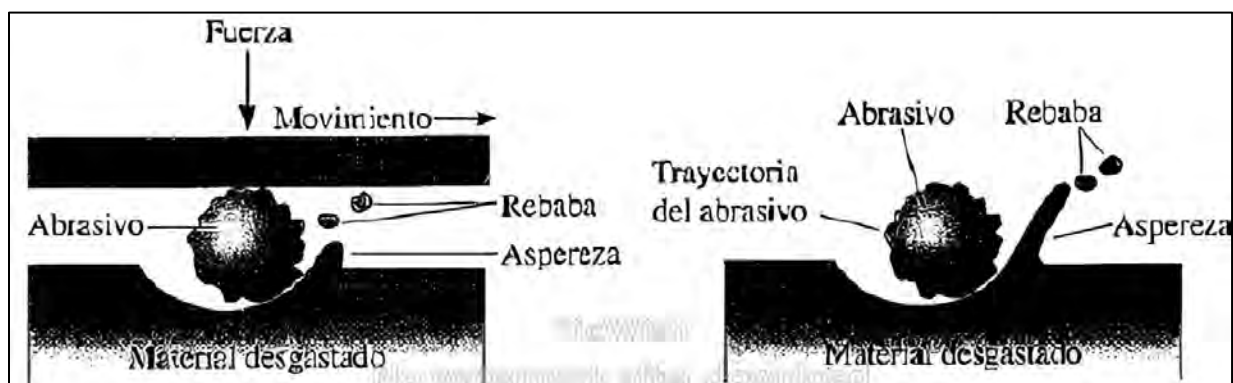
De acuerdo con la descripción de la ASTM, produce la aparición de partículas de gran grosor o protuberancias duras que se adhieren a una superficie sólida y se desplazan por ella. La degradación sucede cuando una superficie sólida se degrada gradualmente debido al movimiento

entre esa superficie y uno o varios elementos que la impactan, provocando una reducción progresiva del material. (American Society for Metals, 1992)

El suceso del desgaste debido a la abrasión ocurre cuando una superficie pierde material a causa de la interacción con partículas de alta dureza, (Figura 6). Estos fragmentos pueden ubicarse o incluso pueden aparecer como partículas separadas en la superficie de otro material. Este tipo particular de deterioro es común en equipos industriales, tales como arados, cuchillas niveladoras, trituradoras y molinos empleados en trabajos con materiales de alta abrasión. “Además, puede surgir cuando partículas de gran peso se introducen de manera involuntaria en los componentes móviles de dicho equipo. Adicionalmente, el desgaste por abrasión hace uso intencional en procesos de maquinaria para eliminar material de manera intencionada”. (Askeland et al., 2012)

**Figura 6**

*Desgaste abrasivo*



*Nota.* “Desgaste por abrasión causado por elementos o partículas abrasivas atrapadas o libres. En la imagen se puede observar el desgaste gradual que produce una partícula en la superficie de un material. Recuperado de” (Askeland et al., 2012)

La manifestación de la abrasión es especialmente sobresaliente en los contextos industriales relacionados con la agricultura, la minería, el procesamiento de minerales, la edificación de infraestructuras y, en esencia, en cualquier situación donde se gestionen tierras,

rocas y minerales. Algunos casos ilustrativos son las maquinarias de trituración y las plataformas para el traslado de materiales. (American Society for Metals, 1992)

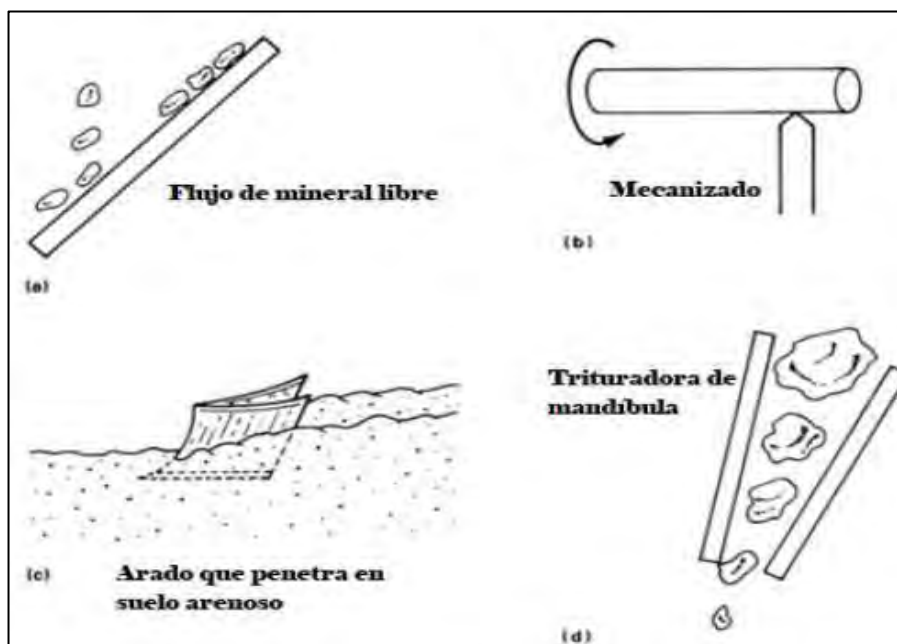
#### 2.4.1.1. Clasificación del desgaste abrasivo.

##### A. Según el tipo de contacto.

Es posible identificar dos clases de declive físico: la degeneración de dos cuerpos y la degeneración de tres. “El primer caso sucede cuando una superficie abrasiva se superpone con otra, siendo una de las superficies que entran en contacto la más resistente. En el segundo contexto, sucede cuando una superficie dura actúa como un tercer elemento, generalmente una pequeña partícula abrasiva situada entre dos superficies, tal como se muestra en la Figura 7. Este fragmento abrasivo posee la dureza suficiente para desgastar una o ambas superficies que se encuentran en contacto”. (Stachowiak, 2005)

**Figura 7**

*Desgaste por abrasión según el tipo de contacto*



*Nota.* “Contactos durante el desgaste abrasivo. a) Dos cuerpos abiertos. b) Dos cuerpos cerrados. c) Tres cuerpos abiertos. d) Tres cuerpos cerrados. Adaptado de” (Stachowiak, 2005)

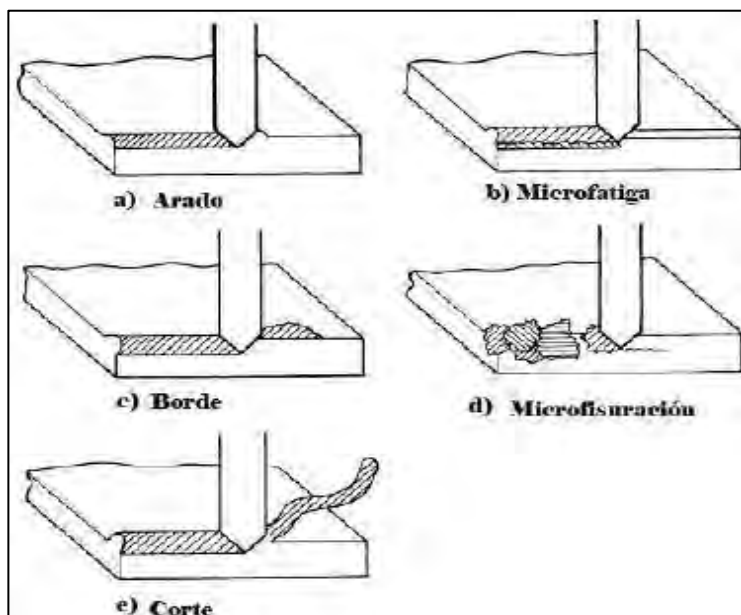
## B. Según el entorno de contacto.

De acuerdo con la situación del contacto, se categoriza en dos grupos: abiertos (o libres) y cerrados (o limitados). “Frecuentemente, las cifras de pérdidas en sistemas cerrados pueden ser más elevadas que las de sistemas abiertos. Esto podría derivarse de que la mayoría de los sistemas cerrados están sometidos a cargas de mayor intensidad”. (Stachowiak, 2005)

La Figura 8 exhibe varios procedimientos potenciales cuando una punta abrasiva se infiltra en una superficie. Estas tareas comprenden labores como el arado, la producción de cuñas, el corte, el microfatiga y la generación de microfisuras.

**Figura 8**

*Mecanismos de desgaste abrasivo según el contorno de contacto*



*Nota.* “Distintos mecanismos de desgaste según el contorno de contacto que se presentan por la presencia de un abrasivo en la superficie de un material. a) Arado, b) Microfatiga, c) Borde, d) Microfisuración, e) Corte. Obtenido de” (American Society for Metals, 1992).

“El arado, tal como se muestra en la (Figura 8.a) conlleva el desplazamiento de material desde una ranura hacia los costados, y se realiza bajo cargas bajas, sin causar una pérdida considerable de material. En cambio, el trabajo en frío causa daños en la superficie cercana debido

a la acumulación de dislocaciones. Si posteriormente esta superficie fría presenta arañazos”, el trabajo adicional podría causar pérdidas a causa de micro fatiga (Figura 8.b). Al alcanzar un nivel de relación adecuado entre la resistencia al cizallamiento de la interfaz de contacto y la resistencia al cizallamiento de la masa (entre 0.5 y 1.0), se ha observado que una punta abrasiva puede generar un borde o cuña (Figura 8.c) en el sector frontal. “En este contexto, la cantidad total de material que se mueve a través de la ranura supera al material que se mueve de manera lateral. Esta forma de cuña representa un tipo de desgaste abrasivo bastante suave. (SALAS, 2024)

El corte es la manifestación más marcada de deterioro en materiales dúctiles (Figura 8.e). En este procedimiento la punta abrasiva logra una viruta de manera similar a la de una máquina de tornear. corte. En consecuencia, se sustrae material, aunque la cantidad desplazada es limitada en relación al tamaño de la ranura. Para partículas abrasivas de gran tamaño, hay un ángulo crucial donde ocurre una transición entre el arado y el corte”. (American Society for Metals, 1992)

#### **2.4.2 Desgaste adhesivo.**

La degradación por adhesión ocurre cuando dos superficies sólidas se entrelazan, usualmente planas, se tocan y experimentan una acción de deslizamiento ya sea con lubricado o sin él. “La adhesión o conexión surge en los puntos de interacción de las anomalías en la interfaz, y estos puntos se mueven al deslizar, lo que puede provocar la caída de una pequeña porción de una superficie y su conexión con la otra superficie.”. (Bhushan, 2013)

#### **2.4.3 Desgaste por fatiga.**

Este proceso de degradación ocurre a causa de los ciclos de carga y descarga que se tornan permanentes y pueden provocar la formación de fisuras, tanto dentro como en la superficie de los materiales. “Con el transcurso del tiempo, tras alcanzar un número crítico de ciclos, estas fisuras pueden causar la fractura de la superficie, ocasionando la formación de fragmentos de gran envergadura que producen hendiduras considerables”. (Bhushan, 2013)



#### **2.4.4 Desgaste por impacto.**

Esta categorización incluye tres formas fundamentales de degradación: la erosión, la cavitación y la percusión. Es posible que la erosión ocurra por el movimiento y flujo de partículas sólidas, además del impacto de gotas líquidas los cuales se originan de la implosión de burbujas en el medio. Por otro lado, la percusión ocurre debido a impactos repetitivos entre objetos sólidos. (Bhushan, 2013)

##### **2.4.4.1 Erosión.**

“La composición de un material puede ser flexible y verse afectada por la erosión provocada por presiones elevadas provocadas un líquido en movimiento. La deformación del metal provoca un endurecimiento superficial a causa del líquido, lo que conduce a una deformación localizada, la creación de fisuras y la pérdida de material”. (Askeland, 2012)

##### **2.4.4.2 Cavitación.**

La cavitación se define como el procedimiento donde se crean de forma reiterada burbujas o cavidades en un fluido, que se expanden y se derrumban de manera abrupta. “El fenómeno de erosión causado por la cavitación ocurre cuando un sólido y un fluido entran en contacto con un sólido las burbujas generadas en el fluido se tornan inestables y se precipitan contra la superficie del sólido. Cuando estas burbujas se derrumban próximas o al contacto con una superficie sólida, su derrumbe sucede de manera asimétrica, lo que ocasiona la generación de un pequeño flujo de líquido dirigido hacia el sólido. (Bhushan, 2013)

#### **2.4.4.3 Percusión.**

La degradación por percusión sucede a través de procesos de desgaste combinados que combinan varios de los procesos siguientes: adhesivo, desgaste superficial y fractura. “La percusión alude a un golpe repetitivo de un objeto sólido, como los martillos de impresión en aplicaciones electromecánicas de alta velocidad y las grandes asperezas en las superficies de un vehículo de gasolina. En la mayoría de los usos prácticos de los equipos, el impacto está relacionado con el movimiento deslizante. Esto implica que la cercanía relativa de las superficies que interactúan tiene elementos normales y tangenciales, lo que se conoce como impacto compartido”. (Bhushan, 2013)

#### **2.5 Recubrimientos duros.**

“El manual de soldadura de la AWS especifica la aplicación de revestimientos duros en superficies, lo que implica la aplicación de una aleación especial sobre un segmento de metal mediante varios métodos de soldadura, con la finalidad de producir una superficie capaz de resistir la abrasión, la temperatura, los impactos y la corrosión, ya sea de manera individual o en grupo”. (Horwitz, 1976)

La utilización de estos materiales se lleva a cabo a través de procesos de fusión durante el proceso de soldadura. El flujo de calor se regula para prevenir la fusión desmedida del material base, lo que podría diluir la capa que se ha depositado. Sin embargo, es vital subrayar que hay un área que se ve impactada por el calor durante el proceso. Cuando se mencionan las capas de soldadura, se alude a estos procedimientos de reconstrucción de engranajes, ejes, matrices y otras partes deterioradas. (Schey, 2002)

### 2.5.1 Material de aporte.

Los electrodos juegan un papel fundamental en la obtención efectiva de los resultados de soldadura, ya que están formados por un núcleo de metal revestido químicamente. “El núcleo se compone de una barra metálica con una específica composición química que cambia dependiendo del tipo de metal al que se lleva a cabo el proceso de soldadura. El metal constituye el fundamento del material de aportación, que se traslada a la pieza en forma de minúsculas gotas al ser impulsado por la fuerza electromagnética producida por el arco eléctrico”. En cambio, el recubrimiento, que envuelve el núcleo del metal, se compone de una combinación con una composición química específica diseñada para cada tipo de electrodo (Soldexa, 2015). La Tabla 4 presenta algunas características de los metales de contribución según AWS-ASTM.

**Tabla 4**

*Metales de aporte y sus respectivas especificaciones AWS – ASTM.*

Metales de aporte.	AWS - ASTM
Soldadura por arco de acero suave con recubrimiento.	A5.1
Soldadura de hierro y acero destinados a soldadura con gas.	A5.2
Electrodos resistentes a la corrosión, con acero al cromo o cromo-níquel.	A5.4
Electrodos de acero de baja aleación para soldadura de arco.	A5.5
Electrodos fabricados con cobre y aleaciones de cobre.	A5.6
Electrodos para procesos de soldadura utilizando cobre y sus aleaciones.	A5.7
Material de aporte destinado a la soldadura fuerte.	A5.8
Electrodos sin recubrimiento hechos de acero resistente a la corrosión al cromo y cromo-níquel.	A5.9
Electrodos diseñados para aplicar recubrimientos superficiales.	A5.13
Electrodos con revestimiento formulado para unir hierro fundido.	A5.15
Electrodos sin recubrimiento utilizados en la soldadura sumergida de acero suave, junto con los fundentes correspondientes.	A5.17
Electrodos sin revestimiento compuestos por aleaciones de magnesio.	A5.19
Electrodos de acero suave con un núcleo de fundente para soldadura de arco.	A5.20

*Nota:* “Obtenido de (American Welding Society- American Society for Testing and Materials), Subcomité de Metales de Aporte”

### 2.5.2 Normas AWS de electrodos para aceros de baja aleación.

De acuerdo a la Figura 9 y 10:

- El símbolo E alude al producto: empleado en la soldadura manual de arco eléctrico.
- Los dos o tres primeros números de un total de 4 o 5 indican la resistencia mínima a la tracción del material, sin la necesidad de un tratamiento térmico adicional tras la soldadura.

E 60XX - Resistencia mínima de tracción de 60,000 lbs/pulg

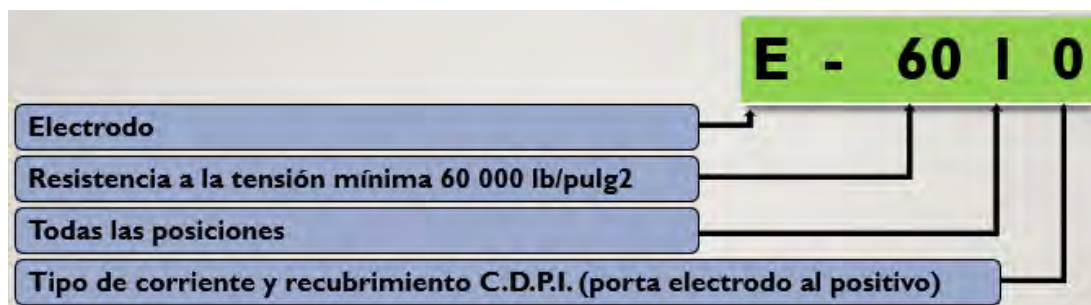
E 110XX - Resistencia mínima de tracción de 110,000 lbs/pulg

El dígito final, estrechamente relacionado con el penúltimo, establece el tipo de corriente y polaridad óptimas para el rendimiento del electrodo. Asimismo, establece el tipo de revestimiento.

El tercer número determina las ubicaciones donde puede utilizarse el electrodo.

**Figura 9**

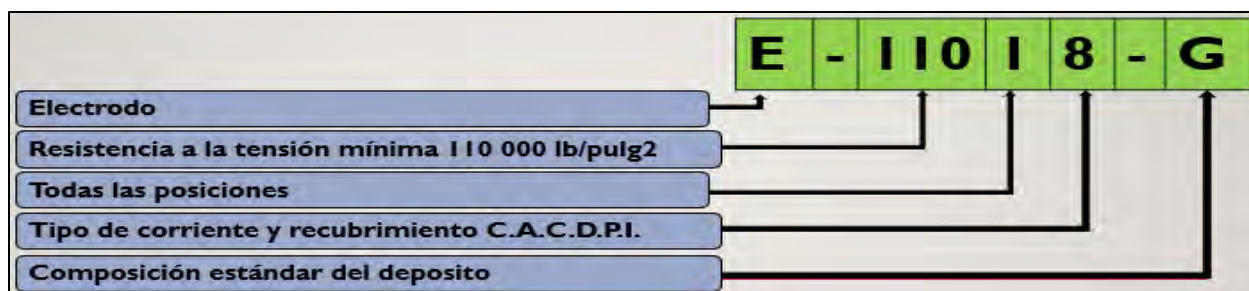
*Denominación de electrodos según la AWS para el proceso SMAW*



Nota: Obtenido del manual de soldadura (soldexa)

**Figura 10**

*Denominación para electrodo de baja aleación*



*Nota:* Obtenido del manual de soldadura (Soldexa)

**Tabla 5**

*Posición del electrodo*

	Posición
1	Toda posición
2	Plano y filete horizontal
3	Solo plana

*Nota.* “Interpretación de la norma AWS para la denominación de electrodos para aceros de baja aleación. Obtenido de (Soldexa, 2015)”

**CA** = Corriente alterna

**CDPI** = Corriente directa polaridad invertida (+)

**CDPD** = Corriente directa polaridad directa (-)

### **NAZCA FORT E11018-G**

- Electrodo para acero de baja aleación
- Revestimiento bajo hidrógeno con hierro en polvo. Color gris
- Toda posición
- Soldadura de aceros con elevada resistencia mecánica (aplicaciones militares)
- Corriente continua, electrodo positivo
- Excelente calidad radiográfica

## Descripción

El E11018-G es un electrodo que contiene un hidrógeno en cantidades bajas, cubierto con hierro en polvo. Posee una alta velocidad de deposición y simplifica el desarrollo de uniones de alta resistencia mecánica. Los depósitos conseguidos son de alta calidad por radiografía.

## Usos

- Este electrodo se ha desarrollado con el propósito de conseguir soldaduras eficientes en aceros de baja aleación y alta resistencia.
- **T1**; también conocido como placa templada, es un acero utilizado en instrumentos que se distingue por su elevada dureza y resistencia frente al desgaste.
- **Cor-Cap**; Es una variedad de acero de elevada resistencia y mínima aleación que brinda una excelente resistencia ante la corrosión por ambiente.
- **Dur-Cap**; Es un acero de alta durabilidad y escasa aleación que se caracteriza por su baja aleación presenta características optimizadas de resistencia a la corrosión.

## Aplicaciones típicas

- Equipos de perforación en minería y petrolera
- Palas mecánicas
- Corazas de molinos
- Chasis de maquinarias
- Aceros SAE 4130, 4140, 4340

## Procedimiento para soldar

Para generar depósitos más eficientes, se necesitará un arco extremadamente corto. La dimensión y el diseño del depósito se regulan mediante el movimiento del electrodo, manteniendo constante la longitud de arco. Una vez realizadas varias pasadas, es necesario retirar la escoria de manera previa.

“Es necesario almacenar los electrodos de manera segura y mantenerlos siempre secos, alejados de la humedad. Esto ocurre porque la humedad deteriora las propiedades del revestimiento del electrodo. Esto podría provocar salpicaduras desmedidas durante el proceso de soldadura. Además, puede provocar debilidad y grietas en la zona soldada. Cualquier electrodo que permanezca expuesto al aire húmedo por más de un periodo de tiempo debe ser precalentado antes de su utilización”. Si no se puede determinar con certeza cuánto tiempo han permanecido en humedad, los electrodos necesitan ser nuevamente secados calentándolos en un horno apropiado. Cuando se secan, es necesario almacenar los electrodos en un contenedor resistente a la humedad o en un horno de mantenimiento.

**Tabla 6**

*Composición química del electrodo E11018-G*

Composición química (típica) del metal depositado:							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0,04%	1,54%	0,32%	0,013%	0,010%	0,30%	1,86%	0,40%

*Nota:* Obtenido de la ficha técnica (Soldexa)

**Tabla 7**

*Características típicas del metal depositado según normas AWS*

<b>Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.5-96)</b>				
<b>Tratamiento térmico</b>	Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía absorbida Ch-v	Requerimientos
	Resistencia a la tracción: 780 MPa	760 MPa		
<b>Sin T. T.</b>	Límite de fluencia: 717 MPa	680 - 760 MPa	42J a -51°C	27J a -51°C
	Alargamiento en 50 mm: 23%	20%		

*Nota:* Obtenido de la ficha técnica (Soldexa)

**Tabla 8**

*Amperajes recomendados para el electrodo E11018-G*

<b>Amperajes recomendados</b>				
Diámetro mm	Longitud	Amperaje		Electrodos
	mm	mín.	máx.	x kg aprox.
2,4	300	80	120	66
3,2	350	100	160	32
4,0	350	160	220	24
4,8	350	200	275	14

*Nota:* Obtenido de la ficha técnica (Soldexa)

## **2.6 El acero.**

El acero es una aleación metálica de hierro y carbono, cuyo porcentaje de carbono puede variar entre el 0.02% y el 2.11%. Adicionalmente, suele contener diversos elementos de aleación como manganeso, cromo, níquel y molibdeno. Sin embargo, es el contenido de carbono el que transforma el hierro en acero. Dentro del mercado, hay variaciones significativas en la composición del acero. “Estas combinaciones de hierro y carbono representan más del 50% de los metales producidos y empleados en nuestro planeta. Al añadir cantidades mínimas de carbono, el



hierro se convierte en acero, lo que proporciona un notable efecto de fortalecimiento intersticial. Se logra un fortalecimiento adicional a través de la inclusión de otros elementos de aleación y mediante un fortalecimiento por cambio de fase, que optimice el rendimiento alotrópico del hierro. Los aceros comprenden una variedad que varía entre aleaciones de hierro bastante básicas, compuestas principalmente por carbono y manganeso, hasta combinaciones mucho más sofisticadas que incluyen múltiples adiciones de elementos de aleación”. (Phillips, 2015)

En términos generales, los aceros pueden clasificarse en cuatro grupos dependiendo de su composición. (AWS, 2004)

### **2.6.1 Aceros al carbono simples.**

Los aceros al carbono sencillos son combinaciones simples de Fe-C que incluyen cantidades mínimas de Mn y Si. Hay circunstancias donde se categorizan según su porcentaje relativo de carbono: contenido bajo de carbono ( $0.03 < C \leq 0,25\%$ ), medio contenido de carbono ( $0,25-0,45\%$ ), alto contenido de carbono ( $>0,45\%$ ).

### **2.6.2 Aceros de baja aleación.**

Los aceros que contienen menos componentes aleados pueden abarcar hasta un 8% en su totalidad, y su contenido de carbono puede ser moderado o reducido. Muchos de estos tipos de acero son sometidos a procesos de temple y revenido para lograr una resistencia elevada.

### **2.6.3 Aceros de alta aleación.**

Principalmente, se emplean aceros altamente aleados en situaciones de altas temperaturas, en las que la solidez y la capacidad para resistir la corrosión son cruciales. Normalmente, se utiliza el cromo como componente de aleación para brindar esta resistencia ante la corrosión. Se clasifican

como aceros inoxidable aquellos aceros de alta aleación que poseen un porcentaje de cromo superior al 12%.

#### **2.6.4 Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA).**

Las aleaciones reducidas en los aceros de alta resistencia contienen una variedad de compuestos. Normalmente, estos aceros poseen un nivel bajo de carbono y obtienen su resistencia mediante técnicas de procesamiento especializadas, como el laminado controlado, o a través de la incorporación de microaleaciones que promueven la creación de granos pequeños y/o reacciones de precipitación.

##### **2.6.4.1 Aceros resistentes a la abrasión.**

En el sector minero y durante la etapa de procesamiento de minerales, la eficacia y la salvaguarda de los equipos se basan en gran parte en la resistencia a la degradación de sus elementos. “Para entender y valorar el proceso de desgaste causado por la abrasión, es crucial entender que implica la eliminación progresiva de partículas de la superficie del acero hasta que el componente se deteriore totalmente”. (Mendoza, 2014)

Para seleccionar el acero adecuado, es necesario considerar los siguientes factores:

- ❖ El método de funcionamiento de las máquinas y el tipo de deterioro.
- ❖ Su ambiente, condiciones secas o húmedas, exposición a sustancias químicas o a temperaturas elevadas.
- ❖ Las propiedades físicas y el grosor del material.

##### **2.6.4.2 Tipos de aceros antiabrasivos.**

Los aceros antiabrasivos pueden clasificarse en tres grupos principales: (Mendoza, 2014)

- ❖ Los aceros bonificados, que fundamentan su resistencia a la abrasión en su elevada dureza.
- ❖ Los aceros al manganeso, que cuentan con una estructura austenítica que se robustece al ser sometidos a impactos fuertes.
- ❖ Los aceros revestidos con revestimientos duros, que suelen tener aplicaciones de soldadura de gran dureza en su superficie para proporcionar resistencia a la corrosión.

**Figura 11.**

*Clasificación de los aceros.*



*Nota:* obtenido de conferencias Soldexa-Arequipa (Captura de ZOOM)

## 2.7 Metalurgia de la soldadura.

Se enfoca en la interrelación entre diversos metales y su respuesta a diversos gases y compuestos se analiza el proceso de descomposición de los gases en metales y otros elementos, así como el efecto de las impurezas presentes. “Durante el proceso de soldadura, la energía térmica presente se relaciona con la movilidad de los átomos. Cuando el metal fundido se enfría, la energía térmica de los átomos en estado líquido se disminuye progresivamente, reduciendo así su

movimiento. Conforme la temperatura continúa descendiendo y el metal se enfría aún más, los átomos pierden su capacidad para moverse y comienzan a interactuar entre sí de diversas maneras, en función de sus propiedades”. (Howard, 1992)

### **2.7.1 La zona de fusión.**

El área de fusión representa el área de un proceso de soldadura por fusión, en la que sucede una fusión completa y resolidificación durante el proceso. “Usualmente se distingue metalográficamente tanto de la ZAC circundante como del metal de base. La composición de la aleación y las circunstancias en las que se endurece establecen la microestructura de la región fundida. Por ejemplo, un nivel de refrigeración más elevado provocará una solidificación más acelerada, lo que producirá una microestructura más fina en el área de fusión. En situaciones de soldadura en las que el metal de aporte tiene una composición distinta a la del metal base, teóricamente podría haber tres zonas distintas. La zona de combinación más amplia es la denominada zona de combinación, que surge de una combinación del metal de aportación con el metal base fundido. Ubicado próximo al límite de fusión, se pueden localizar otras dos áreas. La zona de metal no afectado se compone del metal base fundido y resolidificado, sin una combinación significativa con el metal de aportación. En estas dos áreas se encuentra una zona de transición, donde se produce un gradiente de composición desde el metal inicial hasta el área de combinación. Como se mencionó previamente, esta zona de transición podría ser especialmente relevante en el contexto de una soldadura de metales diversos.” (Phillips, 2015)

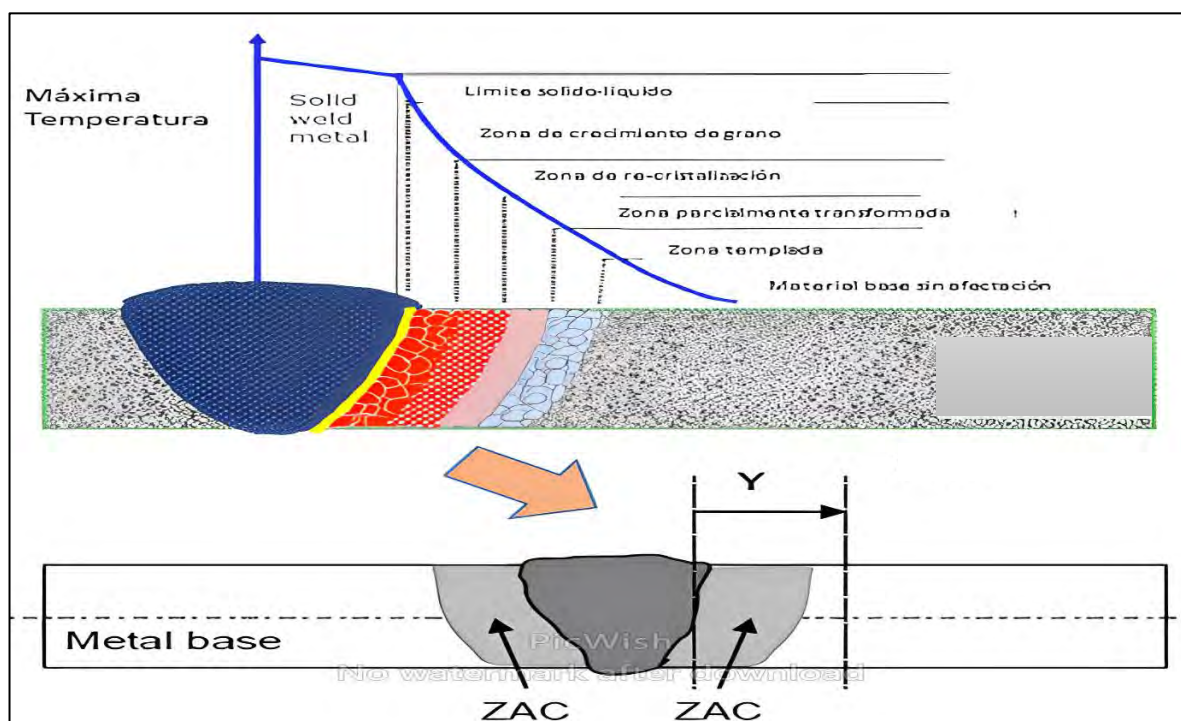
### **2.7.2 Zona afectada por el calor.**

En la ZAC (Figura 12), todas las reacciones metalúrgicas ocurren en una etapa sólida. “El desarrollo microestructural de la ZAC puede ser sumamente complicado, en función del tipo de

aleación, su historial de procesamiento y los componentes térmicos asociados al proceso de soldadura. Las temperaturas de mayor altitud, los ritmos de calor y refrigeración, tendrán un impacto en las reacciones de esta zona, y frecuentemente pueden generar impactos microestructurales en la misma aleación o en el mismo sistema de aleación”.

**Figura 12**

*Regiones de la zona afectada por el calor*



Nota. Denominación de las zonas que se producen durante la soldadura por fusión. Obtenido de (Phillips, 2015)

### 2.7.2.1 Factores que afectan la forma y tamaño de la ZAC.

#### a) Tipo de acero.

Diferentes metales pueden verse afectados por mínimas fluctuaciones de temperatura, mientras que otros muestran una resistencia superior a dichas variaciones. Para los metales endurecidos a través de deformación mecánica, el área que recibe el calor se caracteriza por su

temperatura de reflujo. (Jeffus, 2012), los tipos de acero son: aceros al carbono, aceros aleados, aceros inoxidable.

#### **b) Método de soldadura.**

“Existen fuentes de calor altamente concentradas, como la soldadura de arco de plasma, que produce una zona que se ve afectada por el calor de unas milésimas de pulgada de ancho. En contraposición, la soldadura oxiacetilénica (OFW) proporciona una fuente de calor menos eficaz, lo que conduce a una ZAC significativamente más extensa”. (Jeffus, 2012)

#### **c) Masa de la pieza.**

Conforme aumenta la masa del metal que se va a soldar, su habilidad para absorber calor sin sufrir una variación significativa en la temperatura también se incrementa. Los componentes de soldadura de gran tamaño pueden no experimentar un aumento significativo en la temperatura, mientras que los de menor tamaño pueden alcanzar casi la temperatura de fusión. Cuanto más calor se inyecte al metal, mayor será la zona que será impactada por tal calor. (Jeffus, 2012)

#### **d) Precalentamiento y post-calentamiento.**

Cuando la temperatura del material de base se eleva, ya sea mediante un precalentamiento o durante el proceso de soldadura, la zona impactada por el calor se expandirá. En cambio, una placa fría puede provocar una ZAC extremadamente estrecha. (Jeffus, 2012)

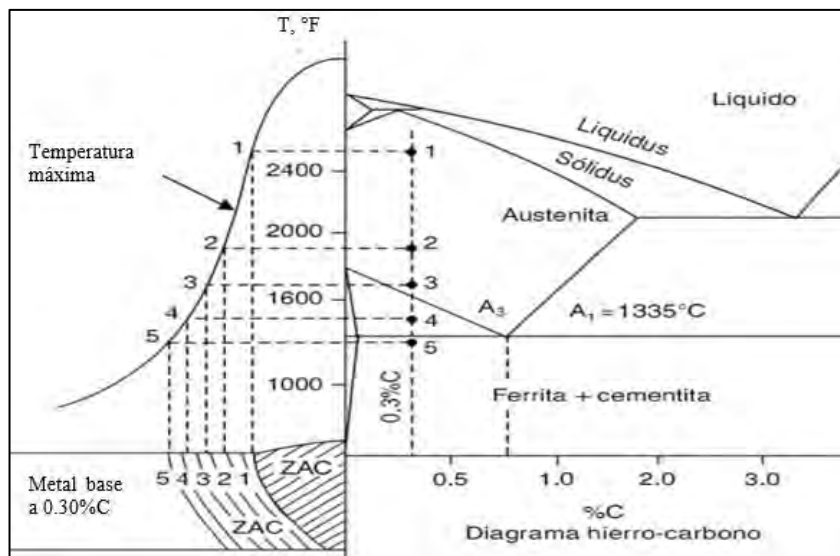
#### **2.7.2.2 Microestructuras de la ZAC en aceros.**

Como muestra la Figura 13, en la región 1 de la (ZAC), que está más próxima a la zona de fusión, se observan temperaturas elevadas durante el periodo de la fase austenita del metal. “En esta área, se producen enormes volúmenes de grano, lo que incrementa la posibilidad de que se logre una conversión en martensita. Esto ocurre porque a medida que los granos se desarrollan, el

paso de la austenita a la ferrita/perlita se demora más, lo que significa que hay más posibilidades de que la austenita se conserve cuando se alcanza la temperatura de inicio de la martensita. Por lo tanto, en la ZAC de gran envergadura, el punto concreto en el esquema CCT del acero en proceso de soldadura se desplaza hacia la derecha, indicando un alto riesgo de aparición de martensita. Esta región, frecuentemente llamada la ZAC de grano grueso, suele ser la más susceptible a la aparición de agrietamiento por hidrógeno”. (Phillips, 2015)

**Figura 13**

*Microestructura de la ZAC en aceros*



*Nota.* “Variaciones habituales de las temperaturas máximas en la zona influenciada por el calor de una soldadura. Obtenido de” (Phillips, 2015)

En la ZAC, las dimensiones del grano se reducen, y la zona que recientemente ha experimentado temperaturas en el rango de la fase austenita (región 3) se denomina ZAC de grano fino. “Dentro del área 4 de la ZAC, encontramos un segmento que ha experimentado temperaturas que varían entre la fase austenita y la fase ferrita. Esta parte de la ZAC podría contener diversas microestructuras, como una potencial mezcla de ferrita, perlita y martensita. Por ejemplo, si se calienta ligeramente por encima de la temperatura eutectoide, cualquier perlita presente en la

microestructura del metal base comenzará a convertirse en austenita. Luego, durante el enfriamiento subsiguiente, esta austenita podría volver a convertirse en perlita fina o en martensita.

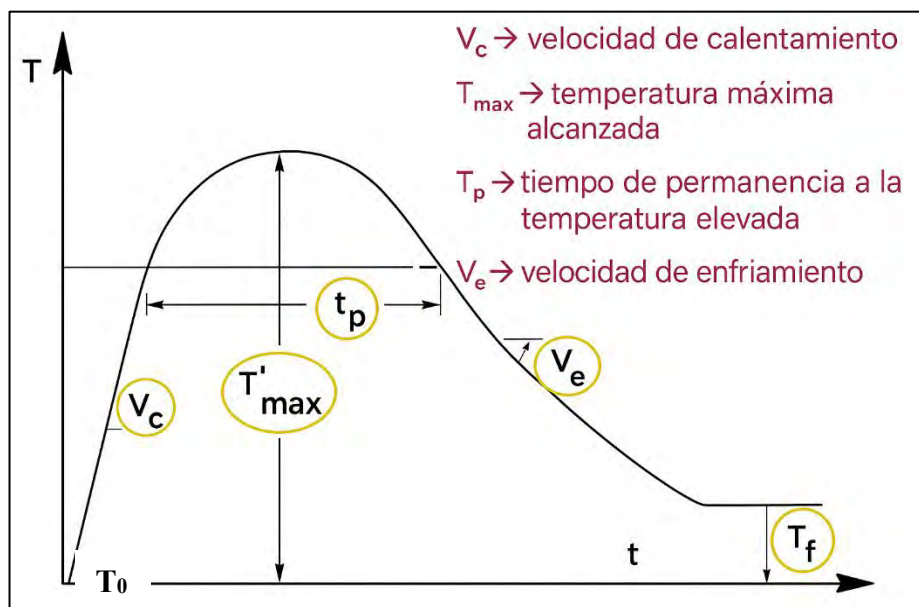
Esta compleja región se conoce comúnmente como ZAC intercrítica, que a veces puede experimentar una significativa reducción de su resistencia debido a las características microestructurales de la martensita”. Esta puede originarse a partir de la porción de la microestructura que previamente se transformó en austenita. (Phillips, 2015)

### 2.7.3 Ciclo Térmico de la Soldadura

El ciclo térmico ejemplifica las variaciones de la temperatura a través del tiempo en un punto del metal base cercano a la soldadura, tal como se ilustra en la Figura N° 14.

**Figura 14.**

*Ciclo térmico de la soldadura*



*Nota:* Ciclo térmico de la soldadura obtenida de (SlidePlayer, 2014)

Los principales parámetros que describen son:

- **Temperatura inicial ( $T_0$ ).** Es la temperatura de partida.



- **Velocidad de calentamiento ( $V_c$ ).** Es la inclinación de la curva durante el ascenso desde  $T_0$ , Normalmente alcanza un nivel muy alto de 300°C por segundo.
- **Temperatura máxima o temperatura pico ( $T_{\text{máx.}}$ ).** Es la temperatura máxima alcanzada en un punto del metal base.

La temperatura máxima señala la probabilidad de que sucedan cambios microestructurales en ese instante. Se basa en las circunstancias de soldadura, en la geometría y características térmicas del componente, su temperatura inicial y la distancia que se debe tener en cuenta a la fuente de energía térmica.

- **Velocidad de enfriamiento ( $V_e$ ).** La rapidez de refrigeración se determina por la pendiente de la curva del ciclo térmico desde una temperatura específica. Este indicador es relevante en la determinación de microestructuras en materiales como los aceros estructurales comunes, que pueden sufrir transformaciones de fase durante el enfriamiento (Fosca, 2007)

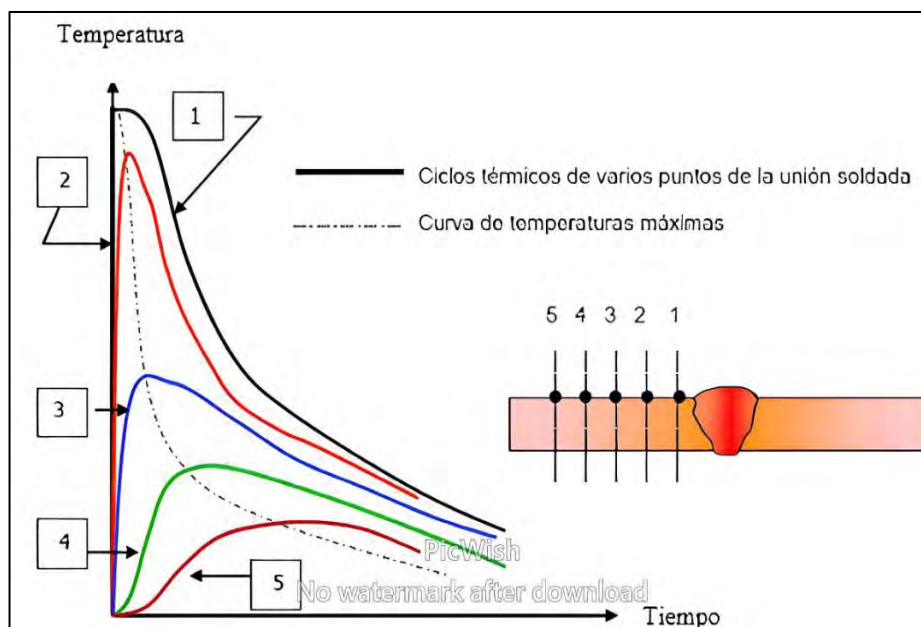
“Es importante destacar que el ciclo térmico es singular para cada punto, debido a la variabilidad térmica presente en el soldeo, originada por la utilización de una fuente de calor. “(García, A 2010). Así pues, cada punto del componente se encuentra bajo un ciclo térmico específico que se basa, entre otros elementos, en la ubicación de este punto en relación con la soldadura.

En cambio, se puede ilustrar la curva de temperatura distancia, basándose en las curvas del ciclo térmico de diversos puntos del metal base, tal como se muestra en la Figura N° 15.

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

**Figura 15**

*Distribución de temperatura del ciclo térmico.*



*Nota:* Distribución de temperatura obtenido de (Fosca, 2007)

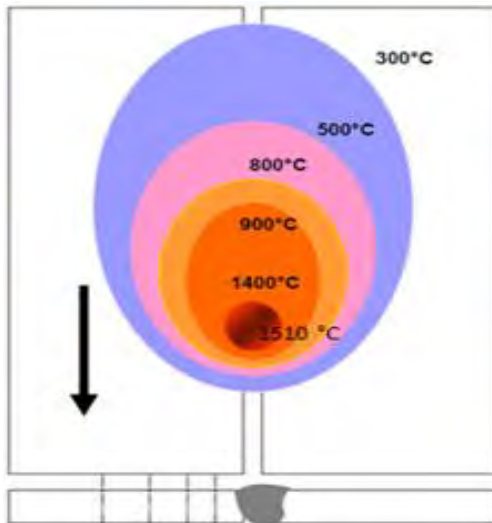
Así pues, estas curvas auténticas de distribución de temperaturas son esenciales dado que simplifican la identificación en un instante concreto de la temperatura en diferentes ubicaciones que está siendo soldado. Si se tiene conocimiento de la temperatura en cada lugar, se puede anticipar qué áreas del metal sufrirán alteraciones microestructurales e incluso calcular el nivel de distorsión al que se vería expuesta la unión debido al calor generado por la soldadura.

La Figura número 16 muestra las curvas isométricas características de la soldadura a tope. La distribución de la temperatura, al igual que las curvas isométricas, se basa en los factores siguientes:

El baño climatizado, que actúa como un recurso de calor más persistente. En esta situación, los elementos a tener en cuenta son la intensidad de la corriente, el voltaje y la velocidad de avance. “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.)” (Fosca, 2007)

**Figura 16**

*Curvas isométricas de una plancha sometida a soldadura a tope.*



Fuente: (Fosca, 2007)

### **2.7.3.1 Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura.**

Los factores que influyen son:

#### **a) Aporte de calor (heat input).**

“La energía proporcionada por un proceso de soldadura al realizar un cordón por unidad de longitud, se muestra en Joules por milímetro (J/mm). Para procedimientos de soldadura por arco eléctrico, se calcula la entrada de calor según la ecuación 1.” (Fosca, 2007)

$$H_{net} = \frac{V \cdot I}{v} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$H_{net}$  = Calor suministrado (j/mm)

$I$  = Intensidad de corriente (A)

$V$  = Tensión eléctrica (V)

$v$  = Velocidad de soldeo (mm/seg)

“La ecuación 1 facilita la determinación de la energía bruta que proporciona la máquina (H). No obstante, una porción de esta se desvanece antes de la soldadura, a causa de procesos de radiación, convección y conducción en el arco y en la pieza” (A. Garcia, 201). “En este contexto, resulta relevante el cálculo de la energía neta proporcionada (Hnet), la cual es el resultado del ingreso térmico bruto por el desempeño del proceso de soldadura, tal como se ilustra en la ecuación 2.” (Fosca, 2007).

$$H_{net} = \frac{V * I}{v} * f \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

f: Eficiencia térmica

La eficiencia térmica de los diferentes procesos se detalla en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Eficiencia térmica de los procesos de arco.*

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

*Nota:* obtenido de (Garcia, 2019)

#### **b) Temperatura inicial de la chapa (o temperatura de precalentamiento)**

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

**c) Geometría de la soldadura.**

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

**d) Características térmicas del material.**

Se vincula con la conductibilidad térmica del material.

- A medida que disminuya la conductividad térmica, la distribución de las temperaturas máximas será más marcada. En resumen, el área impactada térmicamente será más reducida.
- A mayor conductividad térmica del metal, mayor será su rápido enfriamiento tras la soldadura.
- A mayor conductividad térmica, más breve será el tiempo de exposición a temperaturas elevadas.

**e) Diámetro del electrodo.**

- Para un electrodo de mayor diámetro, se necesitará una mayor cantidad de calor para su fusión.
- Este elemento no tiene gran relevancia, pero afecta el tamaño de la fuente de calor.

Finalmente, resulta crucial tener en cuenta que determinados rangos de temperatura provocan cambios microestructurales en el metal que afectan las propiedades mecánicas de la unión soldada. “Normalmente, para los aceros, los procesos metalúrgicos suceden tras ser expuestos a temperaturas que varían entre la temperatura de crítica inferior (723 °C) y la temperatura de fusión (1480°C). Cuando se realiza una soldadura, las zonas del componente que alcancen valores entre los límites previamente establecidos, experimentarán modificaciones significativas en su microestructura y, por ende, en sus propiedades mecánicas”. (Fosca, 2007)

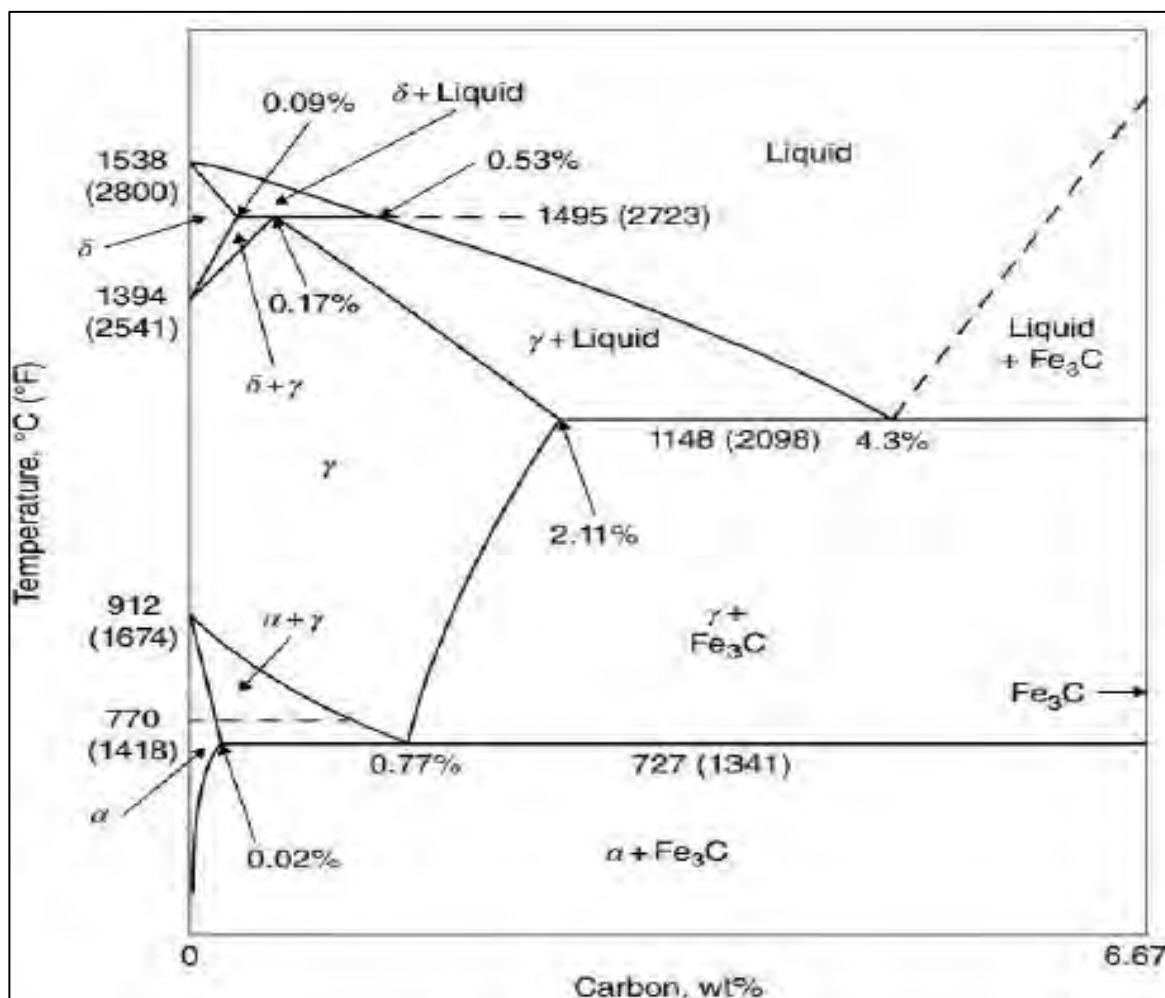
#### 2.7.4 Diagrama hierro – carburo de hierro.

El carbono es el componente de aleación más significativo que influye en la temperatura donde suceden las transformaciones alotrópicas del hierro. “La Figura 17 muestra el segmento significativo del sistema de aleación Fe-C. Este está formado entre el Fe puro y un compuesto intersticial llamado carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), que posee un 6.67% de carbono en su peso. Por lo tanto, esta sección se denomina diagrama de equilibrio Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  Este esquema ilustra condiciones metaestables, ya que se considera al  $\text{Fe}_3\text{C}$  como una fase metaestable”. (Avner, 1974).

En la parte izquierda de este diagrama, se pueden diferenciar las tres fases del hierro. La fase delta ( $\delta$ ) de ferrita cúbica orientada hacia el cuerpo (BCC). “El paso de la fase ( $\gamma$ ) austenita de estructura cúbica centrada en la cara (FCC) a la fase alfa ( $\alpha$ ) de ferrita en estructura BCC a una temperatura inferior se produce a una temperatura más baja”. El espectro de austenínica se expande notablemente hacia la derecha, lo que sugiere que tiene la capacidad de disolver una cantidad considerable de carbono (hasta un 2.11%). “En cambio, el porcentaje máximo de carbono que la fase alfa puede disolver es únicamente del 0.02% Considerando que la mayoría de los aceros poseen más del 0.02% de carbono, esto implica que durante el proceso de enfriamiento desde la austenita en equilibrio, el carbono que supera el 0.02% sobrepasará el límite de solubilidad de la ferrita y provocará la creación de cementita”. (Phillips, 2015)

Figura 17

Diagrama hierro-carbono



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

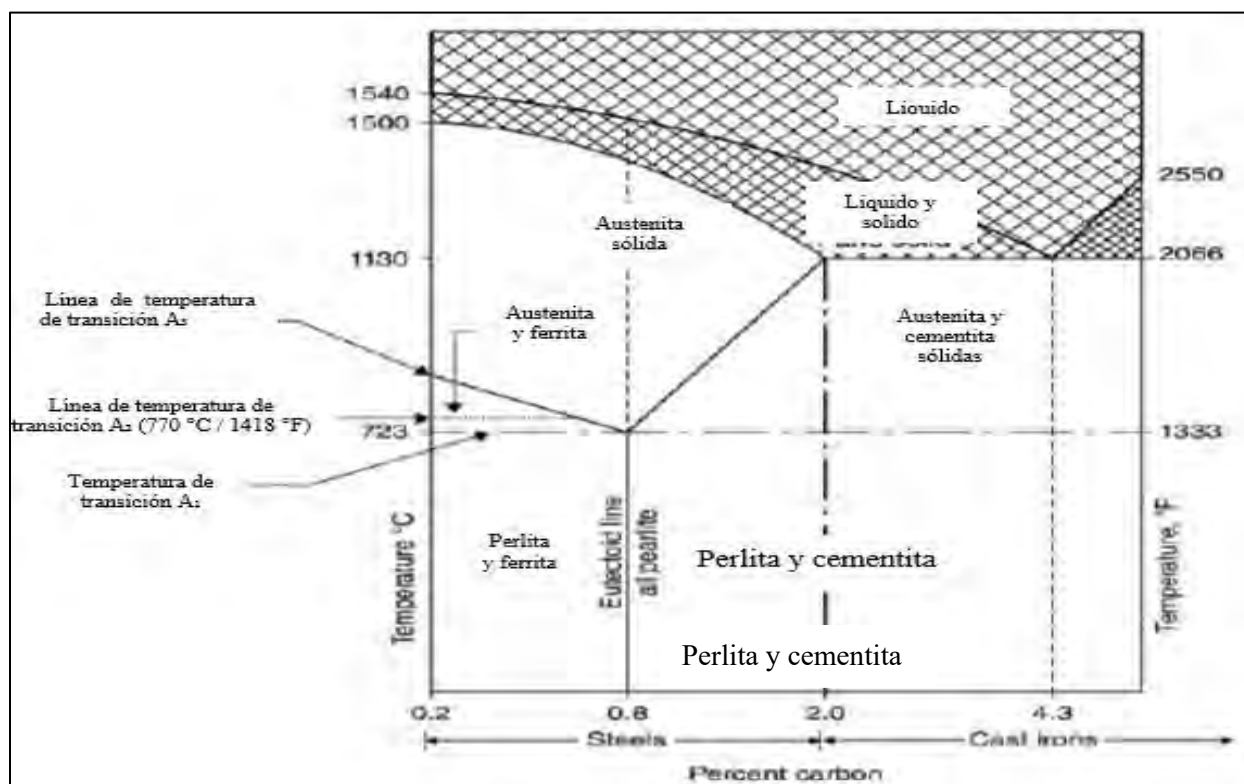
Según la velocidad de enfriamiento desde la austenita, el cementita tiene la capacidad de tomar varias formas. “Si el proceso de enfriamiento es excesivamente lento, se prevé la formación de partículas de cementita de forma redondeada dispersas en una matriz de ferrita. Cuando la velocidad de enfriamiento es lo bastante rápida para provocar condiciones de desbalance, usualmente se presenta una estructura estratificada denominada perlita. Esta está formada por finas capas de  $\text{Fe}_3\text{C}$  y ferrita, generados al enfriar la austenita. Las temperaturas de refrigeración

elevadas desde la temperatura de austenización pueden causar transformaciones conocidas como martensita y bainita”. (Phillips, 2015)

Para destacar la prevalencia de la perlita, un componente comúnmente presente en los aceros durante el proceso de refrigeración desde la austenita, se emplea una alteración del esquema de hierro carburo de hierro, tal como se muestra en la Figura 18. “Este esquema ofrece datos adicionales significativos sobre la producción y soldadura de aceros. Desde la temperatura A3, empieza a producirse la ferrita a partir de la austenita. Si se sigue refrigerando hasta llegar a la temperatura A1, la austenita que queda se convertirá en perlita”. (Phillips, 2015)

**Figura 18**

*Diagrama de hierro-carburo de hierro simplificado*



*Nota.* “Adaptación y simplificación del diagrama hierro-carburo de hierro para destacar la prevalencia de la perlita. Extraído de” (Phillips, 2015)



“Para aceros cuyo contenido de carbono excede el de la composición eutectoide, en el proceso de refrigeración desde la austenita, la etapa inicial que se presentará será el cementita. Si la temperatura alcanza el nivel eutectoide, la austenita residual se transformará en perlita. Esto producirá una microestructura compuesta por la perlita y el cementita primario”. Estos aceros con una elevada concentración de carbono son conocidos como hipereutectoides. La probabilidad de producir perlita y ferrita en la ZAC durante el proceso de soldadura se incrementa al soldar aceros con contenido reducido de carbono y aleación baja, especialmente en métodos de soldadura con alta carga térmica que generan velocidades de enfriamiento más bajas. “Para aceros particulares, si las velocidades de refrigeración son relativamente altas, podría no existir el tiempo necesario para que los átomos de austenita se reorganicen y formen ferrita y perlita. Esto podría resultar en la formación de una BCT (estructura tetragonal centrada en el cuerpo), denominada martensita, que es una estructura BCC elevada a causa de un proceso de cizallamiento provocado por el exceso de carbono. Para aceros particulares, si las velocidades de enfriamiento son relativamente altas, podría no existir el tiempo necesario para que los átomos de austenita se reorganicen y formen ferrita y perlita. Esto podría resultar en la formación de una BCT (estructura tetragonal centrada en el cuerpo), denominada martensita. Esta es una estructura BCC que se ha estrado a causa de un proceso de cizallamiento provocado por el exceso de carbono”. (Phillips, 2015)

#### **2.7.5 Soldabilidad.**

“La AWS (Sociedad Americana de Soldadura) define la soldabilidad como la capacidad de un material para ser soldado en una estructura determinada y adecuadamente diseñada, logrando eficazmente su objetivo establecido durante su periodo de servicio.” (Horwitz, 1976).

Al evaluar la habilidad para soldar cualquier tipo de acero, es crucial tener en cuenta dos factores clave: la capacidad para soldar durante la producción y la capacidad para soldar en situaciones de servicio. “El primero se enfoca primordialmente en los retos asociados a la formación de fisuras durante el proceso de soldadura y el tratamiento térmico posterior, mientras que la segunda trata posibles inconvenientes que puedan presentarse una vez finalizada la soldadura, incluyendo la resistencia de la ZAC de la soldadura y su resistencia a la corrosión”. (Ccommittee., 1994)

#### **2.7.5.1 Soldabilidad para la fabricación.**

“Los elementos vinculados a la soldabilidad tratan temas vinculados a la aparición de fisuras en una soldadura, especialmente en la Zona afectada por el calor de gran magnitud. Las dos clases de fisuras más relevantes son las provocadas por la existencia de hidrógeno y las que surgen del tratamiento térmico posterior a la soldadura”. (Ccommittee., 1994)

#### **2.7.5.2 Soldabilidad para el servicio.**

Es complicado anticipar la tenacidad de la ZAC a partir del CE, dado que dicha tenacidad puede ser influenciada por elementos de composición relativamente menores que no se incluyen en la CE. “Esto es particularmente relevante en los aceros HSLA conocido como acero micro aleado, donde se efectúan mínimas adiciones de Nb, V, Ti, B, N, entre otros. para desarrollar la resistencia y la tenacidad tanto en el metal base como en la ZAC. Las limitaciones en el desarrollo del grano y la existencia de más fracciones de ferrita acicular son preferibles en comparación con los productos de transformación de baja temperatura. No obstante, es necesario considerar los factores compositivos para valorar correctamente la tenacidad”. (Ccommittee., 1994)

Los elementos que inciden en la propensión al agrietamiento asistido con hidrógeno:

- La estructura del acero y, en consecuencia, su habilidad para endurecerse.
- La existencia de humedad (hidrógeno) en el proceso de soldadura, en la cobertura del electrodo y en el entorno alrededor.
- La presencia de tensiones expuestas o aplicadas. El agrietamiento inducido por tratamientos térmicos posteriores al procedimiento de soldadura está relacionado con los procesos de precipitación que ocurren en la ZAC de grano grueso, así como con la presencia de ciertos elementos indeseados en el acero.

### **2.7.6 Carbono Equivalente.**

El carbono equivalente es un instrumento utilizado en la soldadura, con la finalidad de anticipar propiedades del acero como la templabilidad, la tendencia a la formación de grietas por hidrogeno, “además de la resistencia del acero y la templabilidad de la ZAC. Se utiliza en los materiales ferrosos para determinar las distintas propiedades del acero si se incluyen otros elementos de aleación, además del carbono”. El valor de equivalencia del carbono señala la tendencia de la soldadura a producir martensita al enfriarse y a sufrir una fractura delicada. Cuando la CE es menor a 0.40, no se necesita un precalentamiento.

- Cuando la CE esta entre 0.40 – 0.60, puede ser necesario precalentar la soldadura.
- Cuando la CE es superior a 0.60, el precalentamiento es necesario.

Los niveles elevados de C y otros metales aleados suelen incrementar la dureza del acero y, en consecuencia, reducir la capacidad de soldadura. Cuanto más alto es el contenido de carbono, más sencillo es que el acero se endurezca; y a medida que el material se vuelve más grueso, la velocidad de enfriamiento aumenta.

### 2.7.6.1 Normas de carbono equivalente.

Varias fórmulas de CE han sido desarrolladas, no obstante, las dos más empleadas son las que la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), Ecuación (3) y el Instituto Internacional de Soldadura (IIW), Ecuación (4) han reconocido.

$$CE = \%C + \frac{\%P}{2} + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr + \%V}{5} + \frac{\%Ni}{1} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

“CE: Carbono equivalente, C: Carbono, P: Fosforo, Mn: Manganeso, Mo: Molibdeno, Cr: Cromo, V: Vanadio y Ni: Níquel”

$$CE_{iiw} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo + \%Cr + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

“CE: Carbono equivalente, C: Carbono, Mn: Manganeso, Cu: Cobre. Mo: Molibdeno. Cr: Cromo y V: Vanadio”

Otras fórmulas han surgido; la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Soldadura adoptó la medida del metal crítico (Pcm) para el riesgo de agrietamiento en la soldadura. La Ecuación (5), es comúnmente empleada en los aceros contemporáneos.

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

Donde:

“Pcm: Parámetro crítico del metal, C: Carbono, Si: Silicio, Mn: Manganeso, Cu: Cobre, Mo: Molibdeno, Ni: Níquel, Cr: Cromo, V: Vanadio y B: Boro”.

### 2.7.6.2 Diagrama de Graville.

Es un instrumento utilizado para determinar si se requiere el uso de precalentamiento o tratamientos térmicos después de la soldadura, basándose en aspectos relacionados con la composición química en vez del grosor del material. “Según el lugar de referencia del equivalente de carbono en la región, se determina el procedimiento o técnica a emplear. En el esquema de Graville, es posible reconocer tres áreas diferentes en la Figura 19”. (Ingemecánica., 2015)

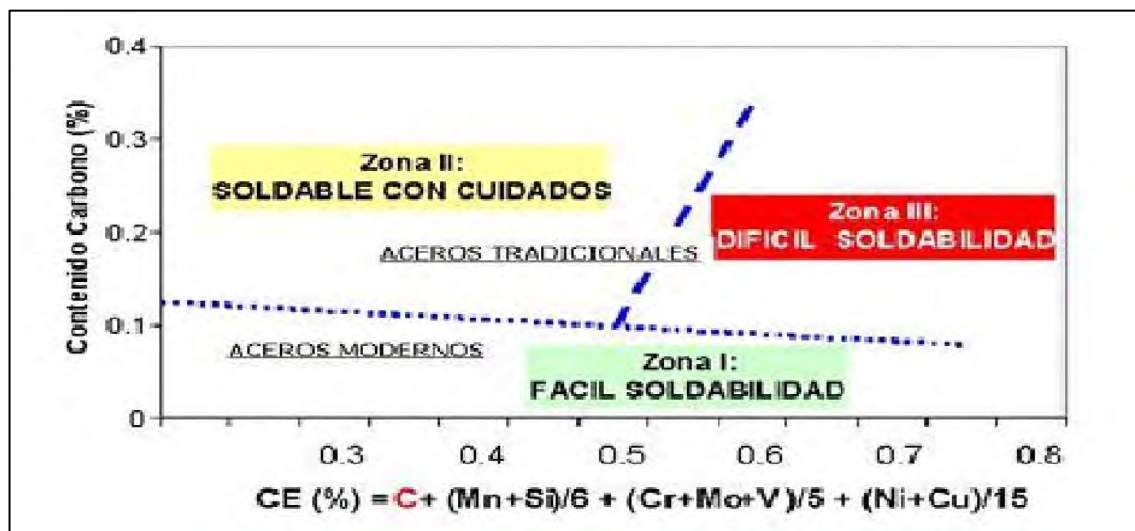
**Zona I:** Los aceros con un contenido reducido de carbono y un endurecimiento reducido no suelen presentar fisuras, pero esto puede suceder si existe una elevada concentración de hidrógeno.

**Zona II.** Productos con un alto contenido de carbono y un bajo endurecimiento. Para evitar la formación de fisuras en la ZAC, se puede reducir el peligro modificando la velocidad de enfriamiento, controlando el calor proporcionado y, en menor medida, utilizando un precalentamiento.

**Zona III.** Los aceros que poseen un elevado contenido de carbono y un elevado nivel de endurecimiento pueden crear microestructuras susceptibles a la formación de fisuras en diferentes condiciones de las uniones soldadas.

**Figura 19**

*Zonas que indica los grados de soldabilidad*



*Nota: (Asta, 2006)*

## 2.7.7 Defectos metalúrgicos.

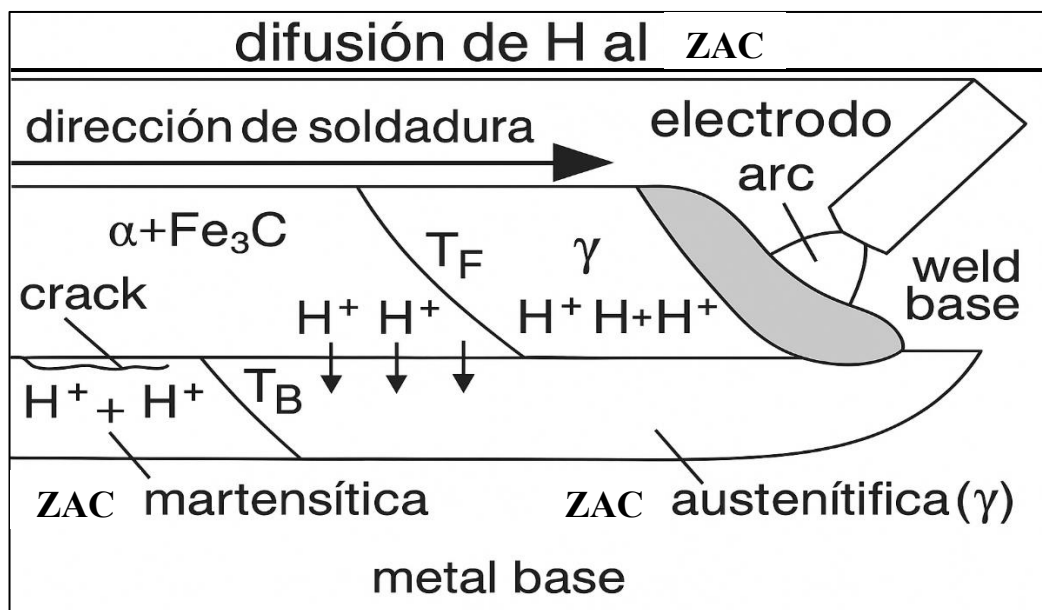
### 2.7.7.1 Difusión de hidrógeno.

El agrietamiento por hidrógeno sucede cuando simultáneamente se presentan los siguientes cuatro factores: existencia de hidrógeno en la soldadura, elevadas tensiones de tracción, microestructura propensa (martensita) y temperatura relativamente baja (entre -100 y 200 °C).

Las fisuras en frío surgen a causa de la disolución del hidrógeno en el metal de soldadura y su absorción posterior en la ZAC. “Estas fisuras se producen de manera significativa tras que el material de soldadura se haya solidificado totalmente. Estas fisuras suelen aparecer con más regularidad en los granos más grandes de la ZAC, situados precisamente debajo de la zona de fusión.” (Jeffus, 2012)

**Figura 20**

*Difusión de hidrógeno del metal de soldadura a la ZAC en la soldadura.*



*Nota:* “Difusión del hidrógeno desde la zona de fusión hacia la ZAC durante el proceso de soldadura. Extraído de” (Kou, 2002)

El gráfico 20 ilustra cómo el hidrógeno se desplaza desde el metal de soldadura hasta la ZAC durante el procedimiento de soldadura. “Los términos  $T_F$  y  $T_B$  representan las temperaturas de transformación de la austenita a (ferrita + perlita) y de la austenita a martensita, respectivamente. Conforme el metal de soldadura cambia de austenita a ferrita y perlita ( $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ ), generalmente se traslada el hidrógeno de la austenita a la ferrita y perlita, dado que la ferrita tiene una capacidad de solución más baja para el hidrógeno en comparación con la austenita. Es fundamental considerar que generalmente el metal de soldadura tiene un contenido de carbono inferior al del metal base, ya que el material de aporte suele tener un contenido de carbono inferior al del metal base. Por lo tanto, el metal de soldadura puede realizar el paso de la austenita a la ferrita y perlita antes de que la ZAC transforme la austenita en martensita como consecuencia. Esto

provoca la acumulación de hidrógeno en la ferrita del metal para soldar, lo que lleva a su difusión hacia la austenita en la ZAC próxima al límite de fusión.” (Kou, 2002)

En los materiales de ferrita, el hidrógeno generalmente se propaga con mayor rapidez que en los austeníticos, y este alto coeficiente de difusión en la ferrita facilita el proceso de propagación del hidrógeno “Además, el coeficiente de difusión del hidrógeno en la austenita es significativamente menor, lo que disminuye la transferencia del hidrógeno desde la ZAC al metal base antes de que la austenita en la ZAC se transforme en martensita. Esta combinación de hidrógeno y martensita en la ZAC crea circunstancias propicias para la aparición de fisuras de hidrógeno”. (Kou, 2002)

#### **2.7.7.2 Grietas calientes.**

Las grietas surgen cuando el metal se rompe en las orillas de los granos de soldadura que aún no han logrado una solidificación total. En contraste con las fisuras provocadas por la presencia de hidrógeno, estas están localizadas en el núcleo del conjunto soldado. “En el proceso de enfriamiento, se expulsan los materiales con un punto de fusión inferior en el metal de soldadura a medida que los granos se solidifican en una estructura de columna. Esto provoca una acumulación significativa de estos materiales de bajo punto de fusión justo en el punto donde los granos se cruzan en el corazón del proceso. Estos bordes parcialmente fundidos y delicados experimentan tensiones cuando el metal de soldadura se contrae, causando así su fractura”. (Jeffus, 2012)

“A menudo, el sulfuro presente en el acero es el principal causante de las fisuras. Esto causa la producción de sulfuro de hierro, con un bajo punto de fusión, en las fronteras de los granos. Las fisuras térmicas suelen aparecer más a menudo en aceros con un elevado contenido de carbono



y fósforo, así como en aceros con niveles significativos de sulfuro y pocos niveles de manganeso”. (Jeffus, 2012)

### **2.7.7.3 Precipitación de carburo.**

La existencia de cromo libre en la formulación química de los aceros inoxidable se manifiesta en su resistencia frente a la corrosión. “No obstante, cuando se incorpora carbono y el acero se somete a temperaturas que varían entre 427°C y 816°C, el carbono se une al cromo, creando un carburo de cromo en las fronteras de los granos de acero. El proceso de elaboración de carburos de cromo (CCr) finaliza con el cromo libre necesario para la protección contra la corrosión. Por lo tanto, en los aceros inoxidable, se busca de forma activa la utilización de aceros con contenido reducido de carbono o grados especiales con estabilización para soldadura, con la finalidad de preservar su resistencia a la corrosión.” (Jeffus, 2012)

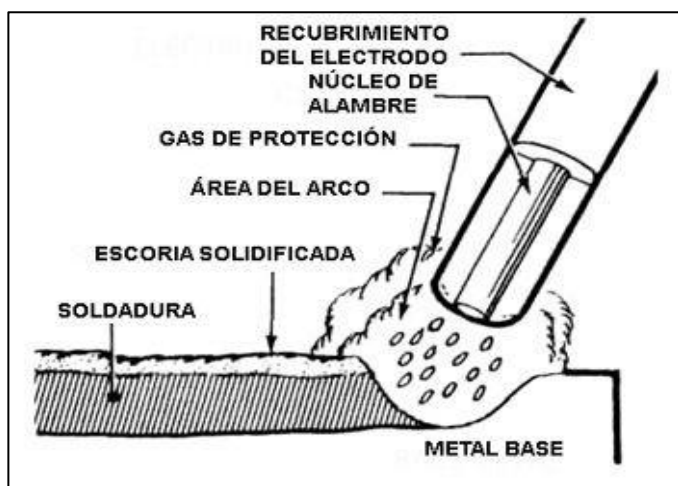
## **2.8 Proceso de Soldadura por Arco de Metal Protegido (SMAW)**

El método de soldadura por arco con electrodo revestido implica la conexión a través del calor producido por el arco entre el extremo de un electrodo y la superficie del material a unir. “El electrodo está formado por el núcleo central de una barra de metal robusto, revestida con un material especialmente estirado y moldeado para garantizar su resistencia y eficiencia de la soldadura. La barra conductora del núcleo juega un papel crucial al orientar la corriente eléctrica hacia el arco, suministrando metal como elemento imprescindible para la unión. Las funciones primordiales del revestimiento del electrodo son la estabilización del arco eléctrico y la protección del metal fundido de la atmósfera circundante mediante la generación de gases de protección cuando el revestimiento se deteriora a causa del calor intenso generado por el arco eléctrico.

La protección gaseosa, generada de manera automática por el revestimiento del núcleo, ejerce un control crucial sobre las diversas características mecánicas, la compleja composición química y la detallada microestructura del metal depositado durante el proceso de producción. La estructura del recubrimiento del electrodo puede cambiar en función de la variedad de tipos de electrodos existentes en el mercado.

### Figura 21

#### *La soldadura por arco de metal protegido*



Nota “Representación gráfica del proceso de soldadura con electrodo revestido. Tomado de (Phillips, 2015)”

“Los defectos en las soldaduras efectuadas con SMAW también pueden ser notablemente altos, incluyendo elementos como porosidad, fusión parcial, atrapamiento de escoria y una configuración inadecuada del cordón. Estos fallos suelen presentarse con mayor frecuencia en los momentos de interrupción y reinicio del proceso, lo que implica que las soldaduras que han experimentado múltiples pausas y renovaciones son más propensas a mostrar imperfecciones. En la mayoría de las situaciones, se requiere eliminar la escoria tras finalizar la soldadura”. (Phillips, 2015)

### 2.8.1 Principio de Funcionamiento

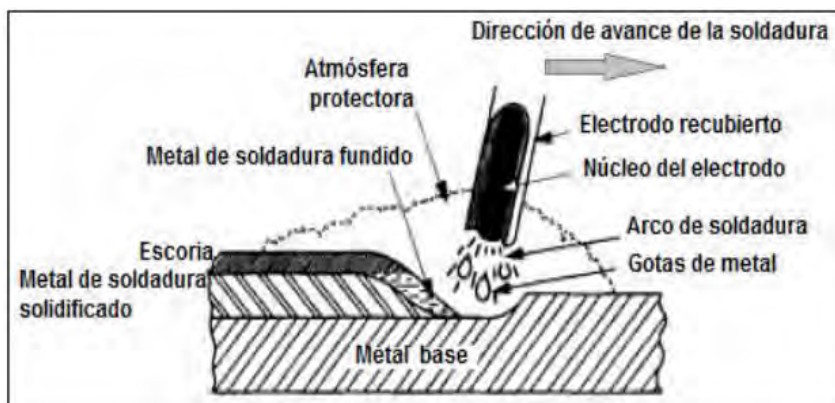
La soldadura por arco de metal protegido se fundamenta en el uso del potente calor producido por el arco eléctrico para conseguir la fusión del metal base y la punta de un electrodo de consumo que está revestido de un material protector. Este procedimiento es esencial para la conexión de componentes metálicos en múltiples usos industriales. La ilustración gráfica de la figura número 22 ilustra minuciosamente un complejo circuito eléctrico donde tanto el electrodo como la base de metal son elementos esenciales para el funcionamiento adecuado del sistema correspondiente. “Este intrincado circuito eléctrico comienza en la potente fuente de energía eléctrica e incluye los complejos cables de soldadura, un porta-electrodo confortable, una conexión directa con el elemento laboral y un electrodo revestido de alta tecnología”. Uno de los dos conductores eléctricos de la fuente de energía se conecta de manera directa con la pieza de trabajo, mientras que el otro conductor se conecta de forma segura con el porta - electrodo. (kesverchile, 2014).

El procedimiento de soldadura comienza al producir y sostener un arco eléctrico de alta temperatura entre la punta del electrodo y el componente de trabajo escogido. “El alto nivel de temperatura generado por el arco eléctrico funde tanto la extremidad del electrodo como la superficial de la base de trabajo, lo que simplifica la conexión de los componentes”. La inmediata formación de pequeños glóbulos de metal fundido en el extremo final o final del electrodo implica la generación de minúsculas partículas del metal auxiliar.

Una representación de este tipo de soldadura se observa en la figura 22.

**Figura 22**

*Soldadura por arco con electrodo revestido*



Nota: Obtenido de (kesverchile, 2014)

El procedimiento demanda la corriente eléctrica necesaria para unir el metal de aporte con el metal de base. El nivel de temperatura logrado supera la temperatura de fusión del metal.

## 2.8.2 Ventajas y Desventajas del Proceso

“Uno de los métodos de unión más utilizados en diversas industrias es la soldadura por arco de metal protegido, conocida por su eficacia y versatilidad. Este proceso es ampliamente empleado en numerosas aplicaciones, tales como la fabricación, reparación y construcción en diferentes entornos laborales”.

### **Ventajas**

- El equipo de soldadura se caracteriza por su simplicidad, bajo costo y portabilidad.
- El metal de contribución y las disposiciones de protección durante el proceso de soldadura se derivan del electrodo revestido en sí mismo. No se requiere resguardo suplementario a través de gases auxiliares o fondos granulares.

- Los procesos de arco protegidos por gases presentan una mayor sensibilidad frente al viento y las corrientes de aire. no obstante, resulta crucial que el procedimiento se implemente siempre en un espacio resguardado de los fenómenos de la naturaleza.
- Se emplea en cualquier punto de ubicación, incluso en situaciones con restricciones espaciales. No es necesario conducciones de agua de refrigeración, tuberías o recipientes de vapores de blindaje, lo que permite su uso en ubicaciones relativamente distantes de la fuente de energía.
- Se puede emplear con un extenso espectro de espesores, que combinados superan los 2 mm.
- Casi la totalidad de los metales y sus aleaciones demuestran compatibilidad.

### **Desventajas**

- Dado el bajo índice de deposición y la necesidad de extracción de la escoria, este procedimiento se caracteriza por su lentitud y ha sido sustituido por otros métodos para determinadas aplicaciones.
- Requerir una competencia notable por parte del soldador.
- Dado el elevado calor del arco, su aplicación es inapropiada para metales como el plomo, el estaño y el cinc, los cuales poseen un punto de fusión reducido. Dado que su resguardo no es adecuado para prevenir la contaminación por el oxígeno, no es aplicable en metales como el tántalo, niobio y titanio, que presentan una alta susceptibilidad a la oxidación.
- Es inaplicable a espesores que no superen los 2 mm.
- La tasa de deposición es inferior en comparación con los procedimientos que emplean electrodos continuos, tales como el soldado MIG/MAG o el soldado con alambre tubular. Esta

circunstancia es atribuible a que el electrodo es utilizado únicamente a una longitud mínima de aproximadamente 5 cm.

- A pesar de que, en teoría, es factible soldar cualquier espesor superior a 1,5 mm, el procedimiento resulta ineficaz para espesores que superan los 38 mm. (Society, 2008)

**Tabla 10.**

*Cuadro comparativo de las ventajas y desventajas de la soldadura SMAW*

Ventajas	Desventajas
El equipo de soldeo es relativamente sencillo, no muy caro y portátil	Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición, y por la necesidad de retirar la escoria
El metal de aportación y los medios para su protección durante el soldeo proceden del propio electrodo revestido	Requiere gran habilidad por parte del soldador
No se necesita protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares	No es aplicable a metales con bajo punto de fusión, como plomo, estaño, zinc, y sus aleaciones, debido a que el intenso de calor del arco es excesivo para ello
Es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa.	No es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el titanio o tantalio, ya que la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura.
Se puede emplear en cualquier posición, incluso con restricciones de espacio	El proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 milímetros, serán más adecuados los procesos SAW Y FCAW
No requiere conducciones de agua de refrigeración	
Puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de corriente.	
Es aplicable para una gran variedad de espesores.	
Es aplicable a mayor de los metales y aleaciones de uso normal.	

*Nota:* Obtenido de (Marin, 2024)

### 2.8.3 Características del Arco

“El arco representa una descarga eléctrica que se propaga mediante el plasma, un gas ionizado, entre un electrodo y el componente. En el caso de que el arco persista, se transmite una

corriente eléctrica en el mismo, lo que genera la liberación del calor y radiación electromagnética. Como se indicó previamente, la exposición al calor incrementa las temperaturas y propicia la fusión del electrodo y de la pieza en contacto con el arco”. La región interna del arco se denomina plasma, mientras que la región externa se denomina llama.

El arco se compone de dos áreas concéntricas: la zona interior, denominada plasma, y la zona exterior, denominada llama. El primer componente se encarga de la exportación de la corriente y se compone de los siguientes elementos:

- Los electrones portadores de mayor parte de la corriente se desplazan del polo negativo (cátodo) al positivo (ánodo).
- Los metales fundidos, en su mayoría son procedentes del electrodo.
- Escorias.
- Vapores no metálicos y metálicos.
- Moléculas y átomos gaseosos, ionizados algunos de ellos.

La otra parte que se transporta la corriente por los iones metálicos y los átomos es a través del arco.

Los electrones, partículas cargadas negativamente, son sometidas a una aceleración considerable debido al campo eléctrico presente entre el cátodo y el ánodo, lo que provoca que colisionen de forma brusca con estos electrodos, generando así una conversión de su energía cinética en calor de manera abrupta. Por otro lado, es importante destacar que los iones metálicos presentan un comportamiento que opera en una dirección opuesta a los iones no metálicos. Estos iones interactúan de manera activa con el cátodo, generando un impacto significativo en el sistema y provocando simultáneamente un aumento considerable en la temperatura del mismo. Además,

es importante destacar que en el interior del plasma altamente energético que se originan colisiones frecuentes entre las partículas cargadas que se desplazan en direcciones opuestas, lo cual, como resultado, genera una emisión considerable de energía térmica y una radiación de intensidad extraordinariamente alta.

La intensa liberación de calor es el reflejo de la alta energía cinética que las diminutas partículas adquieren en el seno de la plasma, la cual experimenta un notable aumento gracias a la influencia de la corriente eléctrica y el potencial eléctrico que fluye a través del arco. “El calor generalmente se genera en el sistema cuando la partícula experimenta una desaceleración significativa debido a la colisión o al impacto con otro objeto, lo que nos lleva a identificar claramente tres áreas de producción de calor según la predominancia de una u otra causa de la desaceleración: el cátodo, el plasma y el ánodo. En la segunda etapa del proceso, las colisiones altamente energéticas entre iones, electrones y otras partículas subatómicas son las responsables de producir la emisión de calor más significativa y relevante en este contexto. En la última etapa del proceso, se puede apreciar claramente el impacto significativo de los electrones de alta velocidad, los cuales, al moverse a una velocidad considerable, logran transformar su energía cinética considerable en calor de manera eficiente”. En la primera etapa, la influencia principal radica en la interacción de los iones positivos presentes en el entorno, de cierta manera contribuye durante el proceso de emisión de electrones, este fenómeno se caracteriza por un desprendimiento de calor específico significativo.

“La región exterior del arco, denominada llama, se caracteriza por ser más fría que el de plasma circundante, y generalmente compuesto por átomos creados a partir de las complejas interacciones de las moléculas gaseosas presentes en el entorno. Estos átomos, al interactuar con la superficie de la columna del plasma, pueden disociarse o desprenderse de ella, ya sea en forma



disociada”. En la llama, se reagrupan para formar moléculas y liberar la energía absorbida durante la disociación, en forma de calor y radiación.

## **2.8.4 Variables de Soldeo del Proceso SMAW**

### **A. Diámetro del electrodo**

Es imperativo seleccionar el diámetro más amplio que satisfaga las demandas de transferencia de calor y facilite su utilización. La elección del diámetro del electrodo se encuentra condicionada por factores como la ubicación geográfica, el grosor del material y el tipo de unión.

“Los electrodos de diámetro mayor son preferidos en la soldadura de materiales de considerable espesor y en la soldadura en posición plana, debido a la elevada tasa de deposición”.

“Además, en el proceso de soldadura de múltiples pasos, se recomienda efectuar el cordón de raíz utilizando un electrodo de diámetro reducido. Para asegurar una penetración óptima del arco al fondo de la unión, se utilizarán electrodos de mayor diámetro para finalizar la unión”.

“La transmisión térmica está intrínsecamente vinculada con la intensidad, la tensión del arco y la velocidad de desplazamiento, factores que están directamente vinculados al diámetro del electrodo. Este aumento se intensifica conforme se incrementa el diámetro del electrodo”. En aplicaciones o materiales que requieran una transferencia de calor reducida, es imperativo usar electrodos de diámetro reducido.

Por tanto, se deberán emplear:

Los electrodos de diámetro reducido se utilizan en labores de punteado, unión de componentes de poco espesor, primeras pasadas, soldadura en posición de cornisa, vertical y bajo techo, además de en circunstancias que necesitan un aporte de energía térmica limitado. Los

electrodos de diámetros más grandes se utilizan para unir componentes de espesores de gran y mediano tamaño. La aplicación de grandes diámetros puede derivar en un cordón de soldadura desmedido, superfluo y oneroso desde una perspectiva económica, y también puede actuar como un acumulador de tensiones debido a un perfil inadecuado. (Montes, 2021)

## **B. Intensidad de corriente**

Cada electrodo, en función de su diámetro, presenta un espectro de intensidades susceptibles de aplicación. En ningún caso se deben aplicar intensidades superiores, dado que podrían resultar en lesiones como proyecciones, mordeduras, intensificación del soplo magnético e incluso fisuras.

La corriente ideal depende del diámetro del electrodo y puede estimarse con:

$$I = k \times D \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

I: Intensidad de corriente (A)

D: Diámetro del electrodo (mm)

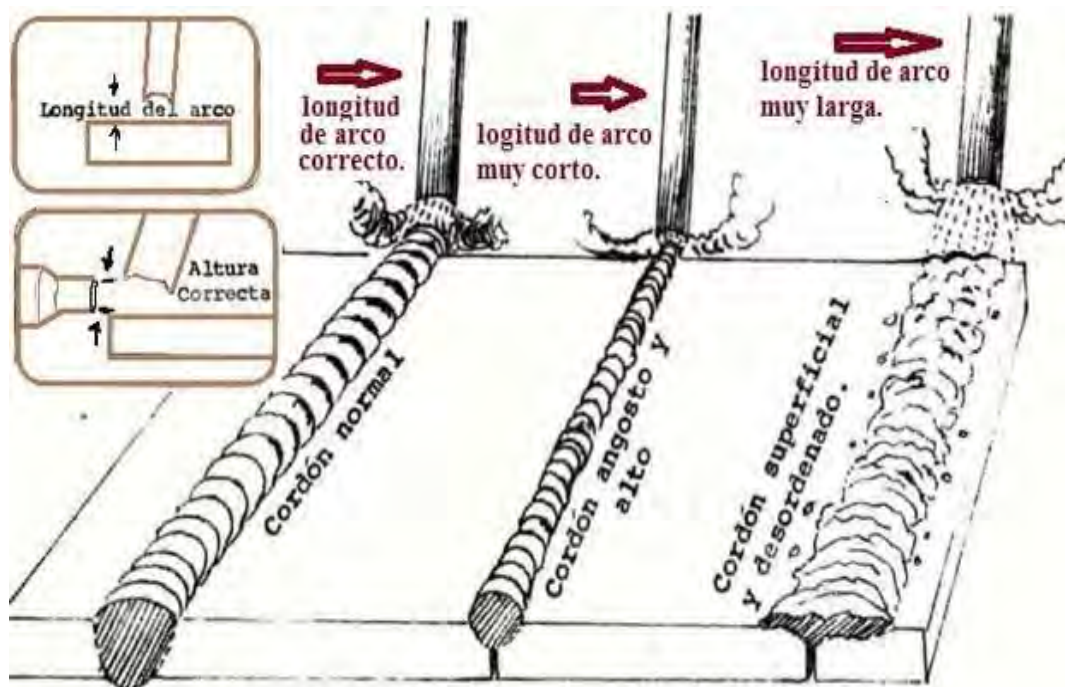
k: Constante del tipo de electrodo

## **C. Longitud de arco**

Esta variable de longitud de arco implementar se encuentra determinada por el tipo de electrodo, diámetro, localización de la soldadura y la intensidad requerida. “En términos generales, debe corresponder al diámetro del electrodo, a menos que se utilice el electrodo básico, que debe ser equivalente a la mitad de su tamaño. En caso de una velocidad insuficiente, se producen mordedura, se complica la extracción de la escoria y se fomenta la acumulación de gases, lo que resulta en la generación de poros”. (Paredes, 2023)

**Figura 23**

*Influencia de la longitud de arco en la representación, ancho y penetración de cordón de soldadura*



*Nota:* Obtenido de talleres de exposición de Soldexa- Arequipa

“A medida que se incrementa la velocidad de soldadura, el cordón experimenta un acortamiento y se intensifica su penetración hasta un punto específico donde los incrementos en la velocidad conducen a una disminución en la penetración, dado que el calor añadido es insuficiente para lograr una penetración más extensa. Este fenómeno también incide en la dilución, y si deseamos minimizarla, como durante el recargue de un electrodo revestido, la velocidad debe ser disminuida”. Es fundamental considerar que la velocidad de soldadura incide en el calor suministrado a la unión mediante la velocidad de enfriamiento, lo que repercute directamente en su estructura metalúrgica final y, por ende, en sus propiedades mecánicas finales (durezas, impacto, carga y rotura).

La longitud de arco se calcula por la ecuación 7.

$$d = \frac{V}{I \times R} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

- (d) Distancia del arco (mm)
- (V) Voltaje de soldadura (v)
- (I) Corriente de soldadura. (A)
- (R) Resistencia del circuito. ( $\Omega$ )

#### **D. Velocidad de soldeo**

La variable de velocidad de desplazamiento, también conocida como velocidad de recorrido, representa la premura con que el electrodo se desplaza en el momento de la unión. La velocidad apropiada es aquella que genera una banda de soldadura y la apariencia adecuada. Diversos factores influyen en la determinación de la velocidad apropiada. Dentro de estos elementos, se pueden destacar los siguientes:

- Posición de la soldadura.
- Tipo de corriente de soldadura, amperaje y polaridad.
- Espesor del material.
- Tipo de unión.
- Rapidez de fusión del electrodo
- Condición de la superficie del metal base.
- Manipulación del electrodo

En el proceso de soldadura, la velocidad del recorrido debe ser ajustada de tal manera que el arco se sitúe ligeramente delante del charco de la soldadura.

Durante el desarrollo de la soldadura, resulta fundamental realizar un ajuste preciso de la velocidad de desplazamiento, de manera que el arco eléctrico se posiciona estratégicamente unos milímetros antes de la zona donde se funde el material y se forma el charco de soldadura. “Un incremento significativo en la velocidad de desplazamiento puede resultar en una disminución notable de la capacidad de penetración, lo cual puede ocasionar un deterioro considerable en la integridad de la superficie de la banda y favorecer la aparición de un fenómeno de socavamiento en las zonas adyacentes a la soldadura”. (Rodriguez L. &., 2022)

La velocidad de soldeo se puede calcular mediante la Ecuación 8:

$$v = \frac{L}{t} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

v: Velocidad de soldeo (mm/s)

L: Longitud total del cordón (mm)

t: Tiempo de soldadura (s)

### **2.8.5 Tensión del arco.**

El voltaje que se encuentra en el electrodo previo a la creación del arco se denomina voltaje. “En el circuito abierto, su valor fluctúa entre 50 V y 80 V. Cuanto mayor sea este voltaje, más alto será el voltaje en el circuito abierto, la creación de un arco es más fácil. No obstante, también incrementa el riesgo de experimentar una descarga de electricidad”. (Jeffus, 2012)

“Las tensiones operativas del arco suelen ubicarse en un rango de 10 a 40 V. estas tensiones del arco están principalmente relacionadas con las longitudes del mismo. Longitudes de arco más largas generan tensiones del arco más elevadas, mientras que arcos más cortos resultan tensiones más bajas”. (Phillips, 2015)

### 2.8.6 Intensidad de corriente.

“El amperaje (A) regula el tamaño del arco al indicar la cantidad total de electrones que circulan”. (Jeffus, 2012)

Este elemento se transforma en una señal directa de la temperatura producida en el arco eléctrico. Conforme la corriente aumenta, también lo hace la temperatura. “Si no se emplea la corriente adecuada, se termina funcionando en un intervalo de temperaturas incorrecto. Si no se alcanza la temperatura perfecta, el resultado de la soldadura puede ser magnífico, pero la penetración será insuficiente. Por otro lado, si se emplea una corriente excesiva, se producirá una temperatura superior a la ideal, lo que conducirá a una soldadura defectuosa con aparición de porosidad, fisuras y salpicaduras de metal fundido”. (Rodriguez P. M., 2018)

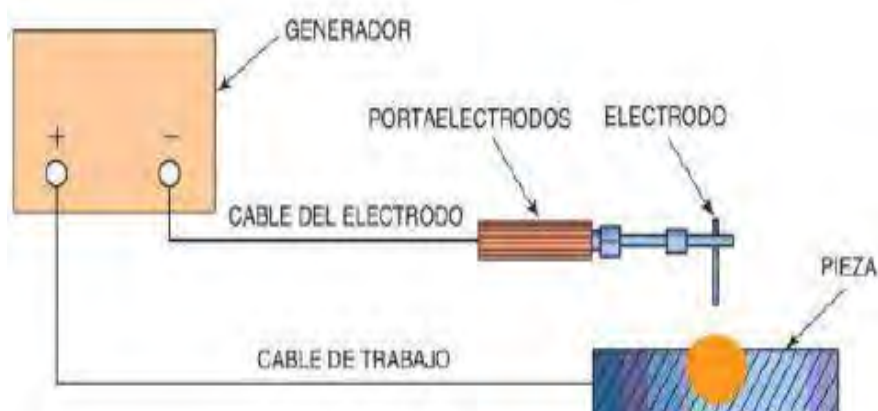
### 2.8.7 Corrientes de la soldadura

#### 2.8.7.1 Corriente continua

##### A. Corriente continua de electrodo negativo (DCEN).

**Figura 24**

*Corriente continua de electrodo negativo, polaridad directa*



*Nota. Tomado de (Jeffus, 2012)*

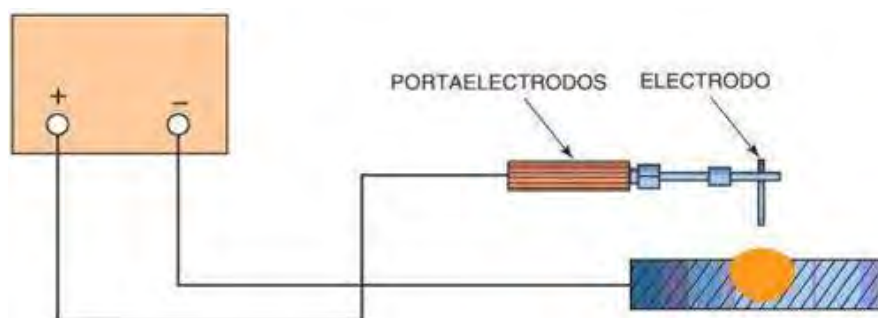
En la soldadura de arco, la corriente continua de electrodo negativo (DCEN) se produce cuando el electrodo es negativo y la pieza metálica es positiva (Figura 24). Los electrones se desplazan desde el electrodo de soldadura, cruzan el arco y alcanzan el componente final. (Jeffus, 2012)

### B. Corriente continua de electrodo positivo.

“Se denomina corriente continua de electrodo positivo (DCEP) si el electrodo es positivo en relación a la pieza. Los resultados logrados a través de la DCEP poseen características superiores que las otras corrientes” como se muestra en la figura 25. (Jeffus, 2012)

**Figura 25**

*Corriente continua de electrodo positivo, polaridad inversa*



*Nota. Tomado de (Jeffus, 2012)*

#### 2.8.7.2 Corriente alterna.

En la figura 26 se muestra la intensidad y tensión de las corrientes que circulan a través de los circuitos de corriente son variables o no son inmutables, así que experimentan variaciones en el transcurso del tiempo.

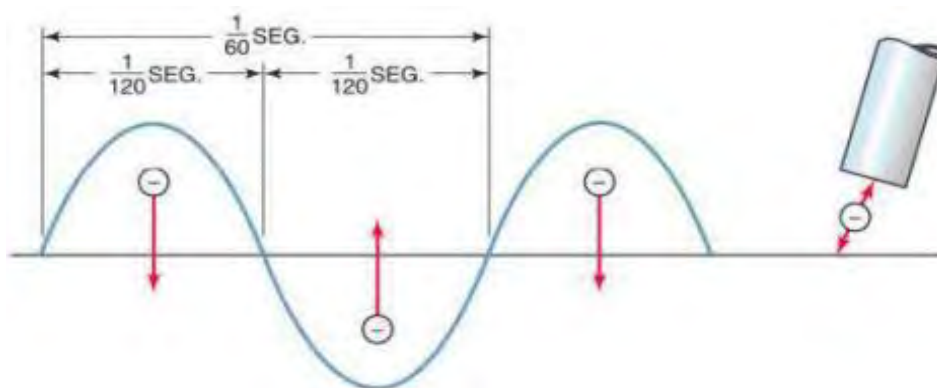
Lo básico de que las corrientes son variables a través del tiempo altera su dirección de manera periódica y es identificada como corriente alterna (CA). Las nociones previamente

formuladas para las corrientes continuas pueden ser transferidas a los circuitos de corriente alterna.

(Rodríguez P. M., 2018)

**Figura 26**

*Corriente alterna*



*Nota:* Obtenido de (Rodríguez, 2018)

**Tabla 11**

*Comparación entre Corriente continua y alterna*

Parámetros	Corriente Continua	Corriente Alterna
Soldeo con electrodos de diámetros pequeños que necesitan baja intensidad Soldeo a distancias largos	La operación resulta más fácil	Preferible
Cebado de arco	Resulta más fácil	Dificultad en el encendido del arco, se puede deteriorar el material
Soplo magnético	Puede resultar problemas con materiales ferromagnéticos.	No se presentan problemas
Mantenimiento de arco	Fácil por la mayor estabilidad	Mas difícil, excepto cuando se emplean electrodos de diámetro pequeño.
Tipo de electrodo	Se emplea cualquier tipo de electrodo.	Se utilizan algunos tipos de electrodos.
Espesor de la pinza	Preferentemente con espesores delgados.	Se prefieren para espesores gruesos ya que se usan electrodos gruesos.
Posiciones de soldeo	Preferentemente en posiciones verticales y bajo techo.	Se usan en cualquier posición, pero con electrodos adecuados

*Nota:* “Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I (2014)”

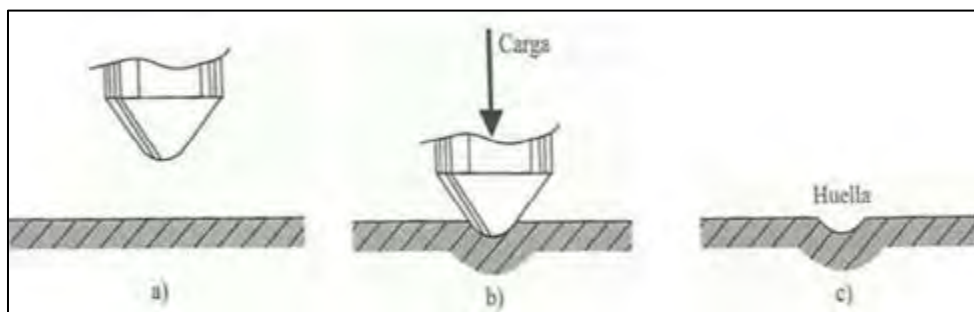


## 2.9 Dureza

La dureza (H) simboliza la capacidad o el grado de resistencia que un material puede presentar frente a la deformación, lo que se vincula con su límite de elasticidad. “Esta característica se mide a través de pruebas de dureza, que pueden variar en su naturaleza. El estudio de Mohs es uno de los métodos cualitativos más antiguos, estableciendo una escala de dureza basada en la capacidad de un cuerpo para resistir la rasguña de otro material. A pesar de ser beneficioso en mineralogía, no es efectivo en materiales metálicos, en entornos industriales, se emplean técnicas cuantitativas, en particular pruebas de penetración”. Estos conllevan la aplicación de una carga regulada mediante un penetrador en la superficie del material, generando así una marca o huella. (Guemes & Martin, 2012)

**Figura 27**

*Ensayo de dureza mediante un penetrador*



*Nota.* “a) En un ensayo de dureza mediante penetración. b) Se aplica una carga sobre la superficie de la pieza. c) Se analiza el tamaño de la huella. Extraído de” (Guemes & Martin, 2012)

En las pruebas de dureza, se establece el tamaño que deja la huella del penetrador con medidas específicas bajo una carga específica. Con base en estas cifras, se determina un valor de dureza. “Los materiales suaves generarán huellas de mayor tamaño y valores de dureza reducidos, en cambio, los materiales sólidos generarán huellas de menor tamaño y valores de dureza

superiores. Es crucial elegir una carga apropiada dependiendo de la dureza del material”. (Guemes & Martin, 2012)

### **2.9.1 Escalas de dureza.**

#### **A. Método Brinell.**

Se utiliza una bola como penetrador, hecha de metal duradero (un sinterizado de carburos metálicos, predominantemente de wolframio) y con un diámetro ( $D$ ). El diámetro de la huella se establece ( $d$ ), que se conserva en la superficie después de aplicar una carga ( $F$ ) y luego se extrae. La dureza Brinell (HBW) se relaciona con la carga de prueba que se reparte por el área de la superficie curvada de la placa. Se asume que la huella es un segmento esférico que coincide con el penetrador de la misma medida, y su diámetro se establece en la superficie de la muestra. (Guemes & Martin, 2012)

Este método es extremadamente perfeccionado, ya que engloba una extensa gama de durezas en diversos materiales, y en ciertas circunstancias puede presentar una formación casi directa con la resistencia del material. Sin embargo, también cuenta con limitaciones. “Solo se considera válido el ensayo si hay una correlación entre el diámetro de la huella y el diámetro de la esfera penetradora de 0.24 a 0.6”. (Guemes & Martin, 2012)

#### **B. Método Vickers**

En este procedimiento de evaluación, se ejerce una presión sobre la superficie del material mediante un penetrador de diamante de forma de una pirámide recta con base cuadrada y un ángulo previamente establecido entre sus caras contrarias. “Luego, se retira la carga y se determinan las longitudes de la dureza Vickers (HV). Este vínculo está vinculado con la relación alcanzada al

dividir la carga aplicada entre el área de las caras inclinadas de la impresión, considerando que esta se parece a una pirámide recta con base cuadrada y el mismo ángulo en el vértice que el penetrador”. (Guemes & Martin, 2012)

### **C. Método Rockwell.**

En el método de ensayo Rockwell, se aplica presión a la superficie de la muestra mediante el uso de un penetrador (que puede ser un cono de diamante, una bola de acero o metal resistente). Esta presión se ejerce en dos fases consecutivas: en primer lugar, se impone una carga inicial  $F_0$  y después se añade una carga extra  $F_1$  que se elimina más adelante, tal como se ilustra en la Figura 28. Después, se cuantifica el incremento en la profundidad de la impresión,  $h$ , a causa de la aplicación de la segunda carga tras la retirada y el mantenimiento de la primera. Basándonos en el valor de  $h$  y las dos variables constantes,  $N$  y  $S$ . (Guemes & Martin, 2012),

La dureza se calcula utilizando la Ecuación (9):

$$HR = N - \frac{h}{s} \quad \text{Ec.9}$$

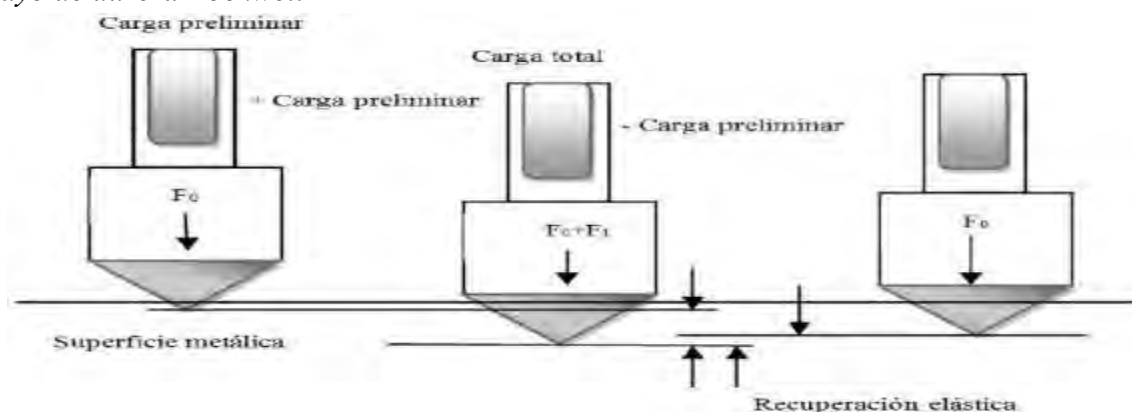
Donde:

HR: Dureza Rockwell.

$N$ ,  $S$ : Constantes.

$h$ : incremento de la profundidad de la huella (mm)

La escala Rockwell C es muy empleada, al igual que la escala Rockwell B. “En esta situación, se establece una carga inicial de 10 kgf y posteriormente se añade una carga adicional de 140 kgf. Como ejemplo, un valor de 42 HRC simboliza una medida de dureza Rockwell correspondiente a 42”. (Guemes & Martin, 2012)

**Figura 28***Ensayo de dureza Rockwell*

*Nota:* “Representación gráfica del procedimiento de ensayo de dureza Rockwell. Recuperado de” (Guemes & Martin, 2012)

En otras escalas, se añade una S o una W a la designación, dependiendo de si se utiliza una bola de metal duro o de acero como penetrador. “En estas escalas, la escala Rockwell B emplea una bola de metal resistente de 1/16 pulgadas de diámetro, aplicando una carga total de 100 kgf (10 kgf al comienzo y posteriormente aumentos hasta llegar a 90kgf). Por ejemplo, si alcanzas un valor de 85 HRB en la prueba, significa que el material tiene una dureza de 85 según la escala B y se utilizó un penetrador hecho de metal duradero”. (Guemes & Martin, 2012)

En la práctica, entre las dos escalas más empleadas, la escala C es la más adecuada para materiales con durezas que exceden los 20 HRC. Si el material tiene una dureza inferior a 20 HRC, se debe aplicar la escala B. “La elección de la escala adecuada se fundamenta en el estudio de la dureza del material que se está analizando. Si no se tiene conocimiento, se presupone que el material es duradero y se mide en HRC; si el valor es inferior a 20 HRC, se utiliza la escala HRB para llevar a cabo la medición”. (Guemes & Martin, 2012)

**Tabla 12**

*Fórmulas para calcular la dureza Rockwell basada en escala utilizada.*

ESCALA	HR
HRA, HRC, HRD	$HR = 100 - \frac{h}{0.002}$
HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK	$HR = 130 - \frac{h}{0.002}$
HRN, HRT	$HR = 100 - \frac{h}{0.001}$

*Nota:* “Distintas escalas para abordar diversas necesidades. Las diferencias entre estas escalas radican en el tipo de penetrador empleado, la carga total aplicada, el rango de medición aceptable y la fórmula utilizada. Adaptado de” (Guemes & Martin, 2012)

## **Capítulo III:**

### **Hipótesis y Variables**

#### **3.1 Hipótesis**

##### **3.1.1 Hipótesis general**

La recuperación responde a las solicitudes requeridas en el acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271 mediante el proceso de soldadura SMAW.

##### **3.1.2 Hipótesis específica**

- La intensidad de corriente utilizada en el proceso de soldadura SMAW afecta directamente la calidad del cordón de soldadura, logrando la recuperación adecuada del acero AISI 4145.
- La velocidad de soldeo durante la recuperación del acero AISI 4145 determina la homogeneidad y la resistencia de la zona recuperada del alojamiento eje pivot.
- La longitud del arco influye en la estabilidad del proceso de soldadura y en las propiedades mecánicas finales del acero AISI 4145 recuperado.

#### **3.2 Variables**

##### **3.2.1 Identificación de variables**

###### **3.2.1.1 Variables dependientes de soldeo**

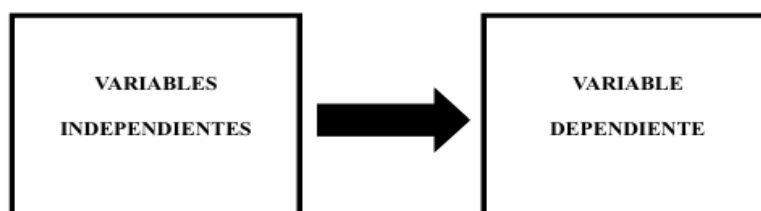
- Recuperación del acero AISI 4145 utilizada como alojamientos eje pivot

### 3.2.1.2 Variables independientes soldeo

- Longitud de arco.
- Velocidad de avance.
- Intensidad de corriente.

**Figura 29**

*Identificación de variables*



*Nota:* Adaptado de: Hernández & Mendoza (2018).

### 3.2.2 Operacionalización de Variables

Según Hernández & Mendoza (2018), “La operacionalización de variables es el procedimiento de transformar una idea teórica en conceptos tangibles y cuantificables que pueden ser observados y examinados en un estudio. Este procedimiento requiere determinar el concepto de forma exacta en términos operativos y seleccionar los indicadores y métodos de medición adecuados para valorar la variable. Involucra la utilización de una matriz que simplifica la identificación y estructuración de los procedimientos empleados para medir y examinar las variables en una investigación, y simplifica la recopilación de datos e interpretación de los hallazgos, lo cual aporta a la validez y confiabilidad del análisis”. En la sección 13. El marco de este estudio sobre la recuperación de alojamientos para los equipos Pit Viper-271 a través de revestimientos Nazca Fort E11018-M aplicados a través del proceso SMAW en aceros AISI 4145, esta matriz facilita la identificación de las variables independientes y la variable dependiente.

**Tabla 13** Operacionalización de variables

	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Unidades	Instrumentos
Dependiente		Deposición de material de aporte, el tiempo del proceso para obtener dimensiones finales en una pieza metálica desgastada.	Recuperación	Recuperación total.	mm	calibre vernier
<b>Recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamientos del eje pivot de la perforadora PIT VIPER-271</b>	La recuperación es un proceso de evaluación, reparación y refuerzo de estructuras de metal. La identificación precisa del daño, la selección de materiales adecuados, el uso de técnicas de soldadura y protección contra la corrosión avanzadas. Luddey (2007)	Se emplea una esfera como indicador con un diámetro “D” luego se determina el diámetro “d” de la marca dejada en la superficie después de aplicar una fuerza “F”	Dureza	Diámetro de la huella indicadora	Rockwell (HRC)	Durómetro
Independiente		Calibración en pruebas para un rango de amperaje final.	Rango de Amperaje	Intensidad de corriente	Amperio (A)	Amperímetro digital
<b>Intensidad de corriente</b>	Es la cantidad de electricidad que pasa por el arco eléctrico y que genera calor necesario para soldar. Rodríguez (2018)					
<b>Velocidad de avance</b>	Es la tasa a la que se desplaza el arco a lo largo de la junta que se está soldando. Rodríguez (2018) Es la distancia que hay entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo, puede variar según el tamaño del electrodo y el Angulo de rotación. Rodríguez (2018)	Producto de velocidad de deposición por el tiempo del proceso dividido entre el rendimiento de soldar.	velocidad de avance o desplazamiento	Movimiento lineal del arco	mm/s	cronometro
<b>Longitud de arco</b>		La longitud de arco debe ser equivalente al diámetro del electrodo para soldar	distancia entre electrodo y material base	Longitud de arco	mm	calibre vernier

*Nota:* elaboración propia



## **Capítulo IV:**

### **Metodología de Investigación**

#### **4.1 Tipo de investigación**

El enfoque de esta investigación es tecnológico aplicado, puesto que se enfoca en la implementación práctica de los saberes teóricos en el área de la metalurgia de la soldadura. El objetivo principal es llevar a cabo un análisis detallado que permita determinar con precisión la capacidad de recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271. Según Arias (2020, pág. 39)

#### **4.2 Nivel de investigación**

El grado de estudio es de carácter descriptivo y explicativo. La investigación se enfoca en emplear saberes y métodos actuales para solucionar problemas concretos respecto al tema de investigación.

##### **4.2.1 Nivel descriptivo:**

Según Arias (2020) define la investigación descriptiva como un enfoque que permite observar y detallar las características, variables y comportamientos de un fenómeno sin manipular las variables. A través de esta metodología, se busca obtener un panorama general que sirva de base para estudios más profundos. (pág. 45)

##### **4.2.2 Nivel explicativo:**

Según Arias (2020) está intentando entender las conexiones causales entre estas variables y los resultados alcanzados en los procedimientos de soldadura. Esto permite comprender por qué suceden ciertos sucesos en la recuperación de acero durante la soldadura. (pág.60)

### **4.3 Diseño de investigación**

El presente trabajo de investigación es de diseño experimental

#### **4.3.1 Diseño Experimental:**

Se trata de un diseño experimental donde se manipulan los variables independientes: la intensidad de corriente, velocidad de soldeo, longitud de arco y luego observar su efecto sobre la variable dependiente (dureza del acero, recuperación por soldadura SMAW).

### **4.4 Enfoque de la investigación**

**Enfoque cuantitativo:** según Marcelo (2022) “Se enfoca en la recolección y el análisis de datos para responder interrogantes de investigación y validar hipótesis previamente formuladas, y se fundamenta en la medición numérica para intentar determinar con precisión patrones de una población determinada”.

### **4.5 Población de estudio**

En el presente trabajo de investigación se asigna como población al acero AISI4145 de los equipos perforadoras Pit Viper-271.

### **4.6 Muestra**

“Se llevarán a cabo para cada mezcla de factores, lo que permitirá obtener un total de 5 muestras experimentales. Este tamaño de muestra fue seleccionado para asegurar la fiabilidad estadística del análisis empleado”.

5 muestras o probetas para ensayo de recuperación del acero y dureza superficial HRC considerando las variables independientes.

## **4.7 Técnicas e instrumentos de toma de datos**

### **4.7.1 Técnica:**

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación tecnológica se recurrirá a la técnica de inspección visual directa.

### **4.7.2 Instrumentos:**

Para desarrollar el trabajo de investigación tecnológica se desarrollará con los siguientes instrumentos:

Máquina de soldar por arco eléctrico, Durómetro.

## **4.8 Viabilidad de estudio**

El presente trabajo de investigación tecnológica su desarrollo es viable, porque se disponen los materiales, equipos necesarios para la experimentación y esta viabilidad está asegurada por varios factores:

**Material disponible:** El equipo perforadora Pit Viper-271 está diseñada parte estructural con distintos tipos de acero. El estudio eje pivot acero AISI 4154 es el material para realizar las pruebas experimentales. Además, se cuenta con el acceso de los laboratorios de la escuela profesión Ingeniería Metalurgia.

**Pruebas experimentales:** la presente investigación tecnológica cuenta con el respaldo de la empresa Epiroc-Perú y de la institución académica con el taller de soldadura de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica, para sus respectivas pruebas experimentales a desarrollar.

**Impacto potencial:** la recuperación del acero tiene un mayor impacto tecnológico lo que justifica es la inversión de tiempo y recursos necesarios en este estudio, los datos obtenidos beneficiaran a las empresas que cuentan con estos problemas.

#### 4.9 Plan de análisis de datos

La estadística inferencial para el análisis de resultados de la recuperación del acero AISI 4145, se realizaron un solo pase en cada probeta, el cual se especifica en la Tabla 14

**Tabla 14**

*Programa experimental*

Probetas	Bloques	Aceros	Electrodo	Pases
1	1	AISI 4145	E11018-G	1
2	1	AISI 4145	E11018-G	1
3	1	AISI 4145	E11018-G	1
4	1	AISI 4145	E11018-G	1
5	1	AISI 4145	E11018-G	1

*Nota:* Elaboración propia

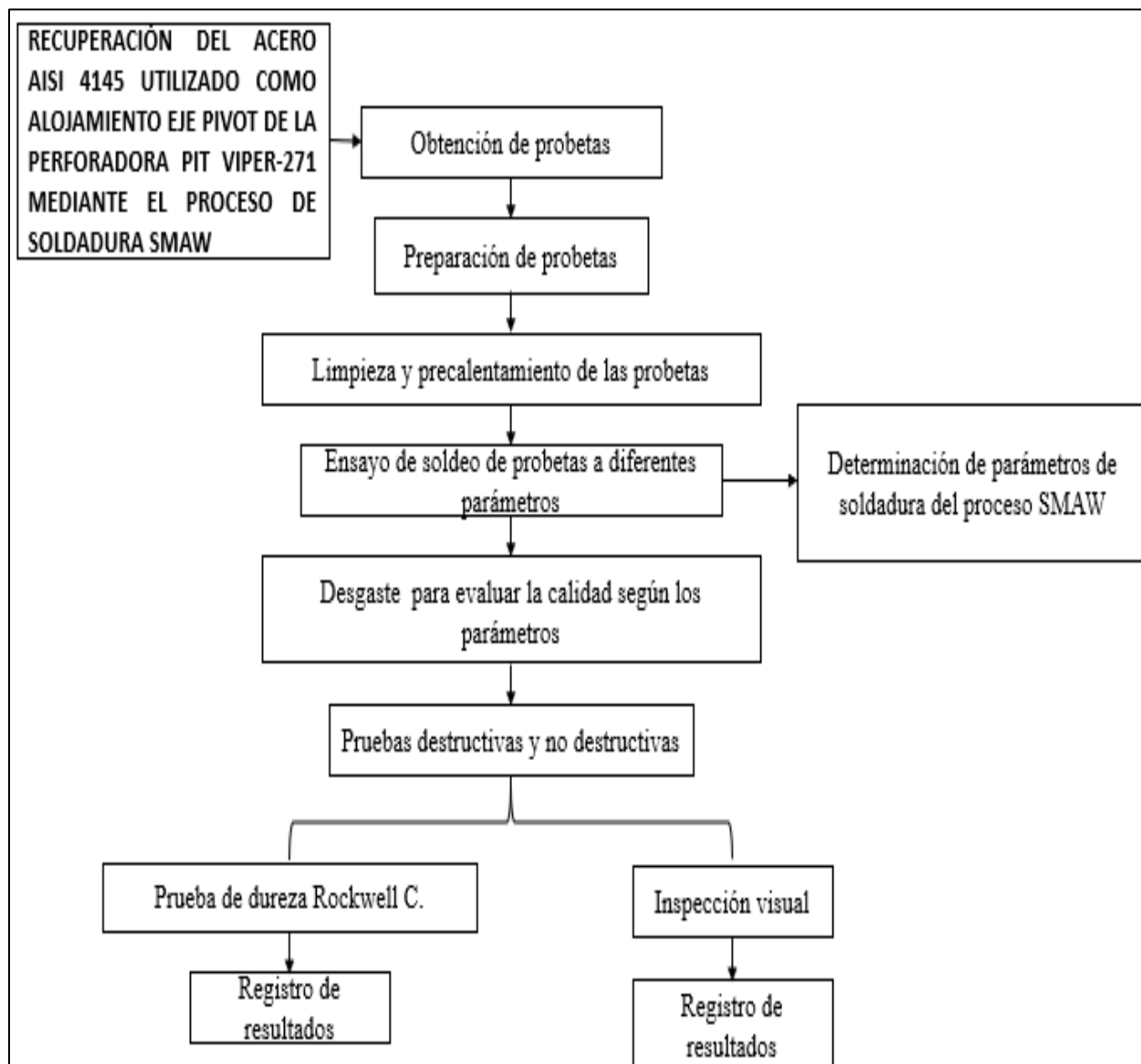
De la tabla 14 se indica que se realizan pruebas de soldeo en las cinco probetas del mismo tipo de acero AISI 4145, también con el mismo electrodo E11018-G y de una sola pasada, pero con diferentes intensidades de corriente (100,110,115,120 y 130) A.

## Capítulo V: Desarrollo Experimental

### 5.1 Procedimiento experimental.

**Figura 30**

*Diagrama de flujo del procedimiento experimental*



*Nota.* Adaptado del manual de análisis metalográfico del laboratorio de materiales (PUCP) y Laboratorio de metalurgia física (UNSAAC)

## 5.2 Equipos y Materiales utilizados en la investigación.

### 5.2.1 Selección del metal base y material de aporte.

La selección del metal base se basa a que la estructura del alojamiento eje pivot es de tipo de acero AISI 4145

#### a) Material base Acero AISI 4145

**Tabla 15**

*Tipos de aceros de baja aleación*

Acero	Descripción	Aplicación
AISI 4140	Un acero al cromo-molibdeno conocido por su alta resistencia, buena tenacidad y resistencia a la fatiga.	Se aplica principalmente en componentes de alta resistencia como engranajes, ejes, cigüeñales, bielas, pernos, y tuercas, dada su excelente combinación de dureza, resistencia a la tracción, a la fatiga y a la torsión.
AISI 4340	Un acero al cromo-níquel-molibdeno que ofrece alta resistencia, dureza y tenacidad.	Se aplica en partes que requieren alta dureza, tenacidad y resistencia a la fatiga, como engranajes, ejes, árboles de transmisión, componentes de trenes de aterrizaje de aeronaves y sistemas automotrices.
AISI 8620	Un acero de cementación para aplicaciones de servicio pesado como engranajes.	Se aplica en piezas que necesitan una combinación de dureza superficial, resistencia al desgaste y tenacidad interna, como engranajes, cigüeñales, árboles de levas y ejes.
AISI 4145	Un acero de baja aleación al cromo-molibdeno de alta resistencia, similar al 4140 pero con mayor contenido de carbono para mejorar su resistencia y templabilidad.	Se aplica en industrias como la del petróleo y gas, maquinaria pesada y automotriz, para componentes sometidos a alta tensión, desgaste y fatiga, como herramientas de perforación, engranajes, ejes, y piezas de transmisión.

*Nota:* Obtenido de (Vaca, 2020)

En la investigación se ha seleccionado el acero AISI 4145 que compone la estructura del alojamiento eje pivot de la perforadora pit viper 271. Las probetas para la investigación tienen las siguientes características.

- Forma del producto: Plancha de acero rectangular
- Dimensiones de la probeta:
  - Ancho: 2pulg. 50.8 mm
  - Longitud: 4pulg. 114.3 mm
  - Espesor: 3/4pulg. (19.050 mm)

**Tabla 16**

*Material base acero AISI 4145*

Acero	Descripción	Aplicaciones	Soldadura
<b>AISI 4145</b>	Acero de baja aleación, comúnmente utilizado en aplicaciones de alta resistencia, como herramientas de perforación de fondo y componentes de maquinaria que están sometidos a grandes esfuerzos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Componentes sometidos a grandes tensiones y esfuerzos de torsión e impacto. Ejes, engranajes, pernos, bielas, cigüeñales, árboles de turbinas, ejes traseros</li> <li>• Componentes maquinas perforadoras expuestas a alto desgaste.</li> </ul>	La soldadura del acero AISI 4145 requiere atención a la técnica de soldadura, los consumibles y el control de la velocidad de enfriamiento para asegurar una unión de alta calidad y evitar problemas como la fragilización por hidrógeno y la formación de martensita.

*Nota:* Obtenido de (Vaca, 2020)

La composición química del acero AISI 4145 se detalla en la tabla 17

**Tabla 17***Composición química del acero AISI 4145*

TIPO	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	% Cu
<i>AISI 4145</i>	0,46	0,28	1,11	0,010	0,006	1,17	0,12	0,30	0,20

*Nota:* Obtenido de (Vaca, 2020)

**b) Material de aporte E 11018-G**

Este material de contribución se ha diseñado para llevar a cabo soldaduras de excelente calidad en circunstancias donde el metal de base podría romperse. El arco producido es bastante estable, con escaso chisporroteo, y para conseguir los resultados más óptimos, se aconseja utilizar un arco de longitud corta. Además, mantener un arco corto contribuye a lograr resultados más favorables en las revisiones radiográficas.

**Tabla 18***Tipos de electrodos*

Tipo de electrodo	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%
<i>E11018-G</i>	0,06	0,35	1,50	Max.0,020	Max.0,012	0,40	2.20	0,40
<i>E6011</i>	0.05	0.3	0.5	Max 0.020	Max 0.020			
<i>E7010</i>	0.10	0.40	0.50	Max 0.020	Max 0.020			0.55
<i>E7018</i>	0.05	0.60	1	Max 0.020	Max 0.020			
<i>E6020</i>	0.10	0.60	2					
<i>E6010</i>	0.07	0.25	0.56	Max 0.05	Max 0.05			

*Nota:* Obtenido del manual de soldadura- SOLDEXA

De los electrodos mencionados se ha seleccionado al electrodo E11018–G con un diámetro de 1/8 de pulgadas (3.25mm). Este electrodo es versátil y permite soldar en diferentes posiciones, como en plano, horizontal, sobre cabeza, vertical ascendente y vertical descendente.



El criterio de la elección del electrodo 11018-G para la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora pit viper-271 es por la compatibilidad de la resistencia mecánica (El electrodo es ligeramente superior a la resistencia del acero base), similitud del contenido de aleación (Ni, Cr, Mo y Mn), buena tenacidad, menor riesgo de grietas, mejor comportamiento ante cargas (dinámicas y fatiga) y son adecuados para aceros aleados de alta resistencia.

**Tabla 19**

*Composición química del material de aporte E 11018-G*

Tipo de electrodo	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%
<i>E-11018-G</i>	0,06	0,35	1,50	Max.0,020	Max.0,012	0,40	2.20	0,40

*Nota:* Obtenido del manual de soldadura- SOLDEXA

## 5.2.2 Equipos, herramientas e instrumentos utilizados en la investigación.

### a) Fuente de poder.

**Figura 31**

*Equipo de soldeo MILLER XMT 304 CC/CV*



*Nota.* Registro fotográfico tomada en el taller de soldadura metalúrgica-UNSAAC

En la Figura 31 se muestra el equipo usado para realizar el proceso de recuperación del acero AISI 4145 utilizado como eje pivot, la cual se trata de una máquina de soldar de marca MILLER XMT 304 CC/CV.

En la Tabla 20 se describen algunas especificaciones de este equipo, el modelo, configuración y otros detalles relevantes para su funcionamiento eficiente en la aplicación de recubrimientos duros.

**Tabla 20**

*Especificaciones del equipo de soldadura.*

CARACTERÍSTICA	VALOR
Modelo	XMT 304 CC/CV
Serie	LA088626
Marca	MILLER
Tensión de alimentación	400 V
Fases	3 fases
Salida máxima	10 – 35 V, 5 – 400 A
Peso	36.1 Kg.

*Nota.* Obtenido de la ficha técnica del equipo Miller 304

#### **b) Equipo de precalentamiento**

El precalentamiento consiste en calentar el material base (acero o aleaciones) antes de iniciar la soldadura. Su objetivo principal es reducir la velocidad de enfriamiento del metal soldado, evitando problemas como: grietas en la soldadura, tensiones internas, fragilidad en la zona afectada por el calor, hidrógeno atrapado.

El precalentamiento controla las transformaciones de la austenita, limita la formación de martensita, favorece fases más dúctiles, permite la salida del hidrógeno y reduce las tensiones internas, logrando así una microestructura más homogénea y segura. También el precalentamiento permite reducir la formación de martensita, evita la transformación brusca de la austenita en

martensita, una fase muy dura y frágil, favorece la formación de ferrita y perlita, o bainita, que son microestructuras más dúctiles y tenaces.

Para ello se usa como equipo de precalentamiento a oxiacetileno que es un equipo utilizado para cortar metales, especialmente acero que consta principalmente en un soplete, fuentes de oxígeno y un gas combustible (como acetileno), reguladores de presión, mangueras y boquillas.

### Figura 32

*Oxiacetileno*



Nota: Registro fotográfico tomada en el taller de soldadura metalúrgica-UNSAAC

### c) Pirómetro

Es un instrumento que sirve para medir la temperatura de precalentamiento. En la figura 33 se observa dicho instrumento.

### Figura 33

*Pirómetro y sus características*



Nota: Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

#### d) Durómetro

El durómetro digital portátil HDT-L411 de la marca INSIZE es un dispositivo que se usa para medir la dureza de materiales de forma rápida y precisa. Es especialmente útil en la industria para verificar la dureza de metales y otros materiales en el campo o en el taller. Sus características se muestran en la tabla 21.

**Figura 34**

*Durómetro digital portátil #HDT-1411 INSIZE*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC.

**Tabla 21**

*Aspectos generales del durómetro digital portátil #HDT-1411 INSIZE*

Ítems	Descripción
Asunto	Probador de dureza portátil
Características	Cálculo automático de valores máximos, mínimos y promedio, visualización de valores duales, sonda de bobina doble, alta precisión, pantalla LCD digital de alto contraste, pantalla de fuente grande, muestra dureza Leeb y convertida
Materiales de prueba aceptados	Aluminio, aleación de cobre, hierro, acero
Exactitud	0.1 HRB, 0.1 HRC, 1 MPa
Rango de medición – Máximo	75 HRC, 140 HRB,
Rango de medición – Mínimo	1 HRB, 1 HRC.
Tipo de Producto	Probador de dureza portátil
Altura de prueba – Mínima	1/4"
Métodos de prueba	Rebote
Material de la superficie de trabajo	Aluminio, aleación de cobre, hierro, acero

*Nota.* Datos extraídos de la ficha técnica del equipo.

### 5.2.3 Otras herramientas e instrumentos utilizados en la investigación

Otras herramientas e instrumentos que se utilizaron se detallan en la Tabla 22.

**Tabla 22**

*Otras herramientas, instrumentos, materiales consumibles*

Herramientas	Marca	Tamaño / Modelo	Potencia / medición	Rango de	Aplicación
Amoladora	CROWN	CT13029	1200 W		Corte y desbaste
Escobilla de acero					Limpieza de escoria
Piqueta de acero					Limpieza de escoria
<b>Instrumentos</b>					
Vernier	TRUPER	CALDI-	cm y mm		Medidor de longitud
<b>Material consumible</b>					
Thiner	-----	-----	-----		Disolvente
Franela	-----	-----	-----		Para limpieza.
<b>EPP (equipos de protección personal)</b>					
Careta de soldar					
Zapatos de seguridad					
Guantes de soldador					
Mascara protectora					
Chaqueta de cuero					
Pantalón de cuero					
Polainas					
Delantal de cuero					
Gorro protector					



*Nota.* Elaboración propia

### 5.3 Procedimiento de soldadura.

#### 5.3.1 Especificación del procedimiento de soldadura (WPS).

Utilizando la norma WPS (Procedimiento de Especificación de Soldadura), es un documento técnico que especifica el método concreto a implementar para llevar a cabo una soldadura, incluyendo aspectos como los materiales empleados, las ubicaciones de soldadura, la preparación de la junta, los parámetros y el procedimiento de soldadura. La sección Anexos (3,4,5,6y7) especifica los procesos para cada metal base y metal de aporte, incluyendo las especificaciones para llevar a cabo la soldadura de recuperación del acero AISI 4145 empleado como alojamiento para el eje pivot.

#### 5.3.2 Cálculo de carbono equivalente.

El cálculo del parámetro del metal crítico (Pcm) (Sociedad Japonesa de Ingeniería de Soldadura) se calcula por la Ec. 5

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

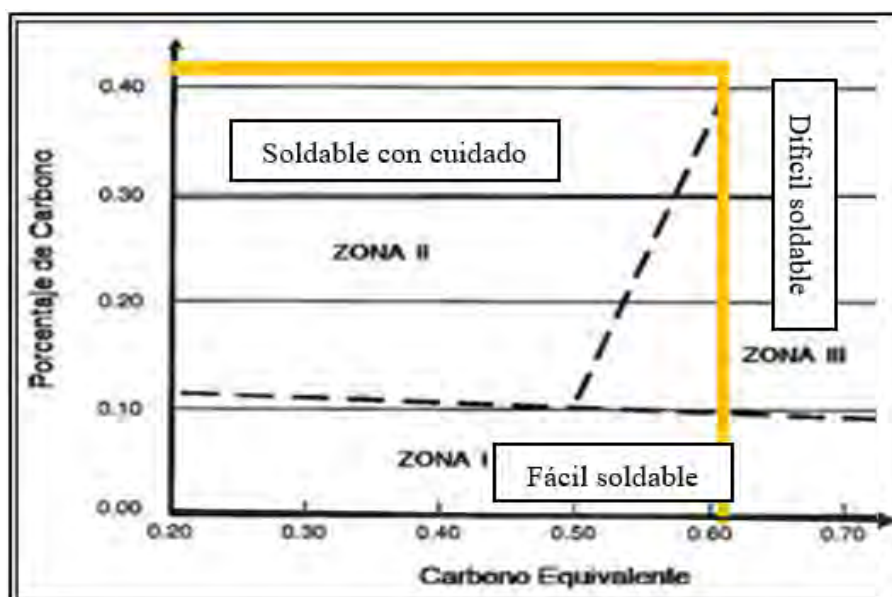
Remplazar en la Ecuación (5)

**Acero AISI 4145**

$$P_{cm} = 0.46 + \frac{0.28}{30} + \frac{1.11 + 0.20 + 1.17}{20} + \frac{0.12}{60} + \frac{0.30}{15} + \frac{0.00}{10} = 0.615$$

**Figura 35**

*Ubicación del valor de Carbono equivalente en el diagrama de Graville.*



*Nota:* Ubicación del carbono equivalente del material base

Conforme al resultado obtenido calculado el carbono equivalente, en el diagrama de Graville de la Figura 35, se ubican los resultados para el acero AISI 4145, en la intersección del Carbono Equivalente (CE) y el Porcentaje de Carbono (%) en la Zona II. Esto implica que la soldadura debe llevarse a cabo bajo condiciones reguladas, controlando el calor proporcionado y modificando la velocidad de refrigeración después de la soldadura, el cual especifica en a figura 35. Donde en la zona I los aceros con un contenido reducido de carbono y un endurecimiento reducido no suelen presentar fisuras y la zona III poseen un elevado contenido de carbono y un elevado nivel de endurecimiento pueden crear microestructuras susceptibles a la formación de fisuras en diferentes condiciones de las uniones soldadas.

### 5.3.3 Preparación de probetas.

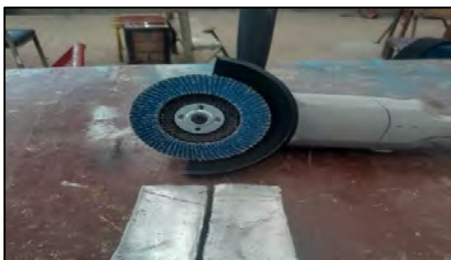
Previo al soldeo de las probetas, se realizaron las siguientes operaciones:

**a) Limpieza de las probetas.**

Las rebabas de las probetas se eliminaron utilizando una amoladora como se muestra en la figura 36. Cabe indicar que en el alojamiento del eje pivot de la perforadora pit viper 271 se utiliza un equipo barrenadora portatil para la limpieza y desbaste de las rebabas para llegar a una medida requerida.

**Figura 36**

*Desbaste de probetas mediante amoladora*



*Nota:* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

**b) Precalentamiento de las probetas**

Se realiza un pre calentamiento a las probetas a una temperatura de  $(200 - 300) ^\circ\text{C}$  antes de soldar para eliminar la humedad, óxidos y disminuir tensiones internas, por el tipo de acero que se va realizar la soldadura como se muestra en la figura 37.

**Figura 37**

*Precalentamiento de las probetas*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC



Cálculo de la Temperatura de Precalentamiento para el Acero AISI 4145, Seferian (2011) propone un método fundamentado en sus estudios en los que usa fórmula para el carbono equivalente ( $C_T$ ), que lo plantea como suma de un carbono equivalente químico que se menciona en la Ec.10

$$T_p(^{\circ}C) = 350\sqrt{C_T - 0.25} \quad \text{Ec.10}$$

Donde el equivalente total de carbono es la suma de equivalente químico ( $C_q$ ) y el equivalente en carbono del espesor ( $C_e$ ) tal como indica en la Ec.11

$$C_T(\%) = C_e + C_q = C_q(1 + 0.005e) \quad \text{Ec.11}$$

Según a la Ec.12 se determina el equivalente químico

$$C_q(\%) = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \quad \text{Ec.12}$$

Reemplazando los valores en la Ec.12

$$C_q = 0.46 + \frac{1.11+1.17}{9} + \frac{0.12}{18} + \frac{7*0.30}{90} = 0.743$$

Según la Ec.11 determinamos el equivalente total de carbono.

$$C_T(\%) = 0.743(1 + 0.005 * 19.05)$$

$$C_T(\%) = 0.8137$$

En base a los valores obtenidos, calculamos la temperatura de precalentamiento de acuerdo a la Ec.10, sugerida por Seferian (2011):

$$T_p = 350 \sqrt{0.8173 - 0.25} = 251^{\circ}C$$

### 5.3.4 Aplicación de la recuperación mediante soldadura SMAW.

En la Figura 38, se muestran las probetas del acero AISI 4145 como material base y los electrodos como material de aporte. El proceso de soldadura para la recuperación del acero AISI 4145 se llevó a cabo en 5 probetas utilizando el proceso de soldadura SMAW, de acuerdo con las especificaciones y parámetros de la hoja WPS (ver anexos 3,4,5,6,7); considerando las medidas y precauciones de seguridad durante la soldadura.

**Figura 38**

*Aceros AISI 4145 y electrodos E11018-G*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

Como se muestra en la figura 39 se realiza el proceso de soldeo de las 5 probetas con diferentes parámetros.

**Figura 39**

*Aplicación de soldeo mediante el proceso de soldadura SMAW.*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

La Figura 40, muestra la medición del amperaje y voltaje durante el procedimiento de soldadura para controlar los parámetros establecidos en la hoja WPS. Se puede observar que los valores que se muestran en el panel de control del equipo de soldadura (MILLER XMT 304 CC/CV)

### Figura 40

*Medición de Voltaje y Amperaje.*



*Nota.* A) Panel de control del equipo de soldadura y B) Proceso de soldeo. Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

Para prevenir y eliminar las impurezas presentes en los pasos de cordones durante el proceso de soldeo para la recuperación del acero en los metales de base, se lleva a cabo la limpieza y supresión de la escoria por cada paso de cordón y capa que se ha depositado en el metal. Esto asegura una correcta adherencia del cordón de soldadura al material de base. Para ello, se utilizan utensilios manuales, una piqueta y una escobilla de metal, tal como se ilustra en la Figura 41.

### Figura 41

*Limpieza de cordones de soldadura de revestimiento entre cada pasada*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación (2025).

Concluida el procedimiento de soldeo de la recuperación del acero AISI 4145 con el material de aporte E11018-G por el proceso de soldadura SMAW, en un total de 5 probetas con dimensiones 104.14x50.8x19.05mm, como se muestra en la Figura 38 de acuerdo con las combinaciones del diseño experimental mostrado en la Tabla 41. Las probetas recuperadas por el proceso de soldadura fueron controladas para su enfriamiento lento, evitar fisuración, evitar alguna impresión en las probetas ya que este tipo de acero contiene alto porcentaje de carbono e igual forma considerando el diagrama graville (alta templabilidad).

## 5.4 Recuperación del acero AISI 4145

### 5.4.1 Ensayo de soldadura con distintos intensidad de corriente (A)

**Probeta 1:** La recuperación del acero AISI 4145 se realizó con una intensidad de corriente de 100 A, con una tensión eléctrica de 24 V y con una potencia de 2400W de energía. En la figura 42 se observa la aparición de poros en el cordón de soldadura, es una de las causas de la intensidad de corriente muy baja, humedad del medio ambiente, óxidos que se encuentran en el material base.

#### Figura 42

*Ensayo de soldadura a 100A*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

**Probeta 2:** La recuperación del acero AISI 4145 se realizó con una intensidad de corriente 110, con una tensión eléctrica 24 V y con una potencia de 2640W de energía. En la siguiente figura

43 se observa la imperfección en el cordón de soldadura. las imperfecciones surgen por la intensidad de corriente baja con una velocidad de soldadura inadecuado.

### Figura 43

*Ensayo de soldadura a 110A*

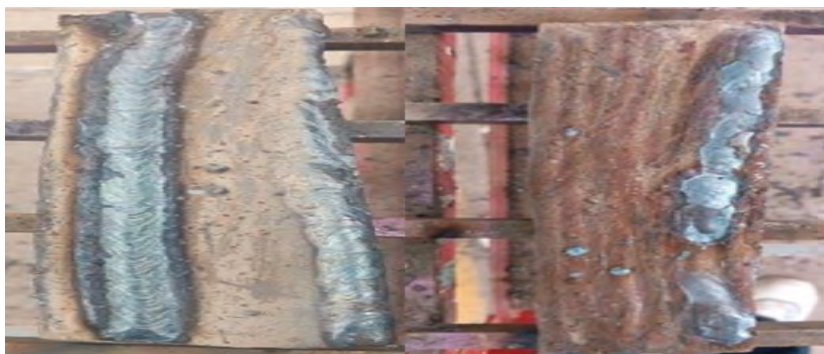


*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

**Probeta 3:** En la recuperación del acero AISI 4145 se realizó con una intensidad de corriente 115 A, con una tensión eléctrica de 24 V y con una potencia de 2760W de energía. En la figura 44 se observa una gran mejora y una estética del cordón de soldadura. La mejora surge por los parámetros adecuados en la aplicación de soldeo

### Figura 44

*Ensayo de soldadura a 115A*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

**Probeta 4:** En la recuperación del acero AISI 4145 se realizó con una intensidad de corriente 120 A, con una tensión eléctrica de 24 V y con una potencia 2880W de energía. En la

figura 45 se observa que la escoria a medida que se suelda se retira automáticamente del cordón de soldadura. los parámetros de soldadura son óptimos y bien controlados por el inspector de la soldadura o por el soldador homologado.

### **Figura 45**

*Ensayo de soldadura a 120A*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

**Probeta 5:** En la recuperación del acero AISI 4145 se realizó con una intensidad de corriente 130 A y con una tensión eléctrica de 24 V con una potencia de 3120W de energía. En la figura 46 se observa una salpicadura intensa el cordón, forma del cordón plano y ZAC con mayor distancia. Exceso de intensidad de corriente que genera salpicadura y sobre carga de cordón se soldadura.

### **Figura 46**

*Ensayo de soldadura a 130A*



*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC



### 5.4.2 Determinación de la velocidad de soldeo

Para calcular la velocidad de soldeo, tenemos la siguiente ecuación 8.

$$V = \frac{E}{t} \quad Ec. 8$$

V: velocidad (mm/s)

E: espacio (mm)

t: tiempo (s)

#### Probeta 1

*Tiempo 1*



Registro de datos		
Velocidad V(mm/s)	Tiempo t(s)	Espacio E (mm)
2.62mm/s	43.69 s	4" ½ = 114.3mm

$$V_1 = \frac{114.3mm}{43.69 s} = 2.62mm/s$$

#### Probeta 2

*Tiempo 2*



Registro de datos		
Velocidad V(mm/s)	Tiempo T(s)	Espacio E (mm)
2.53mm/s	45.25 s	4" ½ = 114.3mm

$$V_2 = \frac{114.3mm}{45.25 s} = 2.80mm/s$$

**Probeta 3***Tiempo 3*

Registro de datos		
Velocidad V(mm/s)	Tiempo T(s)	Espacio E (mm)
2.98mm/s	38.37 s	4" ½ = 114.3mm

$$V_3 = \frac{114.3mm}{38.37 s} = 2.98mm/s$$

**Probeta 4***Tiempo 4*

Registro de datos		
Velocidad V(mm/s)	Tiempo T(s)	Espacio E (mm)
2.96mm/s	38.37 s	4" ½ = 114.3mm

$$V_4 = \frac{114.3mm}{38.56 s} = 2.96mm/s$$

**Probeta 5***Tiempo 5*

Registro de datos		
Velocidad V(mm/s)	Tiempo T(s)	Espacio E (mm)
2.98mm/s	41.84 s	4" ½ = 114.3mm

$$V_5 = \frac{114.3mm}{41.84 s} = 2.98mm/s$$



### 5.4.3 Determinación la longitud del arco

Para determinar el arco de soldadura, generalmente se consideran varios factores como la corriente, la tensión y la longitud del arco. La relación básica que se usa en algunos casos es la siguiente ecuación 7:

$$d = \frac{V}{I \times R} \quad Ec. 7$$

Donde:

(d) Distancia del arco(mm)

(V) Voltaje de soldadura(V)

(I) Corriente de soldadura(A)

(R) Resistencia del circuito( $\Omega$ )

Sin embargo, en la práctica, la distancia del arco también puede depender de otros factores como el tipo de material, el proceso de soldadura y las condiciones específicas del trabajo. Es importante seguir las recomendaciones del fabricante y las buenas prácticas de soldadura para obtener los mejores resultados. R = Resistencia efectiva del arco ( $\Omega$ ), suele estar entre (0.02 – 0.04)  $\Omega$  para SMAW. Según (Kou, *Welding Metallurgy*, 2020)

Determinación de las distancias del arco en cada probeta según los parámetros de soldeo.

Probeta N°1:

$$d = \frac{24}{100 \times 0.04} = 6$$

$$\mathbf{d = 6mm}$$

Probeta N°2:

$$d = \frac{24}{110 \times 0.04} = 5.45$$

$$\mathbf{d = 5.45mm}$$

Probeta N°3:

$$d = \frac{24}{115 \times 0.04} = 5.22$$

$$d = 5.22mm$$

Probeta N°4:

$$= \frac{24}{120 \times 0.04} = 5$$

$$d = 5mm$$

Probeta N°5:

$$= \frac{24}{130 \times 0.02} = 4.62$$

$$d = 4.62mm$$

#### 5.4.4 Cálculo del calor neto aportado

Para el cálculo del aporte de calor, se calculó haciendo uso de la ecuación 2 y reemplazando en ella los valores de la tabla 23.

**Tabla 23**

*Eficiencia térmica de los procesos de arco*

Proceso	Eficiencia (%)
GTAW	20-50
GMAW	70-85
SMAW	70-80
SAW	90-99

*Nota:* Obtenido de (García, 2010)

Según la tabla 23 nos indica para el proceso SMAW se considera una eficiencia de 70%-80% donde se toma el valor promedio 75% de eficiencia para el proceso de soldadura SMAW.

El cálculo del calor neto aportado para cada una de las probetas es:

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \times f \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

$H_{net}$  = calor suministrado (j/mm).

$I$  = Intensidad de corriente (A).

$V$  = Tensión eléctrica (V).

$v$  = Velocidad de soldeo (mm/seg).

Probeta N° 1:

$$H_{net} = \frac{24 \times 100}{2.62} \times 0.75 = 687.02$$

$$H_{net} = 687.02 \text{ J/mm}$$

Probeta N°2:

$$H_{net} = \frac{24 \times 110}{2.53} \times 0.75 = 707.14$$

$$H_{net} = 707.14 \text{ J/mm}$$

Probeta N°3:

$$H_{net} = \frac{24 \times 115}{2.98} \times 0.75 = 694.63$$

$$H_{net} = 694.63 \text{ J/mm}$$

Probeta N°4:

$$H_{net} = \frac{24 \times 120}{2.96} \times 0.75 = 729.72$$

$$H_{net} = 729.72 \text{ J/mm}$$

Probeta N°5:

$$H_{net} = \frac{24 \times 125}{2.73} \times 0.75 = 785.23$$

$$H_{net} = 785.23 \text{ J/mm}$$

## 5.5 Ensayos Destructivos y no Destructivos

### 5.5.1 Ensayos Destructivos

#### a) Dureza.

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

Los ensayos de dureza más utilizados son:

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

Se realiza la medición de las durezas superficiales en la escala Rockwell C en las 5 probetas según los parámetros considerados en el ensayo de recuperación.

#### Probeta N°1



Registro de datos (Ensayo de dureza)				
Material base	Material de aporte	de Soladura con Amperaje (A)	<b>Dureza HRC</b>	
AISI 4145	E11018-G	100	<b>22.7</b>	

*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

**Probeta N°2**

*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

Registro de datos (Ensayo de dureza)				
Material base	Material de aporte	de	Soldadura con Amperaje (A)	<b>Dureza HRC</b>
AISI 4145	E11018-G		110	<b>21.4</b>

**Probeta N°3**

*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

Registro de datos (Ensayo de dureza)				
Material base	Material de aporte	de	Soldadura con Amperaje (A)	<b>Dureza HRC</b>
AISI 4145	E11018-G		115	<b>26.6</b>

**Probeta N°4**

*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

Registro de datos (Ensayo de dureza)				
Material base	Material de aporte	de	Soldadura con Amperaje (A)	<b>Dureza HRC</b>
AISI 4145	E11018-G		120	<b>29.5</b>

**Probeta N°5**

*Nota.* Obtenido del registro fotográfico de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

Registro de datos (ensayo de dureza)				
Material base	Material de aporte	de	Soldadura con Amperaje (A)	<b>Dureza HRC</b>
AISI 4145	E11018-G		130	<b>29.9</b>

### 5.5.2 Ensayos no Destructivos

Son técnicas no invasivas para determinar la integridad de un material, componente o estructura o para medir cuantitativamente características de un objeto. Estos ensayos no afectan a las propiedades, dimensiones y uso de las piezas ensayadas (Society, 2012)

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

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

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

#### **a) Inspección visual.**

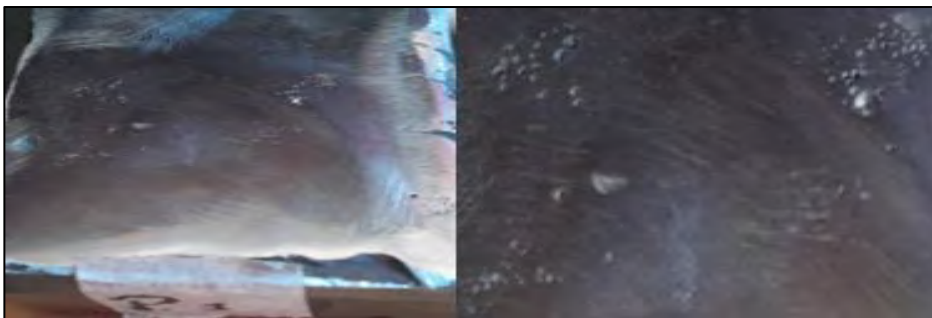
Se realiza en toda la secuencia de operaciones a lo largo de todo el proceso de soldadura, desde la recepción de los materiales y tiene como fin asegurar la calidad de los recubrimientos soldadas. La inspección visual es una de las Pruebas No Destructivas (PND) más empleada. La soldadura de sellado de los perfiles huecos de acero requiere inspección visual. (Society, 2012)

A continuación, se muestran figuras de las pruebas de inspección visual.

**Probeta 1** La corriente más baja (100 A) generó una soldadura con baja penetración se verifica un descascara miento de material de aporte, aparición de poros, que nos indica una mala penetración de soldadura, parámetro de soldadura inapropiado como se muestra en la figura 47.

**Figura 47**

*Soldadura a una corriente de soldadura de 100A*



*Nota: fotografía de la investigación Metalúrgica – UNSAAC*

**Probeta 2** La corriente más baja (110 A) generó una soldadura con baja penetración, en la figura 48 se verifica la existencia de poros en el material recuperado que nos indica una mala penetración de soldadura, parámetro de soldadura inapropiado.

**Figura 48**

*Soldadura a una corriente de soldadura a 110A*



*Nota: fotografía de la investigación Metalúrgica – UNSAAC*

**Probeta 3** con una corriente de 115 A, se obtuvo una recuperación aceptable, indicando que un aumento moderado del amperaje mejora la calidad de soldadura como se muestra en la figura 49.

**Figura 49**

*Soldadura a una intensidad de corriente de 115A*

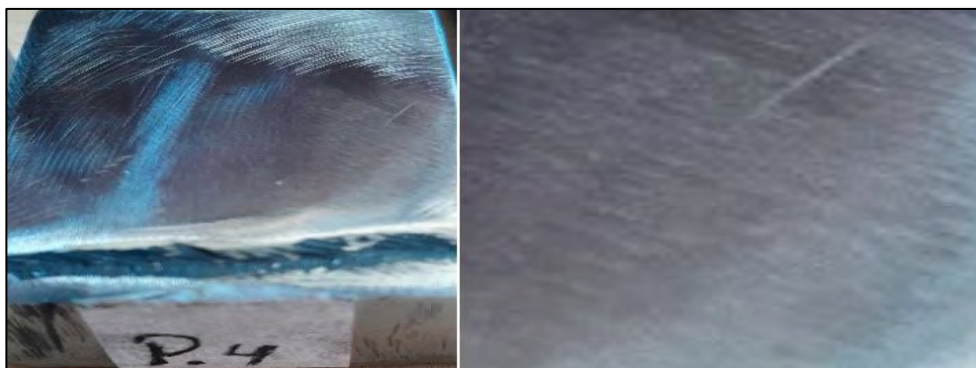


*Nota:* Fotografía tomada de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

**Probeta 4** con 120 A, se alcanzó una muy buena recuperación, lo que muestra que esta intensidad, junto con una velocidad y longitud de arco adecuadas, genera una fusión óptima, sin defectos visibles como se muestra en la figura 50.

**Figura 50**

*Soldadura a una intensidad de corriente de 120A*



*Nota:* Fotografía tomada de la investigación Metalúrgica – UNSAAC



**Probeta 5** Con 130 A, evidenció defectos por exceso de calor y salpicaduras, además de una baja dureza (29.9HRC), lo que confirma que una corriente excesiva puede deteriorar tanto la calidad superficial como la resistencia mecánica del cordón como se muestra en la figura 51

### **Figura 51**

*Soldadura a una intensidad de corriente de 130A*



*Nota:* Fotografía tomada de la investigación Metalúrgica – UNSAAC

## Capítulo VI

### Discusión y Análisis de Resultados

#### 6.1 Resultados

##### 6.1.1 Intensidad de corriente (A)

**Tabla 24**

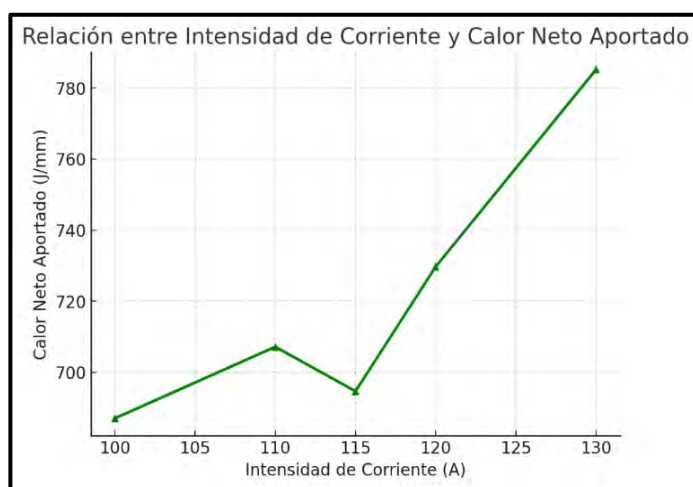
*Resultados de la intensidad de corriente (A)*

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Velocidad de soldadura (mm/s)	Longitud de arco (mm)	Calor neto aportado (J/mm)
1	<b>100</b>	24	2.62	6	687.02
2	<b>110</b>	24	2.80	5.45	707.14
3	<b>115</b>	24	2.98	5.22	694.63
4	<b>120</b>	24	2.96	5	729.72
5	<b>130</b>	24	2.98	4.62	785.23

*Nota:* Elaboración propia

**Figura 52**

*Grafica de la intensidad de corriente vs calor neto aportado*



*Nota:* Elaboración propia en software Python

En la tabla 24 se resume los resultados del ensayo, cómo varían los diferentes parámetros del proceso de soldadura. La intensidad de corriente se aumentó progresivamente desde 100 A hasta 130 A donde se evalúa la influencia del incremento de corriente sobre la calidad de soldadura.

De la figura 52 se indica lo siguiente

- El calor neto aportado aumenta casi linealmente de 687 J/mm (100 A) hasta 785 J/mm (130 A).
- Generalmente, a medida que aumenta la intensidad de corriente, el calor neto aportado también se incrementa, de manera proporcional si los demás parámetros (voltaje, velocidad de avance y eficiencia) se mantienen constantes.
- Si la velocidad de avance disminuye, el calor neto por unidad de longitud aumenta más rápidamente.

### 6.1.2 Velocidad de soldadura

**Tabla 25**

*Resultados de la velocidad de soldeo*

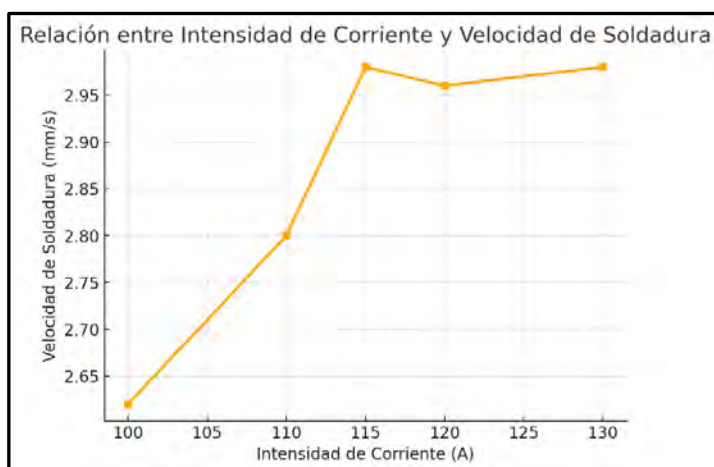
Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Velocidad de soldadura (mm/s)	Longitud de arco (mm)	Calor neto aportado (J/mm)
1	100	24	<b>2.62</b>	6	687.02
2	110	24	<b>2.80</b>	5.45	707.14
3	115	24	<b>2.98</b>	5.22	694.63
4	120	24	<b>2.96</b>	5	729.72
5	130	24	<b>2.98</b>	4.62	785.23

*Nota:* Elaboración propia Metalúrgica – UNSAAC

En la tabla 25 se resume los resultados del cálculo de la velocidad de soldeo, cómo varían los diferentes parámetros del proceso de soldadura. La velocidad aumenta ligeramente desde 2.62mm/s hasta aproximadamente 2.98mm/s con pequeñas variaciones. Generalmente, a mayor velocidad, menor aporte de calor, porque el arco permanece menos tiempo sobre el material.

### Figura 53

*Grafica de la intensidad de corriente vs velocidad de soldadura*



*Nota:* Elaboración propia en software Python

De la gráfica de la figura 53 se indica lo siguiente

- Entre 100 A y 115 A, la velocidad de soldadura aumenta de 2.62 → 2.98 mm/s.
- A partir de 115 A → 130 A, la velocidad se mantiene casi constante alrededor de 2.96–2.98 mm/s.

Donde decimos que; al aumentar la intensidad de corriente, aumentará el aporte de calor donde el material se funde más rápido y aumenta la velocidad de soldeo; sin embargo, después de una intensidad de corriente de 115 A la velocidad de soldeo ya no mejora significativamente.

### 6.1.3 Longitud de arco

En la tabla 26 se resume los resultados del cálculo de la longitud de arco. La longitud del arco disminuye de 6 mm a 4.62 mm mientras aumenta la corriente. Una longitud de arco más corta tiene una mayor estabilidad y a un mayor calor concentrado en la zona de soldadura.

**Tabla 26**

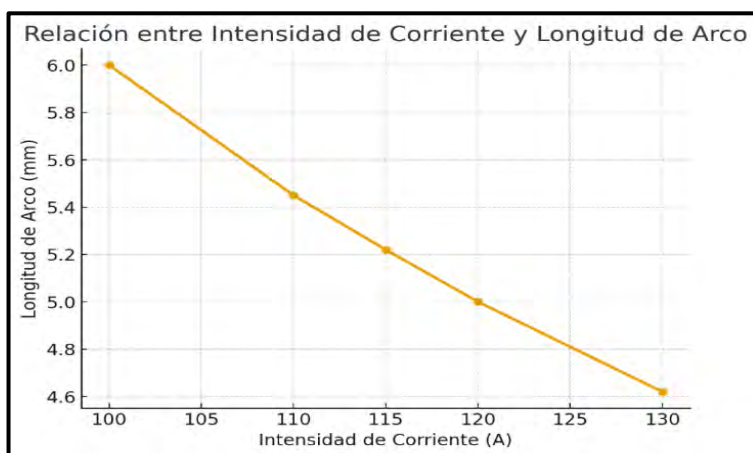
*Resultados del cálculo de la longitud de arco*

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Velocidad de soldadura (mm/s)	<b>Longitud de arco (mm)</b>	Calor neto aportado (J/mm)
1	100	24	2.62	<b>6</b>	687.02
2	110	24	2.80	<b>5.45</b>	707.14
3	115	24	2.98	<b>5.22</b>	694.63
4	120	24	2.96	<b>5</b>	729.72
5	130	24	2.98	<b>4.62</b>	785.23

*Nota:* Elaboración propia Metalúrgica – UNSAAC

**Figura 54**

*Grafica de la intensidad de corriente vs longitud de arco*



*Nota:* Elaboración propia en software Python

De la gráfica de la figura 54 se indica lo siguiente

- A medida que la corriente aumenta de 100 A  $\rightarrow$  130 A, la longitud de arco disminuye de 6 mm  $\rightarrow$  4.62 mm.
- Esto se debe a que una mayor corriente genera un arco más estable y concentrado, reduciendo su longitud efectiva.

Donde se dice que, con mayor corriente, el arco se vuelve más corto, lo que mejora la penetración, pero puede incrementar el riesgo de defectos si se excede.

#### 6.1.4 Inspección visual de las probetas

Este ensayo permite la detección de discontinuidades que afectan la sanidad de las uniones soldadas.

En la tabla 27 se detallan los resultados del examen visual.

**Tabla 27**

*Resultados del examen visual.*

Nº de probetas	Defecto	Causa	Calificación
1	Insuficiente penetración	Intensidad de corriente baja.	Rechazado
2	Insuficiente penetración	Intensidad de corriente baja	Rechazado
3	Deposito aceptable	Parámetros de las variables ideales.	Aceptado
4	Deposito Aceptable	Parámetros de las variables ideales.	Aceptado
5	Socavaduras y salpicaduras	Intensidad de corriente muy alta y longitud de arco muy corto	Rechazado

*Nota:* Elaboración propia (Edison & Edgar)

## **6.2 Análisis de resultados**

En esta sección se muestra el análisis de los resultados de; Amperaje, velocidad de soldeo, longitud de arco ideales, calor de aporte neto, ensayo de dureza, inspección visual, el ensayo de mecanizado, que a continuación se describen.

### **6.2.1 Intensidad de corriente**

La corriente crece gradualmente desde (100 – 130) A, a medida que acrecienta la corriente, también aumenta el calor neto aportado, lo que permite mejorar la penetración y la unión, pero si es demasiado alta genera salpicaduras o quemar el material.

En este caso, la corriente más baja (100 A) puede haber contribuido a una penetración insuficiente, mientras que la más alta (130 A) aporta más calor, pero también puede aumentar el riesgo de defectos si no se controla bien.

### **6.2.2 Velocidad de soldeo**

Se observa que la velocidad de soldadura no sigue una tendencia lineal, Los valores oscilan entre 2.62 mm/s (probeta 1) y 2.98 mm/s (probeta 3 y 5). Una velocidad más baja (como en la probeta 1) permite que el calor penetre más, pero generan más salpicaduras, exceso de material de aporte y sobrecalentamiento si es demasiado lenta.

Una velocidad más alta (como en la probeta 3 y 5) puede reducir la penetración, pero ayuda a evitar defectos por exceso de calor. La probeta 4, con 2.96 mm/s, tiene una velocidad adecuada que contribuye a una buena calidad de soldadura.

### **6.2.3 Inspección visual**

Según la tabla 27, la probeta 1 a causa de la velocidad de soldeo rápida y con la intensidad de corriente baja (100 A) la calidad del depósito es rechazada, como defecto baja penetración del material de aporte. Por otro lado, la probeta 5 a causa de una intensidad de corriente elevada (130 A) se presenta en la unión soldada un exceso de penetración calificándolo como depósito de soldadura rechazada por el excedente de material de aporte. En cambio, la probeta 3 y 4 por ser su intensidad de corriente adecuada (115 y 120 A) y una velocidad de soldeo apropiada, se obtuvo muy buena calidad de soldeo, el depósito de soldadura de buen aspecto y dimensiones correctas sin presencia de defectos.

### **6.2.4 Calor neto aportado**

Los valores oscilan entre aproximadamente 687.02 J/mm (probeta 1) y 785.23 J/mm (probeta 5).

A mayor calor aportado, generalmente hay mayor penetración, pero también aumenta el riesgo de defectos si no se regula correctamente. La probeta 5, con el mayor calor neto aportado, puede tener una penetración excesiva o salpicaduras, lo cual afecta la calidad. La probeta 1, con menor calor, tiene una penetración insuficiente.

### **6.2.5 Ensayo de dureza**

Todas las probetas tienen el mismo material base (acero AISI 4145) y material de aporte (E11018-G), con un recubrimiento de una sola capa, con amperaje que varía entre 100 y 130 amperios. La dureza HRC muestra una tendencia variable en función de la intensidad de corriente; La dureza más alta (29.9 HRC), se obtuvo con 130 A. La dureza más baja (21.4 HRC), que se



obtuvo con 110 A. Los valores intermedios (22.7, 26.6, 29.5 HRC) corresponden a diferentes amperajes. La relación entre amperaje y dureza no es lineal, a menor amperaje la dureza tiende a ser menor, aunque hay cierta variabilidad.

## Conclusiones

1. La probeta 4, con 120 A, logró la mejor calidad de recuperación, con una soldadura limpia, buena penetración y parámetros equilibrados, lo que indica que este valor representa el amperaje más eficiente para el proceso de recuperación del acero AISI 4145 con electrodo E11018-G, ya que proporciona un equilibrio adecuado entre penetración, estabilidad térmica y calidad del cordón. Corrientes por debajo de este valor generan uniones débiles, mientras que valores superiores comprometen la integridad de la soldadura por sobrecalentamiento y defectos superficiales.
2. La velocidad de soldadura óptima para el proceso SMAW aplicado a la recuperación del acero AISI 4145 se encuentra a 2.96 mm/s, ya que maximiza la calidad visual del cordón y permite alcanzar mayores valores de dureza. Velocidades muy bajas favorecen defectos por sobrecalentamiento, y velocidades mal controladas pueden comprometer la resistencia del material recuperado.
3. La longitud de arco mostró una influencia significativa en la distribución del calor, la penetración y la resistencia del material recuperado. Con base en los cálculos analíticos y teóricos se determinó que una longitud de arco menor a 5 mm, sin embargo, el valor de la longitud de arco adecuado en la práctica es el diámetro del electro resultando 3.25mm, ya que proporciona el mejor equilibrio entre estabilidad del arco, penetración, calidad superficial y dureza final. Longitudes de arco excesivamente cortas o largas pueden modificar la estructura metalúrgica y generar defectos, aun cuando se obtengan valores elevados de dureza.

### **Recomendaciones**

Con base en los resultados de los ensayos de dureza, inspección visual e intensidad de corriente, se recomienda lo siguiente para optimizar el proceso de recuperación de piezas metálicas del acero AISI 4145 (como el alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271):

1. Utilizar adecuadamente los equipos de protección personal (EPP): careta de soldar, ropa de cuero, protección respiratoria, guantes de soldador, tapones auditivos, zapato de seguridad para soldadores.
2. Controlar estrictamente la intensidad de corriente mínimo 115 A o máximo 120 A. Este rango proporciona una fusión adecuada sin generar sobrecalentamiento, mejora la calidad del cordón y mantiene una dureza aceptable.
3. Aplicar un monitoreo continuo del proceso (líquidos penetrantes, rayos X, partículas magnéticas), para garantizar la calidad en cada pasada de soldadura.
4. Realizar el precalentamiento y el enfriamiento controlado del componente según lo requerido por el tipo de acero (AISI 4145), para reducir tensiones residuales y evitar agrietamientos.
5. Equipar o construir en el taller de soldadura de la escuela profesional de Ing. Metalúrgica-UNSAAC el horno de secado de electrodos para evitar absorción de humedad, contaminación externa y de esa forma garantizar la calidad de soldadura.
6. Adquirir para el taller de soldadura de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica-UNSAAC un durómetro portátil para realizar pruebas de dureza.

## Referencias

- Arias, R. (2020). *Metodologia de la investigacion* . XYZ.
- Askeland, D. F. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales* (S. Cervantes. (sexta edicion). Cengage Learning.
- Asta, E. (2006). *Fundamentos de la soldadura por arco electrico*. Buenos Aires.
- Atlas copco - CHILENA S.A, P. S. (2022). *ESPECIFICACIONES Y SISTEMAS*.
- Avner, S. H. (1974). *Introduction to physical metallurgy*. In McGraw Hill Book Company (Second Edition). McGraw-Hill.
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology*. Wiley: Second Edition.
- Bonilla, C. &. (2015). *Reconstruccion y/o reparacion de piezas de fundicion gris, por medio de soldadura al arco (SMAW)*. Guatemala.
- Calderón, J. (2021). *Modelo uliram para determinar nuevas composiciones químicas para*. Tesis Digitales UNMSM.
- Ccommittee., S. S. (1994). Obtenido de Carbon equivalence and weldability of mircoallowed steels.: <http://www.shipstructure.org/pdf/357.pdf>
- Chambi, H. (2014). *Analisis de la recuperacion del pestillo de compuerta de cucharon de pala mecanica 3800-4100 por proceso de soldadura SMAW*. Arequipa.
- Epiroc, S. (2024). *Pit Viper 271*. Obtenido de <https://www.eepiroc.com/es-pe/products/drill-rigs/surface-blasthole-drill-rigs/pv-271>
- Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. Sage Publication.

Fortinox, T. (2022). Especificaciones técnicas. *MAXILOAD 4145*, 2.

Fosca, C. (2007). *Introduccion a la metalurgia de la soldadura*. Obtenido de Introduccion a la metalurgia de la soldadura.: Obtenido de <https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadura-Carlos-Fosca-pdf>

Garcia, A. (2019). *Optimizacion de los parametros de soldadura por proceso de arco electrico con proteccion de gas(GMAW) para soldar un acero A-27*. Mexico.

Horwitz, H. (1976). *Soldadura: Aplicaciones y práctica*. In Alfaomega (Primera edición). Alfaomega.

Howard, C. (1992). *Manual de Soldadura moderna*. (E. Jones, Ed.; Segunda Edicion. Vol.2). doi:Prentice-Hall Hispanoamericana

Ingemecánica. (2015). *Características mecánicas del acero*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html>

Jeffus, L. (2012). *Welding Principle and Applications*. In IEEE Transactions on Information.

kesverchile. (2014). *MANUAL SOLDADURA POR ARCO MANUAL*.

Kou, S. (2002). *Welding Metallurgy*. In *Welding Metallurgy*. doi:10.1002/0471434027

Kumar, I. &. (2017). *Efecto del recargue multicapa sobre el comportamiento metalúrgico y de desgaste del acero dulce mediante proceso SMAW*. SJ Impact Factor:6, 887.

Luddey, M. J. (2007). *RECUPERACIÓN DE PIEZAS DESGASTADAS CON RECUBRIMIENTOS PROTECTORES*.

- Luddey, M. J. (2007). RECUPERACION DE PIEZAS DESGASTADAS CON RECUBRIMIENTOS PROTECTORES. *UTP.EDU.COM*.
- Maleque, M. A. (2013). *Mechanical Failure of Materials*. In *SpringerBriefs*.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-4560-38-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-4560-38-2_2).
- Marin, A. (2024). Soldadura SMAW. *Ventajas y desventajas de la soldadura SMAW*.
- Mendoza, J. (2014). Aceros resistentes a la abrasión. In *Avances en Tratamientos Térmicos*, págs. 49–55.
- Montes, F. &. (2021). Parametros de soldadura y su impacto en la calidad del cordon. *Metalurgia y Tecnologia*, 44 - 51.
- Neuman, W. L. (2018). *Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Sage.
- Paredes, D. &. (2023). Analisis de la longitud de arco en procesos SMAW aplicados en aceros aleados. *Ingenieria mecanica aplicada*, 88 - 94.
- Phillips, D. H. (2015). *Welding Engineering: An Introduction*. In *Welding Engineering*.  
[doi:10.1002/9781119191407](https://doi.org/10.1002/9781119191407)
- Radeva, V. (2014). Ciencia De Los Materiales Manual De Prácticas. *Ciencia De Los Materiales Manual De Prácticas*. Instituto Tecnológico De Santo Domingo, Santo Domingo.  
 Obtenido de [https://www.academia.edu/27978069/CIENCIA\\_DE\\_LOS\\_MATERIALES\\_MANUAL\\_DE\\_PR%C3%81CTICAS](https://www.academia.edu/27978069/CIENCIA_DE_LOS_MATERIALES_MANUAL_DE_PR%C3%81CTICAS)
- Rodriguez, L. &. (2022). Evaluacion de la velocidad de avance en soldadura SMAW. *Ciencia y Tecnologia industrial*, 68-75.

- Rodriguez, P. M. (2018)., *Soldadura manual con electrodo revestido* .
- SALAS, V. L. (2024). *TESIS, Resistencia al desgaste del impulsor de una bomba centrífuga artesanal en aceros antiabrasivos con recubrimientos duros mediante el proceso smaw. caso tambopata-madre de dios, UNSAAC, Cusco* .
- Seferian, D. (2011). *Metalurgia de la soldadura*. Editorial Mir.
- Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura*. McGraw-Hill.
- Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura* . Mexico: Hall HIspanoamericana .
- Society., A. W. (2015). *Guide for the visual examination of welds (AWS B1.11M/B1.11:2015)*.
- Stachowiak, G. (2005). *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*. Obtenido de In Wear – Materials, Mechanisms and Practice: <https://doi.org/10.1002/9780470017029>
- Vaca, T. D. (2020). *Estudio de soldabilidad de aceros usados en accesorios de contemplacion de pozos petrolio bajo la norma ASME - BPVC section IX*.
- Zapata, M. A. (2017). Recuperacion de un molino ATOX 32.5 para molienda de caliza por medio de soldadura.

## ANEXOS

## Anexo 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

RECUPERACIÓN DEL ACERO AISI 4145 UTILIZADO COMO ALOJAMINETO EJE PIVOT DE LA PERFORADORA PIT VIPER-271 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW					
PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA	
<p><b>Problema general</b> ¿Será posible la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271 mediante el proceso de soldadura SMAW?</p> <p><b>Específicos</b> <b>PE1:</b> ¿Cómo influirá la intensidad de corriente en la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271? <b>PE2:</b> ¿Cómo influirá la velocidad de soldeo en la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271? <b>PE3:</b> ¿Cómo influirá la longitud de arco en la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Recuperar el acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271 mediante el proceso de soldadura SMAW.</p> <p><b>Específicos</b> <b>OE1:</b> Determinar la intensidad de corriente óptimo para la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271. <b>OE2:</b> Determinar la velocidad de soldeo para la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271. <b>OE3:</b> Determinar la longitud del arco para la recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271.</p>	<p><b>Hipótesis general</b> La recuperación responde a las solicitudes requeridas en el acero AISI 4145 utilizado como alojamiento eje pivot de la perforadora Pit Viper-271 mediante el proceso de soldadura SMAW.</p> <p><b>Específicos</b> <b>H1:</b> La intensidad de corriente utilizada en el proceso de soldadura SMAW afecta directamente la calidad del cordón de soldadura, logrando la recuperación adecuada del acero AISI 4145. <b>H2:</b> La velocidad de soldeo durante la recuperación del acero AISI 4145 determina la homogeneidad y la resistencia de la zona recuperada del alojamiento eje pivot. <b>H3:</b> La longitud del arco influye en la estabilidad del proceso de soldadura y en las propiedades mecánicas finales del acero AISI 4145 recuperado.</p>	<p><b>Dependiente</b> Recuperación del acero AISI 4145 utilizada como alojamiento de la perforadora PIT VIPER-271.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureza</li> <li>• Desgaste</li> </ul> <p><b>Independiente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud de arco.</li> <li>• Intensidad de corriente.</li> <li>• Velocidad de avance.</li> </ul>	<p><b>Tipo de investigación</b> Investigación tecnológica.</p> <p><b>Diseño de investigación</b> • <b>Experimental</b> Diseño factorial completo 2<sup>3</sup> con dos réplicas, tres factores con dos niveles cada uno. 16 corridas considerando para caracterizar del sistema con interacción.</p> <p><b>Nivel de investigación</b> • <b>Descriptiva</b> Define la investigación descriptiva como un enfoque que permite observar y detallar las características, variables y comportamientos de un fenómeno sin manipular las variables. A través de esta metodología, se busca obtener un panorama general que sirva de base para estudios más profundos.</p> <p>• <b>Explicativo</b> Intenta entender las conexiones causales entre estas variables y los resultados alcanzados en los procedimientos de soldadura. Esto permite comprender por qué suceden ciertos sucesos en la recuperación de acero durante la soldadura.</p>	

Nota: Elaboración propia



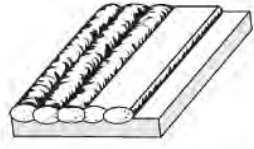


## Anexo 2. MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES



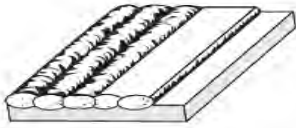
	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Unidades	Instrumentos
Dependiente		Deposición de material de aporte, el tiempo del proceso para obtener dimensiones finales en una pieza metálica desgastada.	Recuperación	Recuperación total.	mm	calibre vernier
<b>Recuperación del acero AISI 4145 utilizado como alojamientos del eje pivot de la perforadora PIT VIPER-271</b>	La recuperación es un proceso de evaluación, reparación y refuerzo de estructuras de metal. La identificación precisa del daño, la selección de materiales adecuados, el uso de técnicas de soldadura y protección contra la corrosión avanzadas. Luddey (2007)	Se emplea una esfera como indicador con un diámetro "D" luego de determina el diámetro "d" de la marca dejada en la superficie después de aplicar una fuerza "F"	Dureza	Diámetro de la huella indicadora	Rockwell (HRC)	Durómetro
Independiente		Calibración en pruebas para un rango de amperaje final.	Rango de Amperaje	Intensidad de corriente	Amperio (A)	Amperímetro digital
<b>Intensidad de corriente</b>	Es la cantidad de electricidad que pasa por el arco eléctrico y que genera calor necesario para soldar. Rodríguez (2018)					
<b>Velocidad de avance</b>	Es la tasa a la que se desplaza el arco a lo largo de la junta que se está soldando. Rodríguez (2018) Es la distancia que hay entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo, puede variar según el tamaño del electrodo y el Angulo de rotación. Rodríguez (2018)	Producto de velocidad de deposición por el tiempo del proceso dividido entre el rendimiento de soldar.	velocidad de avance o desplazamiento	Movimiento lineal del arco	mm/s	cronometro
<b>Longitud de arco</b>		La longitud de arco debe ser equivalente al diámetro del electrodo para soldar	distancia entre electro y material base	Longitud de arco	mm	calibre vernier

Nota: Elaboración propia

### Anexo 3. Especificación Para El Procedimiento De Soldadura (1)

		Facultad de Ingeniería Geológica, minas y metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura							WPS
Institución		UNSAAC			Identificación N°:		Probeta 1
Proceso de soldadura:		SMAW			Soporte PQR N°:		PQR – 01
Tipo:	Manual:	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático	<input type="checkbox"/>	Semiautomático:	<input type="checkbox"/>	Maquina: Miller-XMT 304 CC
Revisión	00	Fecha:	12 /06/2025		Revisado por:	Asesor. Dr. Guillermo Barrios Ruiz.	
Diseño de la junta.				Posición			
Tipo de junta:				Ranura:		Filete:	---
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (Hardfacing)		Plancha:	1G	Tubería:	---
Abertura de raíz:		---		Características eléctricas			
Talón altura de raíz o talón:		---					
Angulo de ranura:		---					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E-11018-G		DC:	----	DCEP	<input checked="" type="checkbox"/>
Limpieza de la raíz:		---		Pulso:	----	DCEN	--
Metal base				Técnica			
Datos	M.B.1			Aportación	Oscilación	---	Recta <input checked="" type="checkbox"/>
Grupo:	1			Pase:	Múltiple	---	Simple <input checked="" type="checkbox"/>
Especificación	AISI 4145			Limpieza en pases	Disco abrasivo.	---	
Grado:	-----			Precalentamiento			
Espesor:	19.05 mm			Temperatura de precalentamiento (°C):			251 °C
Diámetro:	-----			Temperatura interpase:			--
				Postcalentamiento			
				Temperatura	-----	Tiempo:	----
Metal de aporte				Protección			
Especificación:	A5.5			Fundente:	--	Gas:	---
Calificación AWS:	A5.5			Composición	--	Composición	---
Marca:	NAZCA FORT			----	----	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	<b>E-11018-G</b>	1/8"	Dc+	100	24	2.62
Detalles de la junta soldada y EPP							
EPP: Caretas de soldar Respirador con filtro P100 (cartucho rosa) Ropa y guantes de cuero Zapato de seguridad (de soldador) Tapón auditivo							
Elaborado por:	Edison Urbano Huamani Chelquetuma Edgar Quispe Choquepuri			Fecha:	12 /06/2025		
Revisado por:	Asesor: Dr. Guillermo Barrios Ruiz.			Institución:	Ing. Metalúrgica- UNSAAC		



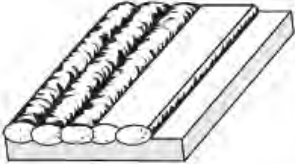
**Anexo 4. Especificación Para El Procedimiento De Soldadura (2)**

		Facultad de Ingeniería Geológica, minas y metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura							WPS
Institución		UNSAAC		Identificación N°:		Probeta 02	
Proceso de soldadura:		SMAW		Soporte PQR N°:		PQR – 02	
Tipo:	Manual:	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático	<input type="checkbox"/>	Semiautomático:	<input type="checkbox"/>	Maquina:
Revisión	00	Fecha:	12 /06/2025		Revisado por:	Asesor Dr. Guillermo Barrios Ruiz.	
Diseño de la junta.			Posición				
Tipo de junta:		Ranura:		---		Filete:	
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (Hardfacing)		Plancha:		1G	
Abertura de raíz:		---		Características eléctricas			
Talón altura de raíz o talón:		---					
Angulo de ranura:		---					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E-11018-G		DC:		---	
Limpieza de la raíz:				Pulso:		DCEN	
Metal base			Técnica				
Datos	M.B.1			Aportación		Oscilación	Recta
Grupo:	1			Pase:		Múltiple	Simple
Especificación	AISI 4145			Limpieza en pases		Disco abrasivo.	
Grado:				Precalentamiento			
Espesor:		19.05 mm		Temperatura de precalentamiento (°C):		251	
Diámetro:				Temperatura interfase:		--	
				Postcalentamiento			
				Temperatura		-----	Tiempo:
						-----	-----
Metal de aporte			Protección				
Especificación:		A5.5		Fundente:		--	Gas:
Calificación AWS:		A5.5		Composición		--	Composición
Marca:		NAZCA FORT					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-11018-G	1/8"	Dc+	110	24	2.80
Detalles de la junta soldada y EPP							
EPP:							
Caretta de soldar							
Respirador con filtro P100 (cartucho rosa)							
Ropa y guantes de cuero (de soldador)							
Zapato de seguridad							
Tapón auditivo							
Elaborado por:	Edison Urbano Huamani Chelququetuma Edgar Quispe Choqqepuri		Fecha:	12 /06/2025			
Revisado por:	Asesor Dr. Guillermo Barrios Ruiz.		Institución:	Ing. Metalúrgica-UNSAAC			



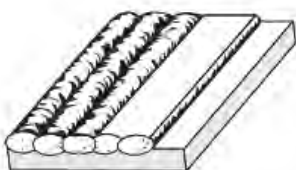
**Anexo 5. Especificación Para El Procedimiento De Soldadura (3)**

		Facultad de Ingeniería Geológica, minas y metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura							WPS
Institución	UNSAAC				Identificación N°:	Probeta 3	
Proceso de soldadura:		SMAW		Soporte PQR N°:		PQR – 03	
Tipo:	Manual:	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático		Semiautomático:	Maquina:	Miller-XMT 304 CC
Revisión	00	Fecha:	12 /06/2025		Revisado por:	asesor Dr. Guillermo Barrios Ruiz.	
Diseño de la junta.				Posición			
Tipo de junta:				Ranura:	---	Filete:	---
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (Hardfacing)		Plancha:	1G	Tubería:	---
Abertura de raíz:		---		Características eléctricas			
Talón altura de raíz o talón:		---					
Angulo de ranura:		---					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E-11018-G		DC:	---	DCEP	<input checked="" type="checkbox"/>
Limpieza de la raíz:		---		Pulso:	---	DCEN	---
Metal base				Técnica			
Datos	M.B.1			Aportación	Oscilación	---	Recta <input checked="" type="checkbox"/>
Grupo:	1			Pase:	Múltiple	---	Simple <input checked="" type="checkbox"/>
Especificación	AISI 4145			Limpieza en pases	Disco abrasivo.		
Grado:		---		Precalentamiento			
Espesor:		19.05 mm		Temperatura de precalentamiento (°C):			251 °C
Diámetro:		---		Temperatura interpose:			--
				Postcalentamiento			
				Temperatura	-----	Tiempo:	-----
Metal de aporte				Protección			
Especificación:		A5.5		Fundente:	--	Gas:	---
Calificación AWS:		A5.5		Composición	--	Composición	---
Marca:		NAZCA FORT				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	<b>E-11018-G</b>	1/8"	Dc+	115	24	2.98
Detalles de la junta soldada y EPP							
EPP: Careta de soldar Respirador con filtro P100 (cartucho rosa) Ropa y guantes de cuero Zapato de seguridad (de soldador) Tapón auditivo							
Elaborado por:	Edison Urbano Huamani		Fecha.		12 /06/2025		
	Chelquetuma Edgar Quispe Choquepuri						
Revisado por:	Asesor: Dr. Guillermo Barrios Ruiz.		Institución:		Ing. Metalúrgica-UNSAAC		



# Anexo 6. Especificación Para El Procedimiento De Soldadura (4)

		Facultad de Ingeniería Geológica, minas y metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura							WPS
Institución		UNSAAC			Identificación N°:		Probeta 4
Proceso de soldadura:		SMAW			Soporte PQR N°:		PQR – 04
Tipo:	Manual:	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático	<input type="checkbox"/>	Semiautomático:	----	Maquina:
Revisión	00	Fecha:	12 /06/2025		Revisado por:	Asesor Dr. Guillermo Barrios Ruiz.	
Diseño de la junta.				Posición			
Tipo de junta:		---		Ranura:		---	
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (Hardfacing)		Plancha:		1G	
Abertura de raíz:		---		Características eléctricas			
Talón altura de raíz o talón:		---					
Angulo de ranura:		---					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E-11018-G		DC:		---	
Limpieza de la raíz:		---		Pulso:		---	
				DCEN		✓	
Metal base				Técnica			
Datos	M.B.1			Aportación		Oscilación	Recta
Grupo:	1			Pase:		Múltiple	Simple
Especificación	AISI 4145			Limpieza en pases		Disco abrasivo.	--
Grado:	---			Precalentamiento			
Espesor:	19.05 mm			Temperatura de precalentamiento (°C):			251 °C
Diámetro:	---			Temperatura interpase:			--
				Postcalentamiento			
				Temperatura		-----	Tiempo:
						-----	-----
Metal de aporte				Protección			
Especificación:		A5.5		Fundente:		--	Gas:
Calificación AWS:		A5.5		Composición		--	Composición
Marca:		NAZCA FORT					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	<b>E-11018-G</b>	1/8"	Dc+	120	24	2.96
Detalles de la junta soldada y EPP							
EPP: Caretta de soldar Respirador con filtro P100 (cartucho rosa) Ropa y guantes de cuero Zapato de seguridad (de soldador) Tapón auditivo							
Elaborado por:	Edison Urbano Huamani Chelqquetuma		Fecha.	12 /06/2025			
	Edgar Quispe Choquepuri						
Revisado por:	Asesor: Dr. Guillermo Barrios Ruiz.		Institución:	Ing. Metalúrgica-UNSAAC			

# Anexo 7. Especificación Para El Procedimiento De Soldadura (5)

		Facultad de Ingeniería Geológica, minas y metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica					
Especificación del procedimiento de soldadura							WPS
Institución		UNSAAC			Identificación N°:		Probeta 5
Proceso de soldadura:		SMAW			Soporte PQR N°:		PQR – 05
Tipo:	Manual:	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático	<input type="checkbox"/>	Semiautomático:	<input type="checkbox"/>	Maquina:
Revisión	00	Fecha:	12 /06/2025		Revisado por:	Asesor Dr. Guillermo Barrios Ruiz.	
Diseño de la junta.				Posición			
Tipo de junta:		--		Ranura:		Filete: ---	
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (Hardfacing)		Plancha:		1G Tubería: ---	
Abertura de raíz:		--		Características eléctricas			
Talón altura de raíz o talón:		--					
Angulo de ranura:		--					
Soporte:		No		Corriente: proceso SMAW			
Material de aporte:		E-11018-G		DC:		---	DCEP <input checked="" type="checkbox"/>
Limpieza de la raíz:				Pulso:		---	DCEN ---
Metal base				Técnica			
Datos	M.B.1		Aportación		Oscilación	Recta	<input checked="" type="checkbox"/>
Grupo:	1		Pase:		Múltiple	Simple	<input checked="" type="checkbox"/>
Especificación	AISI 4145		Limpieza en pases		Disco abrasivo.		
Grado:	----		Precalentamiento				
Espesor:	19.05 mm		Temperatura de precalentamiento (°C):				251
Diámetro:	----		Temperatura interpase:				--
				Postcalentamiento			
				Temperatura	-----	Tiempo:	-----
Metal de aporte				Protección			
Especificación:	A5.5		Fundente:	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5		Composición	--	Composición	---	
Marca:	NAZCA FORT				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-11018-G	1/8"	Dc+	130	24	2.98
Detalles de la junta soldada y EPP							
EPP: Caretas de soldar Respirador con filtro P100 (cartucho rosa) Ropa y guantes de cuero Zapato de seguridad (de soldador) Tapón auditivo							
Elaborado por:	Edison Urbano Huamani Chelququetuma		Fecha.	12 /06/2025			
	Edgar Quispe Choquepuri						
Revisado por:	Asesor: Dr. Guillermo Barrios Ruiz.		Institución:	Ing. Metalúrgica-UNSAAC			

## Anexo 8. Probeta 1

	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	100	Voltaje	24	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.62
Tipo de estudio:	De laboratorio			N° de probeta:		1	
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:		08/07/2025	
Realizado por:	Edison Urbano Huamani Chelqquetuma Edgar Quispe Choquepuri			Asesor:		Dr. Guillermo Barrios Ruiz.	
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. de Ing. Metalúrgica – UNSAAC						
Espesor de la probeta:	19.05 mm	Longitud de la probeta:			114.3 mm		
RESULTADO							
Dureza				22.7 HRC			



## Anexo 9. Probeta 2

	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	110	Voltaje	24	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.80
Tipo de estudio:	De laboratorio			N° de probeta:		2	
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:		08/07/2025	







## Anexo 11. Probeta 4

		<b>FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.</b>							
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>								<b>PQR</b>	
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR</b>									
<b>Proceso de soldado</b>	SMAW	<b>Amperaje</b>	120	<b>Voltaje</b>	24	<b>Vel. de soldeo (mm/seg)</b>	2.96		
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio			<b>N° de probeta:</b>				4	
<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E18			<b>Fecha de elaboración:</b>				08/07/2025	
<b>Realizado por:</b>	Edison Urbano Huamani Chelqquetuma Edgar Quispe Choquepuri			<b>Asesor:</b>				Dr. Guillermo Barrios Ruiz.	
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica – UNSAAC								
<b>Espesor de la probeta:</b>	19.05 mm	<b>Longitud de la probeta:</b>				114.3 mm			
<b>RESULTADO</b>									
<b>Dureza</b>				<b>29.5 HRC</b>					

## Anexo 12. Probeta 5

		<b>FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.</b>							
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>								<b>PQR</b>	
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR</b>									
<b>Proceso de soldado</b>	SMAW	<b>Amperaje</b>	130	<b>Voltaje</b>	24	<b>Vel. de soldeo (mm/seg)</b>	2.98		

<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>N° de probeta:</b>	5
<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E18	<b>Fecha de elaboración:</b>	08/07/2025
<b>Realizado por:</b>	Edison Urbano Huamani Chelqquetuma Edgar Quispe Choquepuri	<b>Asesor:</b>	Dr. Guillermo Barrios Ruiz.
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica – UNSAAC		
<b>Espesor de la probeta:</b>	19.05 mm	<b>Longitud de la probeta:</b>	114.3 mm
<b>RESULTADO</b>			
<b>Dureza</b>	29.9 HRC		

## Anexo 13. Ficha técnica del electrodo E11018-G

# FICHA TÉCNICA



**NAZCA**  
ELECTRODOS PREMIUM SAE

**ELECTRODOS (SMAW)**  
**ELECTRODOS PARA ACERO AL CARBONO Y BAJA ALEACIÓN**

## NAZCA FORT 11018







Electrodo básico de bajo hidrógeno electrodo con un contenido de humedad muy bajo y adecuado para la soldadura de aceros de alta resistencia y baja aleación, a temperatura ambiente o con precalentamiento moderado. El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.



**ARANDA WELDING**



**SOLDEXA**  
UNA COMPAÑÍA ESAB

<b>Clasificaciones:</b>	SFA/AWS A5.5 : E11018-G
<b>Tipo de Corriente:</b>	OCEP
<b>Aplicaciones:</b>	Aceros Tipo T1 A, T1 B, barras de construcción ASTM A815 Gr 70, base de recubrimiento protector en aplicaciones especiales.

**Propiedades Mecánicas Típicas**

Condición	Límite de Fluencia	Resistencia a la tracción	Elongación
Como soldado	780 MPa (min)	830 MPa (min)	20% (min)

**Resultado Charpy**

Condición	Temperatura	Impacto
Como soldado	-40 °C	60 J

**Composición Química (%)**

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0.05	1.61	0.36	2.40	0.40	0.40

**Información Técnica Adicional**

Diámetro	Intensidad de Corriente
3.25 mm (1/8")	100 - 150 A
4.00 mm (5/32")	135 - 200 A
5.00 mm (3/16")	180 - 260 A

**Información para pedidos**

NAZCA FORT 11018 3.25mm 20.00kg LT	0505521
NAZCA FORT 11018 4.00mm 20.00kg LT	0505522
NAZCA FORT 11018 5.00mm 20.00kg LT	0505568



## Anexo 14 Ficha técnica del acero AISI 4145

<b>MATERIAL DATA SHEET</b>	 <b>D.A. COOPER</b> Fullerton Road Rotherham S60 1DH Tel:- 01709 828517 Email:- <a href="mailto:sales@dacooper.co.uk">sales@dacooper.co.uk</a>
<b>AISI/SAE 4145</b>	

Condition of supply:-	<i>As Rolled/Forged, Annealed, Quenched &amp; Tempered</i>
Surface Condition:-	<i>Black, Bright, Proof machined, Machined to Requirements</i>

### Description:

AISI 4145 is a chromium molybdenum alloy steel grade widely used in the oil and gas sectors for down hole applications. Similar to AISI 4140 but with a higher carbon content. 4145 is more popular in larger diameters due to its increased strength and hardenability. AISI 4145 is commonly supplied quenched and tempered with a hardness of between 30 to 36HRC although hardness's of 55-62HRC are achievable.

### Typical Applications:

AISI 4145 is commonly used for a variety of applications in the oil and gas sector. Used often for the manufacture of down hole drilling tools such as drill collars, Drill Bits, tool Joints and Crossovers. Other applications include gear shafts for hydraulic presses, rolls for paper mills, pump shafts and tool holders.

### Typical Chemical Composition:

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	Sn
Min	0.43	0.10	0.85			0.80		0.15		0.01		
Max	0.49	0.35	1.10	<0.045	0.035	1.20	<0.5	0.25	<0.05	0.035	<0.25	<0.035

### Typical Mechanical Properties: At room temp, heat treated to 30-36HRC

	Tensile Strength	Yield (0.2%)	Elongation	Reduction of area	Hardness	Charpy	
	KSI	KSI	%	%	HRC (HB)	RT	-46C
Min		110	15	40	30 (286)	54	27
Max		130			36 (336)		

### Machining

AISI/SAE 4145 is readily machinable allowing processes such as Sawing, Turning, Drilling, Boring and Milling to be relatively easily achieved.

### Welding

Weldability is poor and is often carried out using more sophisticated methods such as Plasma or Electron Beam

### Form of supply:


Material can be supplied as Black As-Rolled/Forged Bar, Proof Machined, Bright Turned or Ground Bar, Cut Pieces or Machined to customer specification.

### Size ranges from:

<35mm diameter - 1150mm diameter



# Anexo 15. Cálculo de carbono equivalente del acero AISI 4145


**Welding Technology  
Information Center**

Chemical Composition Input(wt%)				Carbon Equivalents (wt%)	
C(<0.8)	<input type="text" value="0.45"/>	Mo(<1.0)	<input type="text" value="0.30"/>	CE(IIW)	0.950
Si(<1.5)	<input type="text" value="0.28"/>	V(<0.1)	<input type="text" value="0"/>	CE(WES)	0.959
Mn(<3.0)	<input type="text" value="1.11"/>	Nb(<0.1)	<input type="text" value="0"/>	Pcm	0.605
P(<0.025)		Ti(<0.1)	<input type="text" value="0"/>	CE <sub>en</sub>	0.960
S(<0.025)		Al(<0.1)	<input type="text" value="0.02"/>	Transformation Temp (°C) (Mn<2, Cu<1, Cr<2.5, Mo<0.5)	
Cu(<2.0)	<input type="text" value="0.20"/>	N(<0.01)		Ac3	738.3
Ni(<10.0)	<input type="text" value="0.12"/>	O(<0.01)		Ac1	755.1
Cr(<10.0)	<input type="text" value="1.17"/>	B(<0.003)	<input type="text" value="0"/>	Ms	297.0
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Initialize"/>				May 12, 2007 updated Source code by N.Y	

© The Japan Welding Engineering Society.

*Nota:* Determinación del carbono equivalente con simulador del “Japanese Welding Engineering Society”

Fuente: [https://www-it.jwes.or.jp/weld\\_simulator/en/calc1.jsp](https://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/calc1.jsp)

## Anexo 16. Ficha técnica de la máquina de soldar MILLER XMT 304 CC/CV

# XMT® 304 CC/CV

Issued August 2013 • Index No. DC/18.8

**Multiprocess Welding**  
**Power Source**


## Quick Specs

### Heavy Industrial Applications

Construction  
Shipbuilding  
Railroad  
Truck/Trailer Manufacturing  
Fabrication  
Repair Shops  
Rental Fleets

### Processes

MIG (GMAW)  
Pulsed MIG (GMAW-P)  
Stick (SMAW)  
TIG (GTAW)  
Flux-Cored (FCAW)  
Air Carbon Arc Cutting  
and Gouging (CAC-A)

**Input Power** Requires 3- or 1-Phase Power

**Output Power** 10–35 V, 5–400 A

**Weight** Net: 79.5 lb. (36.1 kg)  
Ship: 88.6 lb. (40.2 kg)

**Wind Tunnel Technology™** protects electrical components and PC boards from contamination.

**Fan-On-Demand™** cooling system operates only when needed, reducing noise, energy use and the amount of contaminants pulled through machine.

**Lift-Arc™** allows TIG starting without the use of high-frequency. Starts the arc without contaminating the weld with tungsten.

**Line voltage compensation** keeps welding output constant even if input power varies by +/-10 percent.

**Adaptive Hot Start™** increases the output amperage at the start of a weld if necessary, eliminating electrode sticking.

**Lightweight, aerospace-grade aluminum case** offers protection with the benefit of reduced weight.



**Inverter arc control technology** provides greater puddle control for superior 6010 Stick electrode performance.

**Large, dual digital meters** are easy to view and are presettable to ease setting weld output.

**Process selector switch** reduces the number of control setup combinations without reducing any features.

**Optional 115 VAC auxiliary power** provides 10 amps of circuit-breaker-protected power for water circulators, etc.

**Pulsed MIG capabilities with optional Optima control** reduces spatter and distortion, allows better out-of-position puddle control, and provides potential reduction of fume particle emission.

## Specifications (Subject to change without notice.)




Input Power	Rated Output at 60% Duty Cycle	Voltage Range in CV Mode	Amperage Range in CC Mode	Max. Open-Circuit Voltage	Amps Input at Rated Load Output, 60 Hz, 208 V 230 V 400 V 460 V 575 V KVA KW							Dimensions	Weight
Three-Phase	300 A at 32 VDC	10–35 V	5–400 A	90 VDC	33.7	30.5	17	18.9	15.2	12.2	11.6	H: 17 in. (432 mm) W: 12.5 in. (318 mm) D: 24 in. (610 mm)	79.5 lb. (36.1 kg)
Single-Phase	225 A at 29 VDC	10–35 V	5–400 A	90 VDC	52.4	47.4	—	24.5	—	11.3	7.6		

# Anexo 17. Ficha técnica del durómetro digital portátil #HDT-L411 INSIZE


DATA  
OUTPUT

INSPECTION  
CERTIFICATE


**PEN-TYPE LEEB HARDNESS TESTER (BASIC TYPE)**  
**CODE HDT-L411**




software flash disk  
(included)



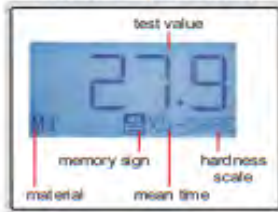
hardness test  
block D (included)



small support ring  
(included)




can choose large font display




test value  
memory sign  
material  
mean time  
hardness scale

software (included), upload the memory to PC, print and send to EXCEL

upload the memory to PC software via USB cable



send the stored data to EXCEL



- Impact device D
- Universal testing angle, no need to set impact direction
- Dual-coil probe, high accuracy
- Based on Leeb (HLD), converted to Vickers (HV), Brinell (HB), Rockwell (HRC, HRA and HRB), Shore (HS) and tensile strength (SGM)
- Dual value display, shows both Leeb and converted hardness
- High contrast digital LCD display
- Can choose large font display
- Automatically calculate maximum, minimum, average value
- Connected to PC via USB
- Save 999 data
- Operation temperature: -20°C~45°C
- According to ASTM A956, DIN 50156, GB/T 17394

## SPECIFICATION

Resolution	1HLD, 1HV, 1HB, 0.1HRC, 0.1HRB, 0.1HRA, 0.1HS, 1SGM	
Accuracy	±6HLD (when HLD=800)	
Output	USB	
Measuring range	HL100-960, HRC1-74.7, HRB1.2-140, HB28-1027, HV45-1230, HS4-112, HRA7-88.5, SGM (N/mm²) 118-3315N/mm²	
Applicable workpiece	minimum weight	5kg (direct measurement) 2kg (on solid support) 0.05kg (coupled on plate)
	minimum thickness	5mm
	minimum radius of curved surface	30mm
	maximum roughness (Ra)	2µm
Power supply	1xAAA battery	
Dimension	148×45×21mm	
Weight	105g	

## STANDARD DELIVERY

Main unit	1 pc
Hardness test block D	1 pc
Cleaning brush	1 pc
AAA battery	1 pc
Small support ring	1 pc
Software flash disk and USB cable	1 pc

## OPTIONAL ACCESSORY

Support rings	page 706
Hardness test block D	HDT-B-HLD3



**Fotografía del proceso de soldeo y desbaste de las probetas del acero AISI 4145 con electrodo E11018G**



**Fotografía de la medición de la dureza con el durómetro digital portátil #HDT-1411 INSIZE**

