

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



---

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL CALOR NETO EN LA MICROESTRUCTURA DEL ZAC DEL  
ACERO AISI 4340 SOLDADO POR EL PROCESO SMAW. (Investigación Tecnológica)

---

**Tesis presentada por los**

**Bachilleres:**

GUILLEN OROS, Ruth Betsa.

HANCCO NAYHUA, Dina.

**Para optar al Título Profesional de:**  
Ingeniero Metalúrgico.

**Asesor:**

Ing. Leonardo Avilés Hinojosa.

CUSCO – PERÚ

2021

## DEDICATORIA

A Dios,

Por darme siempre las fuerzas para continuar en lo adverso, por guiar mi camino por el sendero de lo sensato y darme sabiduría en las situaciones difíciles y por estar conmigo en cada momento de mi vida, cuidándome y dándome fortaleza.

A mi madre Antonia Oros Ccapa

Por ser mi pilar fundamental y apoyo en mi formación académica, por brindarme su amor, comprensión y educación. Mama gracias por tu paciencia y sabios consejos a lo largo de toda mi vida, eres mi orgullo y mi principal motivación para lograr mis objetivos en mi vida profesional. Gracias por todo.

A mi padre Andrés Guillen Huayhua.

Por siempre desear y anhelar lo mejor para mí. Gracias por tus consejos y sabias palabras que me diste en momentos difíciles me ayudaron a seguir adelante.

A mis Hermanos Kevin y Aneliz, por su apoyo incondicional en todo momento, son una motivación más para seguir por el camino correcto.

A mi tía Saturnina Oros y prima Isbel Arriola que me brindaron su apoyo y buenos consejos durante mi formación universitaria.

A una persona especial Werner González, por brindarme su apoyo incondicional y motivarme en momentos difíciles haciendo posible que se logre esta meta.

A toda mi familia y amigos que pusieron un granito de arena para hacer posible este sueño anhelado. Gracias a todos

Guillen Oros, Ruth Betsa

## DEDICATORIA

*A Dios,*

Por brindarme salud, sabiduría y perseverancia y por estar conmigo en cada momento, por fortalecer mi corazón y siempre guiarme por el buen camino.

*A mi padre Sabino Hanco,*

Por ser buen padre, luchador, trabajador que me impulsa a seguir mis sueños y por creer en mí siempre. Papá gracias por darme siempre un gran apoyo emocional, económico, aconsejarme y alentarme con un “tú puedes” en todos los aspectos de mi vida. Lo que soy, te lo debo a ti, tú eres mi motor y motivo para lograr todos mis objetivos y también por enseñarme a luchar, sobre todo, por los caminos difíciles, dejándome claro que “el que quiere ser, es”, con sabiduría, perseverancia y liderazgo, como lo hiciste tú. Gracias por todo papa, te amo.

*A mis familiares,*

A mis abuelos: José Cirilo Hanco, Gabina Usca, por brindarme su apoyo, sus consejos y enseñarme los buenos modales, gracias por cuidarme desde el cielo. A mis abuelos: Justo Nayhua, Juana Ayala que valoro mucho, gracias por sus grandes consejos y la forma de ver la vida con optimismo y alegría, gracias.

*A una persona especial,*

Ing. Alfredo Paucar Marquina por apoyarme y brindarme sus conocimientos, experiencias, por su paciencia y transmitirme sus ganas de superación te admiro y gracias por todo.

Dina Hanco Nayhua.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por todo lo otorgado, por la protección diaria y por permitirnos alcanzar nuestros sueños.

A la Tricentenaria Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por ser nuestra casa de estudios superiores.

A la Facultad de Ingeniería Geología, Minas y Metalúrgica, en particular a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por ende, nuestra alma mater.

A todos los Docentes, por ser parte de nuestra formación universitaria. Al Ing. Leonardo Avilés Hinojosa, por ser nuestro asesor y por guiarnos en la elaboración y culminación de la tesis. También nuestro agradecimiento al Mgt. Ing. Julio Farfán Yépez por permitirnos el acceso al laboratorio de metalurgia física y compartir sus conocimientos.

Al Ing. Raúl Allauca Sierra, gerente propietario de la empresa CEM INGENIEROS por facilitarnos el uso de su laboratorio.

Al Ing. Alfredo Paucar Marquina, por permitirnos acceder al laboratorio de control de calidad del instituto superior SENATI y compartir su conocimiento y experiencias.

A nuestros padres y amistades que contribuyeron para la conclusión de este trabajo.

Ruth Betsa Guillen Oros.

Dina Hancoo Nayhua.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
PRESENTACIÓN.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
SIMBOLOGIA.....	xviii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Formulación del problema .....	2
<b>1.2.1. Problema general.</b> .....	2
<b>1.2.2. Problemas específicos.</b> .....	3
<b>1.3. Objetivos de la investigación</b> .....	3
<b>1.3.1. Objetivo general.</b> .....	3
<b>1.3.2. Objetivos específicos.</b> .....	3
1.4. Justificación e importancia .....	4
<b>1.4.1. Justificación tecnológica.</b> .....	4
<b>1.4.2. Justificación social.</b> .....	4
<b>1.4.3. Justificación económica</b> .....	4
<b>1.4.4. Justificación ambiental</b> .....	4
<b>1.4.5. Limitaciones de la investigación</b> .....	4
1.5. Hipótesis .....	5
<b>1.5.1. Hipótesis general</b> .....	5
<b>1.5.2. Hipótesis específicas.</b> .....	5
1.6. Variables .....	5

<b>1.6.1. Variables dependientes.</b> .....	5
<b>1.6.2. Variables independientes.</b> .....	6
1.6.3. Variables intervinientes. ....	7
CAPITULO II .....	8
MARCO TEORICO .....	8
2.1. Antecedentes de la investigación.....	8
<b>2.1.1. Antecedentes internacionales.</b> .....	8
<b>2.1.2. Antecedentes nacionales.</b> .....	9
2.2. El acero .....	9
<b>2.2.1. Clasificación de los aceros según norma AISI- SAE.</b> .....	10
2.3. Acero AISI/SAE 4340 .....	11
<b>2.3.1. Características</b> .....	12
<b>2.3.2. Tratamiento térmico y proceso del acero AISI/SAE 4340.</b> .....	15
2.4. Proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW).....	17
<b>2.4.1. Variables de soldeo</b> .....	20
2.5. Equipos de soldeo para el proceso SMAW .....	25
2.6. Tipos de electrodos .....	26
<b>2.6.1. Funciones del revestimiento</b> .....	28
<b>2.6.2. Tipos de revestimiento</b> .....	29
<b>2.6.3. Aplicaciones del soldeo con electrodos revestidos.</b> .....	32
2.7. Tipos de juntas .....	35
2.8. Posiciones de soldadura .....	36
2.9. Zonas metalúrgicas de la soldadura. ....	38
<b>2.9.1. Zona de fusión (ZF).</b> .....	38
<b>2.9.2. Zona afectada por el calor (ZAC).</b> .....	39
<b>2.9.3. Metal base (MB).</b> .....	39
2.10. Ciclo térmico de la soldadura .....	39
<b>2.10.1. Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura por arco.</b> .....	44
<b>2.10.2. Ecuación de la temperatura máxima en cada punto de la ZAC.</b> .....	46
2.11. Ecuación de la velocidad de enfriamiento para chapas gruesas y delgadas .....	48
2.12. Tiempo de solidificación .....	51
2.13. Temperatura de precalentamiento (método de Seferian).....	51

2.14. Carbono equivalente .....	52
<b>2.14.1. Formulas del carbono equivalente (CE)</b> .....	53
<b>2.14.2. Utilización del diagrama de Graville para evaluar la soldabilidad de los aceros</b> .....	58
2.15. Dilución .....	60
<b>2.15.1. Variables de soldadura que afectan la dilución</b> .....	63
2.16. Composición química del cordón de soldadura .....	66
2.17. Control de calidad de las soldaduras .....	66
<b>2.17.1. Ensayos destructivos en uniones soldadas</b> .....	67
2.18. Las discontinuidades en soldadura .....	72
<b>2.18.1. Discontinuidades superficiales</b> .....	72
<b>2.18.2. Discontinuidades internas</b> .....	77
<b>2.18.3. Discontinuidades como inclusiones</b> .....	81
CAPITULO III .....	86
METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....	86
3.1. Nivel o tipo de investigación .....	86
<b>3.1.1. Tipo de investigacion</b> .....	86
<b>3.1.2. Nivel de investigacion</b> .....	86
<b>3.1.3. Sistemas y procesos identificados</b> .....	87
<b>3.1.4. Protocolo de desarrollo de experimentos</b> .....	88
<b>3.1.5. Diseño de la experimentacion</b> .....	89
3.2. Población y muestra.....	94
<b>3.2.1. Población</b> .....	94
<b>3.2.2. Muestra</b> .....	94
3.3. Técnicas e instrumentos de colecta de datos .....	94
<b>3.3.1. Técnica</b> .....	94
<b>3.3.2. Instrumentos</b> .....	94
<b>3.3.3. Viabilidad</b> .....	95
CAPITULO IV.....	96
ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	96
4.1. Equipos y materiales utilizados en la investigación .....	96
<b>4.1.1. Equipos para la experimentación</b> .....	96
4.2. Probetas objeto de investigación .....	106

4.3.	Soldabilidad de las probetas .....	108
4.3.1.	<i>Condiciones de soldabilidad de las probetas.</i> .....	108
4.3.2.	<i>Cálculo de carbono equivalente.</i> .....	109
4.3.3.	<i>Cálculo de la temperatura de precalentamiento para el acero AISI 4340 (método de Seferian)</i> .....	110
4.4.	Parámetros de las variables para soldadura .....	111
4.5.	Cálculos realizados .....	113
4.5.1.	<i>Cálculo del calor neto.</i> .....	113
3.1.1.	Cálculo del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) .....	115
4.6.	Control de calidad de las probetas .....	119
4.6.1.	<i>Inspección visual de las probetas soldadas</i> .....	119
4.6.2.	<i>Cálculo de la composición química del depósito soldadura (Probeta seleccionada N° 4)</i> .....	120
4.6.3.	<i>Cálculo de la dilución.</i> .....	121
4.6.4.	<i>Cálculo de la temperatura máxima.</i> .....	123
4.6.5.	<i>Cálculo de la velocidad de enfriamiento</i> .....	125
4.6.6.	<i>Ensayo metalográfico.</i> .....	127
4.6.7.	<i>Control de calidad de Prueba de dureza.</i> .....	131
4.6.8.	<i>Control de calidad de Prueba de Charpy.</i> .....	132
CAPITULO V	.....	134
RESULTADOS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS	.....	134
5.1.	Inspección visual .....	134
5.2.	Análisis metalográfico .....	135
5.2.1.	<i>Análisis e interpretación para el acero AISI 4340</i> .....	135
5.2.2.	<i>Análisis e interpretación en el depósito de la soldadura con el electrodo E 312-16</i> .....	135
5.2.3.	<i>Análisis e interpretación para 50% de la ZAC (9.14 mm), soldado con el electrodo E 312-16</i> .....	136
5.2.4.	<i>Análisis e interpretación para 25% de la ZAC (4.57 mm), soldado con el electrodo E 312-16</i> .....	137
5.3.	Calor Neto .....	138
5.3.1.	<i>Presentación de resultados de calor neto</i> .....	138
5.3.2.	<i>Análisis e interpretación de resultados de calor neto en la ZAC para el acero AISI 4340</i> .....	140



5.4. Control de calidad de prueba de Charpy y Prueba de Dureza .....	145
<b>5.4.1. Presentación de resultados del ensayo de charpy y de dureza.</b> .....	146
5.5. Interpretación de resultados del cálculo de dilución.....	148
5.6. Composición química del depósito de soldadura. ....	148
CONCLUSIONES .....	150
RECOMENDACIONES .....	152
BIBLIOGRAFIA.....	153
MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	158

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Variables dependientes</i> .....	6
<b>Tabla 2</b> Variables independientes.....	6
<b>Tabla 3</b> Variables intervinientes.....	7
<b>Tabla 4</b> Límites de porcentaje de carbono en aceros y fundiciones .....	10
<b>Tabla 5</b> Composición química.....	12
<b>Tabla 6</b> Propiedades mecánicas del acero AISI 4340, en estado temple-revenido .....	12
<b>Tabla 7</b> Tratamientos térmicos a que son sometidos el acero AISI 4340 .....	13
<b>Tabla 8</b> Comparación entre corriente continua y corriente alterna. ....	24
<b>Tabla 9</b> Eficiencia térmica de diferentes procesos de soldadura .....	45
<b>Tabla 10</b> Niveles de dilución de los procesos de soldadura .....	62
<b>Tabla 11</b> Escalas de ensayo de dureza.....	69
<b>Tabla 12</b> Variables independientes.....	89
<b>Tabla 13</b> Niveles de prueba de los factores del diseño experimental.....	91
<b>Tabla 14</b> Planteamiento del diseño factorial $2^3$ con dos replicas (orden de las pruebas experimentales) .....	92
<b>Tabla 15</b> Características técnicas .....	96
<b>Tabla 16</b> Características técnicas .....	97
<b>Tabla 17</b> Características técnicas del equipo del durómetro Rockwell.....	98
<b>Tabla 18</b> Características técnicas del péndulo de Charpy .....	99
<b>Tabla 19</b> Características técnicas del desbastador metalográfico .....	100
<b>Tabla 20</b> Característica Microscopio metalográfico .....	101
<b>Tabla 21</b> Herramientas e Instrumentos menores. ....	102
<b>Tabla 22</b> Composición química del acero ASTM AISI 4340 .....	103
<b>Tabla 23</b> Propiedades mecánicas del acero AISI 4340 .....	104
<b>Tabla 24</b> Análisis químico del electrodo E 312-16.....	105
<b>Tabla 25</b> Análisis químico del electrodo E 309Mo-16.....	105
<b>Tabla 26</b> Propiedades mecánicas del electrodo E 312-16.....	106
<b>Tabla 27</b> Propiedades mecánicas del electrodo E 309Mo-16.....	106
<b>Tabla 28</b> Características de las probetas.....	107
<b>Tabla 29</b> Nomenclatura de la junta.....	108

<b>Tabla 30</b> Condiciones de soldabilidad.....	109
<b>Tabla 31</b> Determinación del carbono equivalente (CE) .....	109
<b>Tabla 32</b> Parámetros de soldabilidad.....	112
<b>Tabla 33</b> Valores de calor neto. ....	115
<b>Tabla 34</b> Ancho de la ZAC.....	118
<b>Tabla 35</b> Resultados del examen visual.....	120
<b>Tabla 36</b> Composiciones químicas del acero AISI 4340 y del electrodo E312 – 16. ....	122
<b>Tabla 37</b> Cálculo de la composición química del depósito de soldadura. ....	123
<b>Tabla 38</b> Composición química del depósito .....	123
<b>Tabla 39</b> Resumen del cálculo de la velocidad de enfriamiento. ....	127
<b>Tabla 40</b> Resultados de la dureza y tipo de microestructura .....	132
<b>Tabla 41</b> Resultados del ensayo de impacto Charpy .....	133
<b>Tabla 42</b> Resultados de la inspección visual.....	134
<b>Tabla 43</b> Presentación de resultados de calor neto.....	139
<b>Tabla 44</b> Resultados de calor neto obtenidas para la ZAC en el acero AISI 4340 .....	140
<b>Tabla 45</b> ANOVA para los datos de calor neto de la ZAC en el acero AISI 4340 .....	142
<b>Tabla 46</b> Resultados del ensayo de impacto Charpy y de la dureza (HRC).....	146
<b>Tabla 47</b> Resultados de la composición química del depósito de soldadura con el electrodo E 312-16.....	149

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Circuito del proceso SMAW .....	18
<b>Figura 2</b> Portaelectrodo .....	26
<b>Figura 3</b> Electrodo revestido .....	28
<b>Figura 4</b> Traslape.....	36
<b>Figura 5</b> Atope.....	36
<b>Figura 6</b> De esquina .....	<b>36</b>
<b>Figura 7</b> De borde.....	36
<b>Figura 8</b> Tipo T .....	36
<b>Figura 9</b> Posiciones de las soldaduras según ANSI/AWSA 3.0-8 .....	37
<b>Figura 10</b> Zonas de la soldadura. ....	38
<b>Figura 11</b> Distribución de la temperatura.....	40
<b>Figura 12</b> Ciclo térmico de soldeo .....	41
<b>Figura 13</b> Distribución de temperaturas en una sección transversal cualquiera .....	43
<b>Figura 14</b> Curvas isoterma en una plancha sometida a soldadura a tope .....	44
<b>Figura 15</b> Temperatura máxima de la ZAC a una distancia Y.....	46
<b>Figura 16</b> Gráfico de Seferian.....	57
<b>Figura 17</b> Zonas que indican los grados de soldabilidad. ....	59
<b>Figura 18</b> Diagrama de Graville.....	59
<b>Figura 19</b> Zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución.....	61
<b>Figura 20</b> Tipos de oscilación y su efecto en el cordón de soldadura.....	64
<b>Figura 21</b> Efecto de la velocidad de avance sobre la dilución .....	65
<b>Figura 22</b> Cono de diamante .....	70
<b>Figura 23</b> Exceso de penetración .....	72
<b>Figura 24</b> Falta de penetración.....	73
<b>Figura 25</b> Concavidad externa .....	74
<b>Figura 26</b> Concavidad interna .....	74
<b>Figura 27</b> Socavaduras o mordeduras de borde .....	75
<b>Figura 28</b> Quemado .....	75
<b>Figura 29</b> Salpicaduras de metal. ....	76
<b>Figura 30</b> Falta de continuidad del cordón.....	76
<b>Figura 31</b> Fisuras longitudinales .....	77

<b>Figura 32</b> Fisuras transversales .....	78
<b>Figura 33</b> Fisura de interrupción.....	78
<b>Figura 34</b> Fisuras en la zona afectada por el calor. ....	79
<b>Figura 35</b> Falta de penetración. ....	79
<b>Figura 36</b> Falta de fusión.....	80
<b>Figura 37</b> Falta de fusión.....	81
<b>Figura 38</b> Inclusiones gaseosas. ....	81
<b>Figura 39</b> Porosidad agrupada. ....	82
<b>Figura 40</b> Porosidad alineada .....	82
<b>Figura 41</b> Inclusiones no metálicas. ....	83
<b>Figura 42</b> Inclusión de escoria aisladas.....	83
<b>Figura 43</b> Escorias alineadas. ....	84
<b>Figura 44</b> Desalineado.....	85
<b>Figura 45</b> Sistemas y procesos identificados .....	87
<b>Figura 46</b> Muestra el protocolo que se siguió en la metodología experimental.....	88
<b>Figura 47</b> Diseño factorial $2^3$ y su representación geométrica .....	93
<b>Figura 48</b> Maquina cepilladora .....	97
<b>Figura 49</b> Fuente de poder.....	98
<b>Figura 50</b> Pulidor metalográfico. ....	100
<b>Figura 51</b> Acero AISI 4340.....	103
<b>Figura 52</b> Probetas de acero AISI 4340 .....	107
<b>Figura 53</b> Nomenclatura de la junta .....	108
<b>Figura 54</b> Soldabilidad de las probetas. ....	112
<b>Figura 55</b> Probetas soldadas.....	119
<b>Figura 56</b> Probeta soldada atacada con el reactivo AGUA REGIA.....	121
<b>Figura 57</b> Dimensiones de la sección transversal de la probeta.....	121
<b>Figura 58</b> Desbaste de las probetas. ....	127
<b>Figura 59</b> Pulido de probetas.....	128
<b>Figura 60</b> Materiales e insumos usados en el ataque químico. ....	129
<b>Figura 61</b> Probetas después del ataque químico .....	130
<b>Figura 62</b> Observación de las microestructuras con el microscopio.....	130
<b>Figura 63</b> Probeta para la prueba de dureza. ....	131

<b>Figura 64</b> Esquema de barrido de dureza .....	131
<b>Figura 65</b> Dimensiones de las probetas, para el ensayo de Charpy .....	132
<b>Figura 66</b> Microestructura del acero AISI 4340 a 100X y 500X .....	135
<b>Figura 67</b> Microestructuras en el depósito de la soldadura con el electrodo E 312-16 .....	136
<b>Figura 68</b> Microestructuras para 50% de la ZAC (9.14 mm), soldado con el electrodo E 312-16 .....	136
<b>Figura 69</b> Microestructuras para 25% de la ZAC (4.57 mm), soldado con el electrodo E 312-16 .....	137
<b>Figura 70</b> Diagrama de Pareto de efectos .....	143
<b>Figura 71</b> Superficie de calor neto vs ángulo de avance, material de aporte .....	144
<b>Figura 72</b> Grafica de cubo y respuesta predicha para el calor neto de la ZAC del acero AISI 4340 .....	145
<b>Figura 73</b> Superficie de la probeta rota por el ensayo Charpy .....	147

## PRESENTACIÓN

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

Señores Docentes Miembros del Jurado:

Cumpliendo con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra disposición la tesis colectiva intitulada:

“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL CALOR NETO EN LA MICROESTRUCTURA DEL ZAC DEL ACERO AISI 4340 SOLDADO POR EL PROCESO SMAW” (Investigación tecnológica).

Es un estudio de la soldabilidad de aceros bonificados y que será de gran utilidad para todos aquellos profesionales y técnicos que se dedican a la recuperación por soldadura.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar la influencia del calor neto en la microestructura del acero AISI 4340 soldado por el proceso SMAW, con el fin de alargar la vida útil de las piezas de maquinarias pesadas hasta que sean cambiadas por nuevas. En ese sentido se formuló la siguiente hipótesis: El calor neto aplicado en la soldabilidad del acero AISI 4340, por el proceso SMAW produce cambio en su microestructura. La metodología empleada es de tipo experimental y de carácter explicativo. Para el estudio se usaron 8 probetas, cada una soldada con diferentes parámetros de soldadura empleando los electrodos AWS E 312-16 y E 309 Mo-16 en una pasada, de las cuales se seleccionó una, la que fue objeto de estudio. Se realizó el ensayo de dureza a las 8 probetas, con el fin de determinar su dureza de cada probeta soldada. Además, se realizó el ensayo de Charpy; con el propósito de ver su resistencia, tenacidad al impacto, que presentan. De la misma forma, los resultados del ensayo de Charpy y del ensayo metalográfico, junto con los resultados del cálculo de calor neto, ancho de la ZAC, temperatura máxima y la dilución, comprobaron la influencia del calor neto en la microestructura del acero AISI 4340 soldado por el proceso SMAW. En la prueba de dureza se verificó una cierta diferencia entre la probeta soldada y el metal base, alcanzando un ligero aumento de dureza en el depósito de soldadura. Con respecto al examen metalográfico se puede manifestar que también hay un cambio de microestructura, pero esta microestructura incidirá muy poco en el trabajo posterior de la pieza recuperada. Estas características encontradas hacen que dichos componentes recuperados pueden ser reutilizados en el trabajo industrial lo que conlleva a beneficios económicos ventajosos.

### PALABRA CLAVE:

Influencia del calor neto en la microestructura del acero AISI 4340, proceso SMAW.



## ABSTRACT

The present research work aims to determine the influence of net heat on the microstructure of AISI 4340 steel welded by the SMAW process, in order to extend the useful life of heavy machinery parts until they are changed for new ones. In this sense, the following hypothesis was formulated: The net heat applied in the weldability of AISI 4340 steel, by the SMAW process, does produce a change in its microstructure. The methodology used is experimental and explanatory in nature. For the study, 8 specimens were used, each one welded with different welding parameters using the AWS E 312-16 y E 309 Mo-16 electrode in three passes, of which one was selected, which was the object of study. The hardness test was carried out on the 8 specimens, in order to determine their hardness for each welded specimen. In addition, the Charpy test was performed; in order to see their resistance, toughness on impact, which they present. In the same way, the results of the Charpy test and the metallographic test, together with the results of the calculation of net heat, HAZ width, maximum temperature and dilution, verified the influence of net heat on the microstructure of AISI 4340 steel. Welded by the SMAW process. In the hardness test, a certain difference was verified between the welded specimen and the base metal, achieving a slight increase in hardness in the weld deposit. With respect to the metallographic examination, it can be stated that there is also a change in the microstructure, but this microstructure will have little effect on the subsequent work of the recovered piece. These characteristics found mean that said recovered components can be reused in industrial work, which leads to advantageous economic benefits.

### KEYWORD:

Influence of net heat on the microstructure of AISI 4340 steel, SMAW process.

## SIMBOLOGIA

SAE	= Sociedad de ingenieros automotores (Society of automotive engineers).
AISI	= Instituto Americano del hierro y acero (American Iron and Steel Institute)
SMAW	= Shield metal arc welding (soldadura por arco electrodo revestido)
AWS	= Sociedad americana de soldadura (American Welding Society)
mm	= Milimetro.
MIG	= Soldadura gas inerte (Metal inert gas)
MAG	= Soldadura gas active
TIG	= Tungsteno inerte gas
CC	= Corriente continúa.
CA	= Corriente alterna.
ANSI	= Instituto americano de normas nacionales (American national standards institute)
ZF	= Zona de fusión.
ZAC	= Zona afectada por el calor.
MB	= Metal base.
H	= Energía de soldeo, en J/mm
V	= Voltios.
A	= Amperios

V	= Velocidad de soldeo.
T <sub>max</sub>	= Temperatura máxima
T <sub>0</sub>	= Temperatura inicial de la chapa.
T <sub>m</sub>	= Temperatura de fusión o Temperatura del liquidus del metal a soldar.
C	= Calor específico del metal sólido.
H <sub>net</sub>	= Energía aportada neta.
T	= Espesor de la chapa a soldar.
P	= Densidad del material (g/mm <sup>3</sup> )
ρC	= Calor específico volumétrico.
Y	= Ancho de la zona afectada térmicamente.
R	= Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura
K	= Conductividad térmica del metal
R	= Espesor relativo de la chapa.
St	= Tiempo de solidificación.
L	= Calor de fusión
C <sub>s</sub>	= Carbono equivalente del espesor.
e	= Espesor de la pieza.
C <sub>e</sub>	= Carbono equivalente químico.

Tp	= Temperatura de precalentamiento.
CE	= Carbono equivalente.
%	= Porcentaje.
CDEN	= Corriente directa electrodo al polo negativo.
CDEP	= Corriente directa electrodo al polo positivo.
XW	= Porcentaje promedio del elemento X en el depósito de soldadura
XA	= Porcentaje promedio del elemento X en el metal base A
XB	= Porcentaje promedio del elemento X en el metal base B
DA	= Porcentaje de dilución del metal base A, expresado en decimal
DB	= Porcentaje de dilución del metal base B, expresado en decimal
DT	= Porcentaje de dilución total, expresado en decimal
HRC	= Dureza Rockwell C
h	= Altura
ASTM	= Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se refiere a la Influencia del calor neto en la microestructura del acero AISI 4340 por el proceso SMAW, se ha centrado en la recuperación de piezas de maquinarias pesadas como: los pines, dientes de engranaje de tractor oruga, excavadoras; ya que estas, están sometidos a grandes esfuerzos con el constante trabajo que realizan, debido a ello presentan grietas que al detectarse inicialmente se pueden recuperar a través del proceso de soldadura SMAW; esto con el fin de alargar la vida útil de estas piezas hasta que sean cambiadas por nuevas piezas, es decir, que la junta soldada debe poseer la misma composición química y las mismas propiedades mecánicas a lo largo de todo el metal base. Las causas del presente trabajo de investigación parten de la diferencia en composición química y en propiedades mecánicas, del metal base del acero AISI 4340 y el material de aporte, E 312-16 y E309Mo-16. Tomando en cuenta que el acero AISI 4340 se trata de un acero especial al Cr-Ni-Mo, de gran resistencia y baja aleación tratable térmicamente de la más alta tenacidad y altamente resistente a la tracción. La investigación de esta problemática se realizó con el interés de alargar la vida útil de las piezas de maquinarias pesadas, hasta que sean cambiadas por nuevas piezas. Así mismo, se realizó ensayos de control de calidad a las probetas soldadas y también se incluyeron, ensayo de dureza, el ensayo de impacto Charpy y el ensayo metalográfico. De esta manera, se hizo un estudio de tipo experimental y de nivel explicativo.

El trabajo, se divide en capítulos: el primer capítulo trata del planteamiento y formulación del problema junto con la proposición de los objetivos de la investigación; en el segundo capítulo se describieron los antecedentes, las bases teóricas; en el tercer capítulo se explicó con detalle la metodología de la investigación; en el capítulo cuarto se realizó los ensayos experimentales y por último se analizó e interpreto los resultados de la investigación, y formulando las conclusiones.

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1.Planteamiento del problema

En las diversas industrias se utilizan diferentes tipos de maquinarias, los cuales llevan consigo piezas que deben reunir ciertas características mecánicas, como una alta dureza y sometidas a altos esfuerzos dinámicos. Estas piezas son suministradas en la forma de acero (temple +revenido). Este tipo de acero se aplican en las siguientes piezas: ejes, engranes y pines.

El proceso de recuperación por soldadura de estas piezas es muy complicado, dado que son aceros que previamente han sido templados y revenidos, de tal manera que el calor neto influye de manera significativa en la soldabilidad del acero AISI 4340, ya que depende de la intensidad de corriente, donde un bajo aporte de calor producirá un alto grado de sobre enfriamiento, debido a ello se originaran cambios en la dureza y cuando el aporte de calor es mayor provocara la formación de diversas microestructuras en ZAC, así como también altera las propiedades mecánicas en la ZAC . En nuestra ciudad, los técnicos efectúan la soldabilidad de estos aceros como si fuera un acero al carbono, produciéndose una deficiente soldadura por el uso inadecuado de material de aporte, causando de esta manera colapsamiento de estas piezas.

#### 1.2.Formulación del problema

##### *1.2.1. Problema general.*

¿El calor neto aportado por soldadura mediante el proceso SMAW en el acero AISI 4340, determinara un cambio microestructural y por ende un cambio en sus propiedades mecánicas?

### **1.2.2. Problemas específicos.**

#### *1.2.2.1. Problema específico 1.*

¿Cómo influye la intensidad de corriente en la microestructura del acero AISI 4340?

#### *1.2.2.2. Problema específico 2*

¿Cómo influye la intensidad de corriente en la dureza del acero AISI 4340?

#### *1.2.2.3. Problema específico 3*

¿Cómo influye la intensidad de corriente adecuada en la soldabilidad del acero AISI 4340?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Determinar si el calor neto aplicado por soldadura mediante el proceso SMAW produce un cambio en la microestructura en la ZAC y por ende en sus propiedades mecánicas del acero AISI 4340.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

O.E. 1

Determinar la influencia de la intensidad de corriente en la microestructura en la ZAC del depósito de soldadura.

O.E. 2

Determinar la influencia de la intensidad de corriente en las propiedades mecánicas, tales como la dureza.

O.E.3

Determinar la influencia de la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero AISI 4340.

## **1.4. Justificación e importancia**

### ***1.4.1. Justificación tecnológica.***

En el aspecto tecnológico, permitirá desarrollar una técnica muy poca conocida en nuestro medio el cual permitirá recuperar componentes de diversas piezas de la industria automotriz con ventajas tecnológicas. Teniendo en cuenta que existen pocos estudios a nivel regional y nacional que aborden el estudio de la soldabilidad del acero AISI 4340.

### ***1.4.2. Justificación social.***

Permitirá capacitar a todas las personas que se dedican al campo de la soldadura, lo que permitirá ampliar el mercado ocupacional, que contribuirá a mejorar la calidad de vida.

### ***1.4.3. Justificación económica***

Contribuirá en el ahorro de recursos económicos para las empresas y los técnicos soldadores, porque permitirá recuperar piezas que tengan más horas de trabajo.

### ***1.4.4. Justificación ambiental***

Permitirá la reducción de desechos sólidos (metálicos), lo cual contribuirá en la reducción de la contaminación del medio ambiente.

### ***1.4.5. Limitaciones de la investigación***

Una de las limitaciones fue conseguir los electrodos para esta investigación en el ámbito local, debido a ello recurrimos a indagar sobre posibles empresas que comercializan este tipo de electrodos en el ámbito nacional (LIMA) que tengan composición similar al acero AISI 4340.



Otra limitación fue conseguir el ácido clorhídrico concentrado para preparar agua regia, en vista que las probetas soldadas se resistieron al ataque químico con el reactivo nital al 5% y 10%.

Por último, no fue posible verificar la composición química del acero AISI 4340, ya que no contamos con un microscopio electrónico.

## **1.5.Hipótesis**

### ***1.5.1. Hipótesis general***

El calor neto aplicado en la soldabilidad del acero AISI 4340, por el proceso SMAW produce cambio en su microestructura.

### ***1.5.2. Hipótesis específicas.***

H.E. 1

La intensidad de corriente influye de manera significativa en la microestructura acero AISI 4340.

H.E.2

La intensidad de corriente influye de una manera significativa en las propiedades mecánicas del acero AISI 4340.

H.E.3

La intensidad de corriente influye de manera significativa en la soldabilidad del acero AISI 4340.

## **1.6.Variables**

### ***1.6.1. Variables dependientes.***

Las variables dependientes se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1***Variables dependientes*

Variables dependientes	Indicadores
Calor neto Aportado	J/mm
Tipo de microestructura	Tamaño de grano, morfología, porcentaje de microconstituyentes

**1.6.2. Variables independientes.**

Las variables independientes se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2***Variables independientes*

Variables independientes	Indicadores
Tensión de corriente	Voltios (V)
Intensidad de Corriente	Amperios (A)
Tipo de electrodo	EXXXX
Angulo de avance del electrodo	Grados sexagesimales

### ***1.6.3. Variables intervinientes.***

Las variables intervinientes se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Variables intervinientes*

Variable interviniente o externa	Indicadores
Temperatura ambiental	18 °C
Veloc. de soldeo	mm/min.
Composición química del metal base	%

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales.

Se encontraron los siguientes trabajos que se relacionan a la soldadura de los aceros AISI 4340:

DOMINIOS MAGNÉTICOS EN PIEZAS DE ACERO AISI 4340 SOLDADO CON ELECTRODOS REVESTIDOS, presentado a la institución superior minero metalúrgico(Cuba), que tuvo como objetivo determinar el calor aportado para cada uno de los electrodos empleados en el proceso de soldadura de la ballesta, atendiendo la temperatura de precalentamiento para el electrodo E-7018 y las consideraciones de los electrodos UTP 65 Y E-316-12 por el diagrama de Scheffler. (Ruíz Magaña, 2016), que dio como resultados la dureza de 498 HB, que permiten predecir una estructura con mayor fragilidad para el electrodo E7018 y tuvo como conclusión que este proceso de soldadura para el acero AISI 4340 se debe realizar por arco sumergido y se debe de aplicar la temperatura de precalentamiento antes de la soldadura.

TRANSFORMACIONES MICROESTRUCTURALES EN LA SOLDADURA DE UN ACERO EMPLEADO PARA FABRICAR MOLDES Y TROQUELES, presentado a la institución superior minero metalúrgico (Cuba), que tuvo como objetivo determinar después de la soldabilidad, las trasformaciones que ocurre en la sección transversal y longitudinal del cordón de soldadura del acero martensítico AISI 4340 empleado en la fabricación de moldes y troqueles, que dio como

resultado que el electrodo que presenta mejor continuidad metalúrgica en la soldadura es el UTP 65, procedido del E7018 (tratado térmicamente) y por último el E312-16 y tuvo como conclusión que las zonas formadas por el ciclo térmico son diferentes para cada uno de los electrodos siendo la más favorable la UTP 65 que presenta la martensita y la austenita retenida.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales.**

Proceso de nitruración gaseosa en los aceros SAE 4340, SAE 4140, SAE 0 – 1, SAE 1045, presentado a la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAYOR DE SAN MARCOS; cuyo objetivo fue saber el proceso de nitruración en estos aceros y conocer las propiedades alcanzadas por los aceros seleccionados en el proceso de la nitruración gaseosa a 560°C y con un tiempo de 6 horas de proceso y como resultado dio de las pruebas de micro dureza, los aceros con mayor porcentaje de elementos aleantes son el SAE 4140 y el SAE 4340, es decir tienen mayor dureza que el SAE 1045 y SAE 0-1, y como conclusión se tuvo que la nitruración se realiza a temperatura más baja (560°C) que la eutectoide (590°C), por lo tanto la capa nitrurada tiene una estructura compleja y está constituida por sub capas.

## **2.2. El acero**

El término acero sirve comúnmente para denominar, una mezcla de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,008 % y el 2,11 % en masa de su composición. Si la aleación posee una concentración de carbono mayor del 1,8 %, se denominan fundiciones.

**Tabla 4***Límites de porcentaje de carbono en aceros y fundiciones*

$0 < C < 2\%$	$\%C > 2\%$
Aceros	Fundiciones

Fuente: Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, José Apraiz Barreiro, 1978

### **2.2.1. Clasificación de los aceros según norma AISI- SAE.**

- Los aceros se clasifican en:
- 10XX Aceros al carbono.
- 11XX Aceros al carbono, altos en azufre y bajos en fósforo
- 12XX Aceros al carbono, altos en azufre y altos en fósforo
- 13XX Aceros al manganeso, de 1,60 a 1,90% de Mn
- 23XX Aceros al níquel, de aproximadamente 3,5% de Ni
- 25XX Aceros al níquel, de aproximadamente 5% de Ni
- 31XX Aceros al níquel- cromo, de aproximadamente 1,25% de Ni y 0,60% de Cr
- 32XX Aceros al níquel- cromo, de aproximadamente 1,75% de Ni y 1% de Cr
- 33XX Aceros al níquel- cromo, de aproximadamente 3,5% de Ni y 1,50% de Cr
- 40XX Aceros al molibdeno, de aproximadamente 0,25% de Mo
- 41XX Aceros al cromo- molibdeno, de aproximadamente 1% de Cr y 0,25% de Mo
- 43XX Aceros al níquel- cromo- molibdeno
- 46XX Aceros al níquel- molibdeno, de aproximadamente 75% de Ni y 0,25% de

Mo

- 48XX Aceros al níquel- molibdeno, de aproximadamente 3,50% de Ni y 0,25% de Mo
- 51XX Aceros al cromo, de aproximadamente 0,80% de Cr
- 52XX Aceros al cromo, de aproximadamente 1,50% de Cr
- 61XX Aceros al cromo- vanadio
- 86XX Aceros al cromo- níquel- molibdeno, de aproximadamente 0,55% de Ni, 0,50% de Cr y 0,20% de Mo
- 87XX Aceros al cromo- níquel- molibdeno, de aproximadamente 0,55% de Ni, 0,50% de Cr y 0,25% de Mo.
- 92XX Aceros al manganeso, silicio, de aproximadamente 0,80% de Mn y 2,00% de Si
- 93XX Aceros al níquel- cromo- molibdeno, de aproximadamente 3,25% de Ni, 1,20% de Cr y 0,12% de Mo.
- 98XX Aceros al níquel- cromo- molibdeno, de aproximadamente 1% de Ni, 0,80% de Cr y 0,25% de Mo.

### 2.3. Acero AISI/SAE 4340

Es un acero aleado al cromo-níquel-molibdeno. Este acero está inmerso dentro de los aceros denominados “aceros bonificados”. Los aceros bonificados (bonificar: templar y revenir), son tanto aceros aleados como no aleados, que normalmente, tienen un contenido de 0.25 a 0.60 % de carbono. Especialmente aptos para el temple, presentan propiedades mecánicas específicas después del revenido (por ejemplo, resistencia a la tracción deseada con buena tenacidad) que en estado normalizado no existen. En parte se suministra en estado recocido y se bonifican con un fin concreto, o el acero se suministra en estado templado y revenido, llamado prebonificado (Quenched and tempered “QT”).

### 2.3.1. Características

#### a) Composición química (porcentaje en peso)

En la tabla 5, se observa la composición química del acero AISI 4340.

**Tabla 5**

#### Composición química

%C	% SI	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni
0.30- 0.43	0.15- 0.35	0.60- 0.80	0.035	0.040	0.80- 1.10	0.20- 0.30	1.65- 2.00

Fuente: file:///C:/Users/PERU/Desktop/Reyes/acero-maquinaria.htm

#### b) Propiedades mecánicas

En la tabla 6, se observa las propiedades mecánicas del acero AISI 4340.

**Tabla 6**

#### Propiedades mecánicas del acero AISI 4340, en estado temple-revenido

Diámetro mm.		Límite de fluencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción N/mm <sup>2</sup>	Elongación (Lo = 5d) % mín.	Estricción % mín.	Resiliencia según DVM Joule
desde	hasta					
	16	980	1180 - 1380	9	40	41
16	40	885	1080 - 1280	10	45	48
40	100	785	980 - 1180	11	50	48
100	160	685	880 - 1080	12	55	48
160	250	590	780 - 930	13	55	48

Fuente: catalogo BHOLER – VOESTALPINE



c) *Tratamientos térmicos recomendados (Valores EN °C)*

En la tabla se señalan los tratamientos térmicos a que son sometidos el acero AISI 4340.

**Tabla 7**

*Tratamientos térmicos a que son sometidos el acero AISI 4340*

Forjado	Normalizado	Recocido		Templado	Revenido	°T Crítica aproximada	
		Ablanda/.	Regeneración			Ac1	Ac3
1050-1200	870 - 900	650 - 700	815 - 850 Enfriar en horno	820-850 Aceite	540 - 650	720	770

Fuente: Catalogo BHOLER – VOESTALPINE

d) *Propiedades*

- Conserva la dureza y resistencia a alta temperatura, debido al cromo, manganeso y molibdeno.
- Mejora la resistencia al desgaste de la superficie endurecida y la tenacidad del núcleo debido a cromo, níquel, molibdeno y manganeso.
- Tienen alta templabilidad hasta en medidas grandes proporcionada por el cromo, níquel, manganeso y molibdeno.
- Son menos susceptibles al fragilizado, debido al revenido, lo que permite recocerlo a altas temperaturas para eliminar tensiones debido al efecto del cromo, níquel y molibdeno.
- Altamente resistente a la tracción, torsión y a cambios de flexión, debido al efecto del manganeso, molibdeno y carbono.
- Puede utilizarse para trabajo en caliente ( $T^{\circ}$  menores a  $400^{\circ}\text{C}$ ).
- Insensible al sobrecalentamiento en el forjado y libre de propensión a rotura por revenido, debido al cromo, níquel y manganeso.
- Acero de baja aleación al Cromo, Níquel, Molibdeno.
- Posee gran templabilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga.
- Se suministra con tratamiento térmico de bonificado (temple y revenido).
- Se utiliza en piezas que están sometidas a grandes exigencias de dureza, resistencia mecánica y tenacidad.
- Su maquinabilidad es regular y posee baja soldabilidad.

e) *Aplicaciones*

- Se utiliza en la industria aeronáutica, especialmente para las partes estructurales del ensamble de las alas, fuselaje y tren de aterrizaje, ejes para hélices de aviones.
- Partes de maquinaria y repuestos de mayores dimensiones sometidos a altos esfuerzos dinámicos como pernos y tuercas de alta tensión.
- En la industria automotriz, en la fabricación de cigüeñales, ejes de leva, arboles de transmisión, barras de torsión, ejes, cardan, ejes de bombas, tornillos sin fin, rodillos transportadores, vástagos, pines brazos de dirección, discos de embrague.
- En matrices de grandes masas, para estampar en caliente (como bielas y cigüeñales).

**2.3.2. Tratamiento térmico y proceso del acero AISI/SAE 4340.**

El acero AISI 4340 se somete a los siguientes tratamientos térmicos:

- *Alivio de estrés*

Para el acero endurecido previamente, el alivio de la tensión se logra calentando el acero 4340 a entre 500 y 550 ° C. Calentar a 600 ° C – 650 ° C, mantener hasta que la temperatura sea uniforme en toda la sección, sumergir durante 1 hora por sección de 25 mm y enfriar en aire quieto.

- *Trabajo en frío*

El acero aleado AISI 4340 se puede trabajar en frío utilizando todos los métodos convencionales en estado recocido. Tiene alta ductilidad.

- *Recocido*

Se puede realizar un recocido completo a 844 ° C (1550 F) seguido de un enfriamiento controlado (horno) a una velocidad no superior a 10 ° C (50 F) por hora hasta 315 ° C (600 F). A partir de 315 ° C 600 F, puede enfriarse con aire.

- *Templado*

El acero aleado SAE 4340 debe estar en condiciones de tratamiento térmico o normalizado y tratado térmicamente antes del revenido. La temperatura de revenido depende del nivel de resistencia deseado. Para niveles de resistencia en el rango de temperatura de 260-280 ksi a 232 ° C (450 F). Para resistencia en el rango de temperatura de 125-200 ksi a 510 ° C (950 F). Y no temple los aceros 4340 si está en el rango de resistencia de 220 – 260 ksi, ya que el temple puede provocar la degradación de la resistencia al impacto para este nivel de resistencia. Se debe evitar el temple si es posible dentro del rango de 250 ° C a 450 ° C debido a la fragilidad del temple.

- *Nitruración*

El acero de aleación 4340 endurecido y templado también puede nitrurarse, lo que proporciona una dureza superficial de hasta Rc 60. Calientelo a 500 ° C – 530 ° C y manténgalo durante el tiempo suficiente (de 10 a 60 horas) para desarrollar la profundidad de la carcasa. La nitruración debe ir seguida de un enfriamiento lento (sin enfriamiento) que reduce el problema de la distorsión. Por lo tanto, los materiales de grado nitrurado 4340 pueden mecanizarse hasta un tamaño casi final, dejando solo un pequeño margen de

molienda. La resistencia a la tracción del núcleo del material de acero 4340 generalmente no se ve afectada ya que el rango de temperatura de nitruración generalmente está por debajo de la temperatura de templeado original empleada.

La dureza de la superficie alcanzable es de 600 a 650HV.

#### **2.4. Proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)**

Jeffus (2009) dice SMAW es un proceso de soldadura que utiliza un fundente cubierto de electrodo de metal para transportar corriente eléctrica. La corriente forma un arco a través de la abertura entre el extremo del electrodo y de la pieza (p.48).

##### *a) Principios del proceso*

En esencia, el procedimiento consiste en el establecimiento de un circuito eléctrico cerrado que requiere una fuente de corriente adecuada dotado de dos terminales, uno de ellos conectado por medio de un cable a una porta electrodo, en cuya pinza se sujeta un electrodo revestido; el otro terminal se conecta, a su vez, a través de un cable de retorno y una pinza de masa, a la pieza. El circuito se cierra a través del arco que salta entre el extremo del electrodo y el punto de soldeo en la pieza.

El proceso se inicia con el cebado del arco<sup>1</sup>, operación consistente en tocar, por brevísimos instantes, la pieza con el extremo libre del electrodo, cerrándose durante ese corto tiempo el circuito. El paso de corriente genera, el calentamiento del punto de contacto y de las zonas inmediatas, particularmente el extremo del electrodo. La temperatura alcanzada por éste puede llegar a la de incandescencia, a pesar del corto tiempo de contacto, siendo suficiente para que, una vez separado el extremo del

---

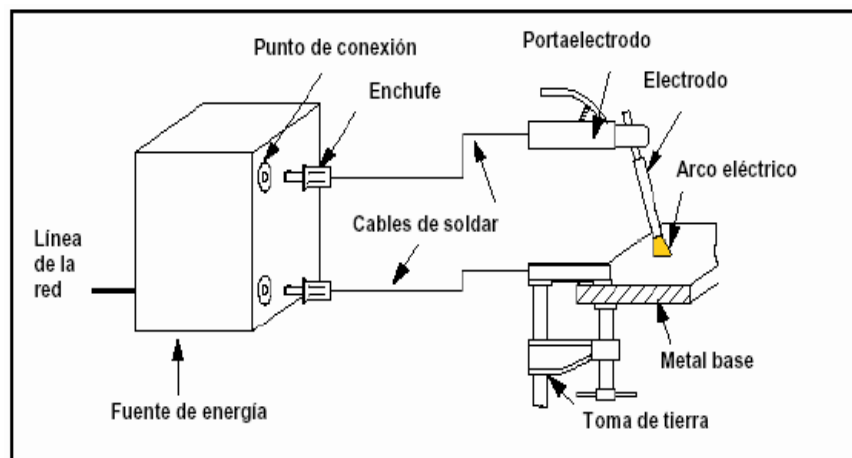
<sup>1</sup> Cebado del arco es el encendido inicial del arco eléctrico, producido propiciando un breve contacto entre el electrodo y la pieza a soldar.

electrodo de la pieza, el metal del extremo libre del mismo produzca una fuerte emisión de electrones que se aceleran por la tensión, chocan con los electrones de otros átomos del medio gaseoso, a los que expulsa de sus órbitas, lo cual genera una atmósfera ionizada en su entorno que permite el paso de corriente a través del aire, con lo que, a los electrones emitidos por el electrodo incandescente se suma el torrente de electrones conducido por ésta, que se proyectan sobre el ánodo, provocando su fusión parcial y produciéndose así el salto del arco.

El arco eleva extraordinariamente la temperatura, muy por encima de la de fusión del metal; temperaturas del orden de  $5000^{\circ}\text{C}$  son normales en cualquier arco de forma que, tanto el extremo del electrodo como la zona afectada por el arco en el metal base, se funden. Del extremo del electrodo se desprenden pequeñas gotas de metal fundido, que se proyectan sobre el metal de base fundido, mezclándose con él y formando lo que se denomina baño de fusión.

**Figura 1**

*Circuito del proceso SMAW*



Fuente: Larry Jeffus "Welding Principles and applications", 1<sup>o</sup> Ed. (2009)

b) *Protección del arco*

El arco eleva extraordinariamente la temperatura, muy por encima de la de fusión del metal, son normales en cualquier arco de forma que, tanto el extremo del electrodo como la zona afectada por el arco en el metal base, se funden. Del extremo del electrodo se desprenden pequeñas gotas de metal fundido, que se proyectan sobre el metal de base también fundido, mezclándose con él y formando lo que se denomina baño de fusión.

c) *Ventajas y limitaciones del soldeo por arco con electrodos revestidos*

- Ventajas:
  - El equipo de soldeo es relativamente sencillo, no muy caro y portátil.
  - El metal de aportación y los medios para su protección durante el soldeo proceden del propio electrodo revestido. No es necesaria protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares.
  - Es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa. No obstante, el proceso debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve.
  - Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos y en locales cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
  - Es aplicable para una gran variedad de espesores, en general mayores de 2 mm.

- Es aplicable a la mayoría de los metales y aleaciones de uso normal.
- Limitaciones:
  - Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos.
  - Requiere gran habilidad por parte del soldador
  - No es aplicable a metales de bajo punto de fusión como plomo, estaño y cinc, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos.  
Tampoco es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el titanio, zirconio, tántalo y niobio, ya que la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura.
  - No es aplicable a espesores inferiores a 1.5 – 2 mm.
  - La tasa de deposición es inferior a la obtenida por los procesos que utilizan electrodo continuo, como el soldeo con alambre tubular o soldeo MIG / MAG. Esto se debe a que el electrodo solo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 5 cm), cuando se llega a dicha longitud el soldador tiene que retirar la colilla del electrodo no consumida e insertar un nuevo electrodo.

Aunque en teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1.5 mm, el proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 mm.

#### **2.4.1. Variables de soldeo**

- *Diámetro del electrodo*

En general, se deberá seleccionar el mayor diámetro posible que asegure los



requisitos de aporte térmico y que permita su fácil utilización, en función de la posición, el espesor del material y el tipo de unión, que son los parámetros de los que depende la selección del diámetro del electrodo.

Asimismo, en el soldeo con pasadas múltiples el cordón de raíz conviene efectuarlo con un electrodo de pequeño diámetro, para conseguir el mayor acercamiento posible del arco al fondo de la unión y asegurar una buena penetración, se utilizarán electrodos de mayor diámetro para completar la unión.

El aporte térmico depende, directamente de la intensidad, tensión del arco y velocidad de desplazamiento, parámetros dependientes del diámetro del electrodo; siendo mayor cuanto mayor es el diámetro del mismo, en las aplicaciones o materiales donde se requiera que el aporte térmico sea bajo se deberán utilizar electrodos de pequeño diámetro.

En general, se deberán emplear:

- Electrodos de poco diámetro (2, 2.5, 3.25, 4 mm) en: punteado, uniones de piezas de poco espesor, primeras pasadas, soldaduras en posición cornisa, vertical y bajo techo y cuando se requiera que el aporte térmico sea bajo.
- Electrodos de mayores diámetros para: uniones de piezas de espesores medios y gruesos, soldaduras en posición plana y recargues.
- La utilización de grandes diámetros puede dar lugar a un cordón de soldadura excesivo, innecesario y costoso económicamente, pudiendo también actuar como concentrador de tensiones debido a un perfil inadecuado.

- *Intensidad de soldeo*

Cada electrodo, en función de su diámetro, posee un rango de intensidades en el que puede utilizarse, en ningún caso se deben utilizar intensidades por encima

de ese rango ya que se producirían mordeduras, proyecciones, intensificación de los efectos del soplo magnético e incluso grietas. La intensidad a utilizar depende de la posición de soldeo y del tipo de unión.

- *Longitud de arco*

La longitud del arco a utilizar depende del tipo de electrodo, su diámetro, la posición de soldeo y la intensidad. En general, debe ser igual al diámetro del electrodo, excepto cuando se emplee el electrodo de tipo básico, que deberá ser igual a la mitad de su diámetro.

Es conveniente mantener siempre la misma longitud del arco, con objeto de evitar oscilaciones en la tensión e intensidad de la corriente y con ello una penetración desigual.

Un arco demasiado corto puede ser errático y producir corto circuitos durante la transferencia de metal, un arco demasiado largo perderá direccionalidad e intensidad, además el gas y el fundente generados por el revestimiento no son tan eficaces para la protección del arco y del metal de soldadura, por lo que se puede producir porosidad y contaminación del metal de soldadura con oxígeno e hidrógeno.

- *Velocidad de desplazamiento*

La velocidad de desplazamiento durante el soldeo debe ajustarse de tal forma que el arco adelante ligeramente al baño de fusión. Cuanto mayor es la velocidad de desplazamiento menor es la anchura del cordón, menor es el aporte térmico y más rápidamente se enfriará la soldadura. Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el

atrapamiento de gases (produciéndose poros).

Según vamos aumentando la velocidad de soldeo, el cordón se va haciendo más estrecho y va aumentando la penetración hasta un cierto punto a partir del cual aumento en la velocidad traen como consecuencia una disminución de la penetración, debido a que el calor apuntado no, es suficiente para conseguir una mayor penetración.

Con una baja velocidad el cordón será ancho y convexo y poca penetración, debido a que el arco reside demasiado tiempo sobre el metal depositado, (efecto “colchón”), en vez de concentrarse sobre el metal base.

Así mismo, recordar que la velocidad de soldeo afecta al calor suministrando a la unión por medio de velocidad de enfriamiento y por lo tanto a su estructura metalúrgica final y como consecuencia directa a sus propiedades mecánicas finales (carga, rotura, impacto y durezas).

- *Tipo de corriente*

El soldeo por arco con electrodos revestidos se puede realizar tanto con corriente alterna como con corriente continua, la elección dependerá del tipo de fuente de energía disponible, del electrodo a utilizar y del material base. En la tabla 8, se muestra una comparación entre corriente alterna y corriente alterna.

En cuanto a la polaridad con corriente continua depende del material a soldar y del electrodo empleado, sin embargo, se recuerda que se obtienen mayor penetración con polaridad inversa.

**Tabla 8**

*Comparación entre corriente continua y corriente alterna.*

Parámetros	Corriente Continua	Corriente Alterna
Soldeo a gran distancia de la fuente de energía		Preferible
Soldeo con electrodos de pequeño diámetro que requieren bajas intensidades de soldeo	La operación resulta más fácil	Si no se actúa con gran precaución se puede deteriorar el material debido a la dificultad de encendido de Arco
Cebado del arco	Resulta más fácil	Más difícil en especial cuando se emplean electrodos de pequeño diámetro.
Mantenimiento del arco	Más fácil por la mayor estabilidad	Más difícil, excepto cuando se emplean electrodos de gran rendimiento.
Soplo magnético	Puede resultar un problema en el soldeo de materiales ferromagnéticos.	No se presentan problemas
Posiciones de soldeo	Se prefiere en el soldeo en posiciones vertical y bajo techo porque deben utilizarse intensidades bajas	Si se utilizan los electrodos adecuados, se pueden realizar soldaduras en cualquier posición
Tipo de electrodo	Se puede emplear con cualquier tipo de electrodo	No se puede utilizar con todos los electrodos. El revestimiento debe contener sustancias que reestablezcan el Arco.
Espesor de la pinza	Se prefiere para espesores delgados.	Se prefiere para espesores gruesos ya que se puede utilizar un electrodo de mayor diámetro y mayor intensidad, con lo que se consiguen mayores rendimientos.

Fuente: Cabrera Sandoval H.L. "la soldadura en el mantenimiento industrial", bibliografía

U.N.M.S.M. Lima – Perú

## 2.5. Equipos de soldeo para el proceso SMAW

### a) Fuentes de energía

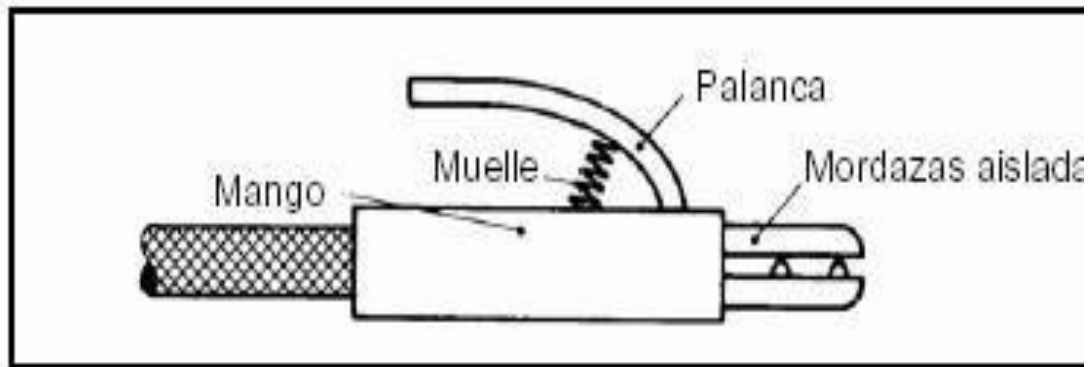
Para la generación del arco, su control y manejo, se requiere un equipo específico.

La fuente de energía es el elemento que se encarga de transformar y/o convertir la corriente eléctrica de la red en otra alterna o continua, con una tensión e intensidad adecuadas para la formación y estabilización del arco eléctrico. Dichas fuentes de energía son máquinas eléctricas que, según sus estructuras, reciben el nombre de transformadores, rectificadores o convertidores.

### b) Portaelectrodo

Tiene la misión de conducir la electricidad al electrodo y sujetarlo. Para evitar un sobrecalentamiento en las mordazas, éstas deben mantenerse en perfecto estado; un sobrecalentamiento se traduciría en una disminución de la calidad y dificulta la ejecución del soldeo. Se debe seleccionar siempre el portaelectrodos adecuado para el diámetro de electrodo que se vaya a utilizar.

En la figura se representa un portaelectrodo típico. En la figura 2, se muestra la nomenclatura de un portaelectrodo.

**Figura 2***Portaelectrodo*

Fuente: Cabrera Sandoval H.L. "La soldadura en el mantenimiento industrial", Bibliografía

U.N.M.S.M. Lima – Perú.

*c) Conexión de masa*

La conexión correcta del cable de masa es una consideración de importancia. La situación del cable es de especial relevancia en el soldeo con corriente continua. Una situación incorrecta puede provocar el soplo magnético, dificultando el control del arco.

Más aún, el método de sujetar el cable también es importante. Un cable mal sujeto no proporcionará un contacto eléctrico consistente y la conexión se calentará, pudiendo producirse una interrupción en el circuito y la desaparición del arco.

## **2.6. Tipos de electrodos**

El elemento fundamental para la soldadura manual es el electrodo, que soporta el arco y que, al consumirse, produce la aportación del material que, unido al material fundido del metal base, va a constituir el material soldado. El electrodo está básicamente constituido por un alambre, de composición similar al del metal base, con o sin un revestimiento que lo envuelve. De acuerdo con esta última condición, los electrodos

se clasifican en dos grupos: electrodos desnudos y electrodos revestidos.

a) *Electrodos desnudos*

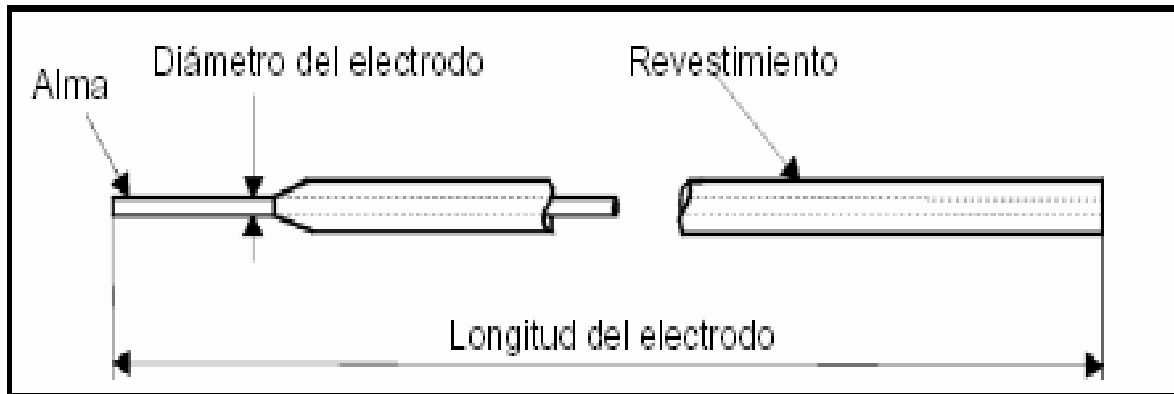
Salvo para uniones de muy poca responsabilidad y en piezas de acero dulce, los electrodos desnudos no se utilizan, ya que las soldaduras obtenidas tienen muy malas cualidades mecánicas.

El arco absorbe los componentes del aire y los incorpora al baño fundido por lo que el metal soldado presenta gran cantidad de óxidos, nitruros, poros y escorias que le confieren esas malas cualidades mecánicas. Es muy difícil mantener el arco, siendo imposible hacerlo con corriente alterna.

b) *Electrodos revestidos*

Los electrodos revestidos tienen la siguiente estructura, mostrada en la figura 3:

- Un alambre de sección circular uniforme, denominado alma, de composición normalmente similar a la del metal base.
- El revestimiento que es un cilindro que envuelve el alma, concéntrica con ella y de espesor uniforme, constituido por una mezcla de compuestos que caracterizan el electrodo y que cumple varias funciones, las cuales evitan los inconvenientes del electrodo desnudo.

**Figura 3***Electrodo revestido*

Fuente: Cabrera Sandoval H.L. “La soldadura en el mantenimiento industrial”, Bibliografía U.N.M.S.M. Lima – Perú.

Los electrodos tienen longitudes normalizadas de 150, 200, 250, 300, 350 y 450mm, en función del diámetro del electrodo. Un extremo del alma está sin cubrir de revestimiento, en una longitud de 20 a 30 mm, para la inserción del mismo en la pinza de la portaelectrodo.

### **2.6.1. Funciones del revestimiento**

Las funciones básicas que debe cumplir un revestimiento son:

- Asegurar la estabilización del arco.
- Proteger al metal fundido de su contacto con el aire, tanto en el trayecto de las gotas fundidas a lo largo del arco, mediante gases que lo envuelvan, como en el baño de fusión, mediante la formación de una capa de escoria que lo recubra.
- Eliminar o reducir las impurezas en el interior de la soldadura, mediante el barrido de las mismas, por medio de la escoria.



- Aportar elementos aleantes a la soldadura, que suplan las pérdidas ocasionadas por la alta temperatura y/o que comuniquen a la misma las cualidades mecánicas deseadas.
- Asegurar un enfriamiento suave de la soldadura, a fin de obtener un mejor comportamiento mecánico de la misma.

### **2.6.2. Tipos de revestimiento**

Prácticamente en todos los electrodos revestidos se utiliza un acero de la misma composición para la fabricación del alma, por lo cual, lo que caracteriza las distintas clases de electrodo son los revestimientos.

De acuerdo con los compuestos que forman parte de los revestimientos y la proporción en que están presentes, los electrodos se comportan de distinta forma, de tal manera que, según la aplicación que se quiera hacer de ellos y, en función de las características de la unión, espesores, tipo de preparación, posición de la soldadura, geometría de la unión, composición del metal, etc., pueden elegirse el tipo de electrodos y los parámetros adecuados para la soldadura. En general, podemos decir que los electrodos se seleccionan por su calidad, economía y facilidad de manejo, principalmente.

El revestimiento se clasifica en función de su composición, ya que ésta determinará sus cualidades y aplicaciones, agrupándose y designándose como sigue:

#### *a) Electrodo ácido*

- *Composición del revestimiento:* óxidos de hierro y manganeso.
- *Características de la escoria:* bastante fluida, de aspecto poroso y abundante.
- *Ventajas:* la velocidad de fusión es bastante elevada, así como la penetración.

Se puede utilizar con intensidades elevadas.

- *Limitaciones:* sólo se puede utilizar con metales base con buena soldabilidad, contenidos muy bajos de azufre, fósforo y carbono, de lo contrario puede presentarse fisuración en caliente ya que los componentes del revestimiento no son capaces de extraer el azufre y el fósforo como pueden hacerlo los revestimientos básicos.
- *Posición:* especialmente indicados para posición plana, pero pueden utilizarse también en otras posiciones.
- *Tipo de corriente:* C.C. y C.A.

b) *Electrodos de rutilo*

- *Composición del revestimiento:* rutilo (óxidos de titanio).
- *Características de la escoria:* es muy densa y viscosa.
- *Ventajas:* fácil cebado y manejo del arco. Fusión del electrodo suave. Cordón de soldadura muy regular y de buen aspecto.
- *Posición:* todas. Especialmente adecuado para soldar en posición vertical y bajo techo gracias a las características de su escoria.
- *Aplicaciones:* Es el electrodo más comúnmente utilizado.
- *Tipo de corriente:* C.A. y C.C.

c) *Electrodos rutilo-ácido*

- *Composición del revestimiento:* óxido de hierro o de manganeso y rutilo (óxido

de titanio). Sus propiedades son similares a los electrodos de tipo ácido, aunque son más manejables, porque mantienen mejor el arco debido a la presencia del óxido de titanio.

d) *Electrodos de tipo rutilo grueso*

- Iguales que los de rutilo, pero con revestimiento más grueso.

e) *Electrodos básicos*

- *Composición del revestimiento:* carbonato cálcico y otros carbonatos también básicos.
- *Características de la escoria:* es densa, no muy abundante, de color pardo oscuro y brillante, se separa fácilmente y asciende con facilidad por lo que se reduce el riesgo de inclusiones de escoria.
- *Ventajas:* metal de soldadura muy resistente a la fisuración en caliente. Son de bajo contenido en hidrógeno (el metal depositado tendrá bajo contenido en hidrógeno) lo que reduce la fisuración en frío.
- *Limitaciones:* su manejo es algo dificultoso, debiéndose emplear con un arco muy corto y con intensidades poco altas. Son muy higroscópicos (absorben humedad con gran facilidad), por lo que es necesario mantenerlos en paquetes herméticamente cerrados y conservados en recintos adecuados para mantenerlos perfectamente secos. A veces se deben secar en estufas adecuadas justo antes de su empleo, extremando las precauciones cuando vayan a ser utilizados en soldadura de aceros con problemas de temple.
- *Aplicaciones:* soldaduras de responsabilidad. Su gran tenacidad los hace

recomendables para soldar grandes espesores y estructuras muy rígidas. Aceros débilmente aleados e incluso aceros que presentan baja soldabilidad.

- *Posición:* todas las posiciones.
- *Tipo de corriente:* corriente continua y polaridad inversa, aunque hay algún tipo de electrodo preparado para ser empleado también con corriente alterna.

*f) Electrodo celulósicos*

- *Composición del revestimiento:* sustancias orgánicas que generan gran cantidad de gases por el calor.
- *Características de la escoria:* la escoria que producen es escasa y se separa con gran facilidad.
- *Ventajas:* los gases forman una gran envoltura gaseosa en torno al arco e imprimen a las gotas metálicas gran velocidad, por lo cual se consigue gran penetración. Gran velocidad de fusión.
- *Limitaciones:* muchas proyecciones. Superficie de la soldadura muy irregular.
- *Posición:* todas.
- *Aplicaciones:* se emplean principalmente para el soldeo de tuberías en vertical descendente, por la buena penetración que consiguen y por la rapidez del trabajo, debida a su alta velocidad de fusión.
- *Tipo de corriente:* corriente continua y polaridad directa. Para utilizarlos con corriente alterna se necesita emplear una máquina con tensión de vacío muy elevada.

**2.6.3. Aplicaciones del soldeo con electrodos revestidos.**

El soldeo por arco con electrodos revestidos es uno de los procesos de mayor

utilización, especialmente en soldaduras de producción cortas, trabajos de mantenimiento y reparación, así como en construcciones en campo.

La mayor parte de las aplicaciones del soldeo por arco con electrodos revestidos se dan con espesores comprendidos entre 3 y 38 mm.

El proceso es aplicable a aceros al carbono, aceros aleados, inoxidables, fundiciones y metales no férreos como aluminio, cobre, níquel y sus aleaciones.

Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderas, refinerías de petróleo, oleoductos y gaseoductos y en cualquier otro tipo de trabajo similar.

Se puede emplear en combinación con otros procesos de soldeo, realizando bien la pasadade raíz o las de relleno, en tubería se suele emplear con combinación con el proceso TIG. La raíz se realiza con TIG completándose la unión mediante soldeo SMAW.

Para la selección de los electrodos a utilizar, hay que tener en cuenta una serie de factores, de los que destacamos a continuación:

*i. Características mecánicas y composición química de los metales a soldar.*

El electrodo a seleccionar debe tener unas características tal es que el metal depositado tenga unas cualidades mecánicas y químicas similares a las del metal base, por lo que debe conocerse previamente la composición de éste y, en su caso, tomar las precauciones operatorias necesarias, cuando dicho metal sea susceptible de presentar problemas de fisuración o fragilización.

Los electrodos más aptos para los aceros que presentan contenidos

importantes de impurezas o porcentajes elevados de carbono son los de revestimiento básico, seguidos de los levemente ácidos (neutros) y rutilos, mientras que los más sensibles a aquéllas son los ácidos y los celulósicos.

*ii. Espesores del material.*

El espesor del material facilita la difusión del calor y, por tanto, eleva la velocidad de enfriamiento, lo que, para los aceros con contenidos elevados de carbono puede representar la aparición de estructuras metalúrgicas críticas. El orden de elección de los revestimientos es similar al del punto anterior: básicos, neutros, rutilos, ácidos y celulósicos. También debemos tener en cuenta, el utilizar electrodos de gran rendimiento. Para el relleno en fuertes espesores. Para espesores muy finos, en cambio, es recomendable el uso de electrodos de rutilo.

*iii. Preparación de los bordes.*

Para preparaciones deficientes, con aberturas y separaciones mayores que las normales, se necesitan electrodos que den un metal soldado que se enfríe rápidamente y tenga una gran tenacidad, cualidades que corresponden a los electrodos básicos y rutilos.

Por el contrario, para uniones cerradas y sin apenas separación convienen electrodos que produzcan un metal soldado muy caliente y fluido, como corresponde a electrodos ácidos y neutros.

*iv. Posiciones de la soldadura.*

Para la posición horizontal no suele presentar problemas ninguna clase de electrodos. Para las demás posiciones, los más aptos son los rutilos, seguidos de los básicos y los celulósicos. En cambio, los que peor se comportan en posiciones

difíciles son los neutros y, algo menos, los ácidos.

v. *Solicitaciones a que va a estar sometida la unión.*

Las peores condiciones a que se puede ver sometida una unión soldada son aquéllas en que se superponen los esfuerzos estáticos y dinámicos, trabajando a temperaturas muy altas o muy bajas, lo cual requiere del metal soldado unas cualidades mecánicas de tenacidad, ductilidad y resiliencia muy elevadas.

En este sentido, los electrodos que aportan las mejores condiciones de máxima ductilidad, tenacidad y resiliencia a bajas temperaturas son, nuevamente, los electrodos básicos, seguidos, a gran distancia, por los neutros y los ácidos.

Con respecto a la fatiga, no es tanto las cualidades mecánicas cuanto la configuración externa de la soldadura efectuada la que tiene influencia, comportándose todos los electrodos en parecida forma ante el fenómeno de la fatiga.

## **2.7. Tipos de juntas**

Cuando las piezas de acero son llevadas a la forma de junta, ellas pueden asumir una de las cinco configuraciones presentadas en las figuras 4 al 6. Los tipos de juntas son las descripciones de posiciones relativas de los materiales que van a ser unidos y no implica un tipo específico de soldadura.

**Figura 4***Traslape***Figura 5***Atope***Figura 6***De esquina**De borde**Tipo T*

Fuente: Masabanda. (2009, mayo 1). Elaboración de un manual para prácticas de la materia teórica de los procesos desoldadura. Obtenido de

<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1492/1/CD-2174.pdf>

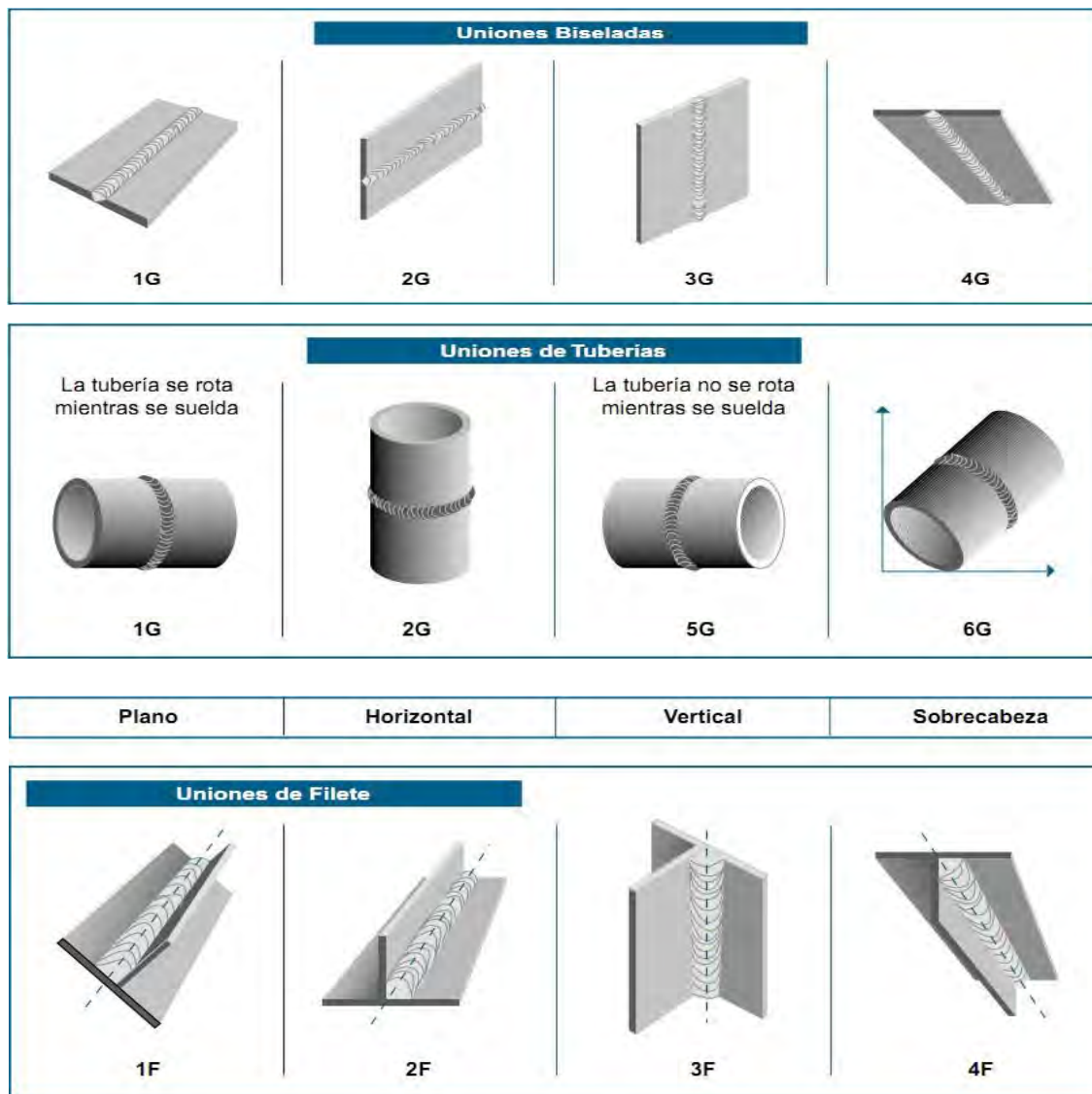
## 2.8. Posiciones de soldadura

Según la designación ANSI/AWSA 3.0-8, las posiciones de soldaduras se indican en la figura 2.5.



**Figura 5**

*Posiciones de las soldaduras según ANSI/AWSA 3.0-8*



Fuente: Masabanda. (2009, mayo 1). Elaboración de un manual para prácticas de la materia

teórica de los procesos desoldadura. Obtenido de

<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1492/1/CD-2174.pdf>

## 2.9. Zonas metalúrgicas de la soldadura.

En soldadura a medida que la fuente de calor interactúa con el material se puede identificar tres principales zonas, estas son: Zona de Fusión (ZF), también conocida como metal de aporte; Zona afectada por el Calor (ZAC); y Metal Base (MB), estas zonas se observan en la figura N° 6.

**Figura 6**

*Zonas de la soldadura.*



Fuente: <https://www.monografias.com/trabajos82/soldadura-con-electrodo-revestido/soldadura-con-electrodo-revestido2.shtml>

### 2.9.1. Zona de fusión (ZF).

Consiste en una mezcla de metal de aporte y metal base que se ha fundido por completo. Esta zona se caracteriza por un alto grado de homogeneidad entre los componentes que se han fundidos durante la soldadura. El principal motivo por el que se mezclan estos componentes es la convección que se suscita en el pozo de soldadura fundida. En la soldadura el molde se forma por medio de los moldes o superficies no fundidos de los componentes que se están soldando.

Es la interfaz entre la región fundida y la región en estado sólido, normalmente

es la zona más propicia a inicio de fisuras, ya que existen áreas con fusión parcial.

### **2.9.2. Zona afectada por el calor (ZAC).**

La zona afectada por el calor (también llamada HAZ) es el volumen de material en o cerca de la soldadura cuyas propiedades han sido alteradas debido al calor de la soldadura. Debido a que el proceso de soldado por resistencia se basa en calentar dos piezas, es inevitable que haya una HAZ. El material que se encuentra dentro de la HAZ sufre un cambio que puede o no resultar beneficioso para la unión soldada. La composición química en la ZAC es igual a la del metal base, pero en esta zona ha sido tratado con calor debido a las temperaturas de soldadura, por lo que se han alterado sus propiedades y estructura. La cantidad de daño metalúrgico en la HAZ depende de factores tales como la cantidad de calor que ha ingresado y la máxima temperatura alcanzada, la distancia de la zona de fusión, el intervalo de tiempo al que ha estado sujeto el metal a altas temperaturas, la velocidad de enfriamiento y las propiedades térmicas del metal. El efecto sobre las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor por lo general es negativo y en esta región con frecuencia ocurren fallas en la junta soldada. Conforme aumenta la distancia de zona de fusión, se alcanza por fin la zona de metal base no afectada.

### **2.9.3. Metal base (MB).**

Es la región donde no ha ocurrido cambio metalúrgico, es decir no ocurre cambio micro estructural, aunque el ciclo térmico impuesto por la soldadura puede producir tensiones residuales de contracción longitudinal y transversal.

## **2.10. Ciclo térmico de la soldadura**

La microestructura de una aleación depende de su “historia térmica”, es decir de los

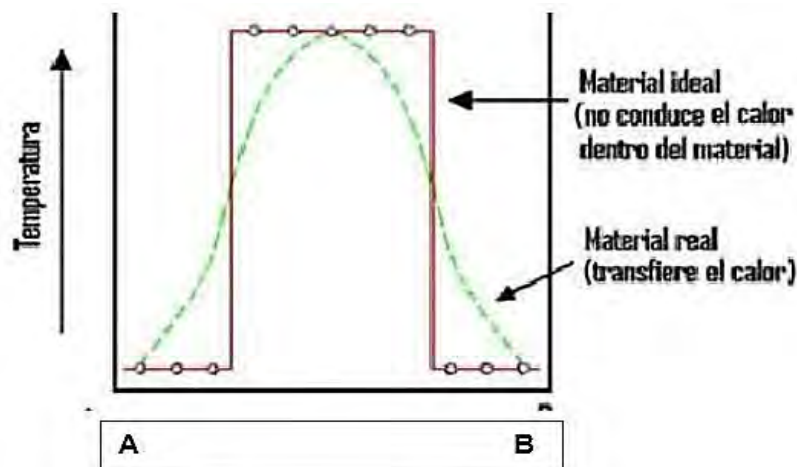
calentamientos y enfriamientos a los que han sido sometidos previamente, Cuando se realiza una soldadura en una pieza. El ciclo térmico está representado básicamente por:

- La distribución de la temperatura máxima en la zona afectada por el calor (ZAC).
- La velocidad de enfriamiento en el metal fundido y en la ZAC.
- La velocidad de solidificación del metal fundido.

Supongamos que estamos realizando una soldadura sobre la superficie AB y que podemos colocar termocuplas distribuidas inmediatamente debajo de la superficie tal y como indica en la figura 7.

**Figura 7**

*Distribución de la temperatura*



Fuente: Carlos Fosca. Metalurgia de la soldadura. PUCP.

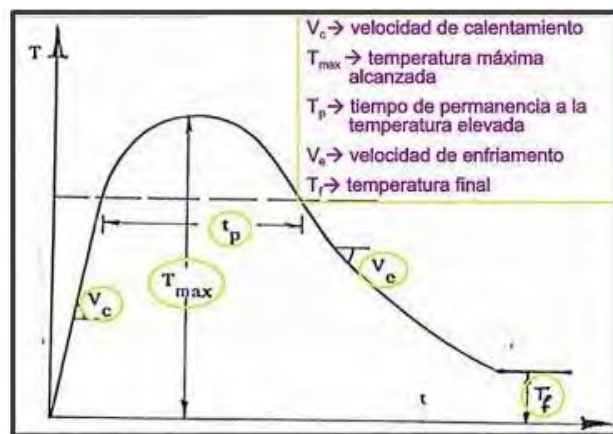
De la figura 7, si midiéramos la temperatura con las termocuplas (termopares) en cada punto del material durante la soldadura, tendríamos una distribución de la

temperatura como la representada por la curva de trazos de la figura 7.

El ciclo térmico representa la variación de la temperatura en función del tiempo para un punto del metal base próxima a la soldadura, como se puede apreciar en la figura 8.

### Figura 8

*Ciclo térmico de soldeo*



Fuente: <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf20/20-38.pdf>

Los principales parámetros que describen el ciclo térmico son:

- Temperatura inicial ( $T_0$ ). Es la temperatura de partida.
- Velocidad de calentamiento. Es la pendiente de la curva en la subida desde  $T_0$ . Suele ser muy elevada de  $300^\circ\text{C}$  por segundo.
- Temperatura máxima o temperatura pico ( $T_{max}$ ). Es la temperatura máxima alcanzada en un punto del metal base. La temperatura de pico indica la posibilidad de ocurrencia de transformaciones microestructurales en ese punto. Depende de las condiciones de soldadura.
- Velocidad de enfriamiento. está dada por la inclinación de la curva del ciclo

térmico desde una determinada temperatura. Este parámetro es importante en la determinación de microestructuras en materiales como los aceros estructurales comunes, que pueden sufrir transformaciones de fase durante el enfriamiento.

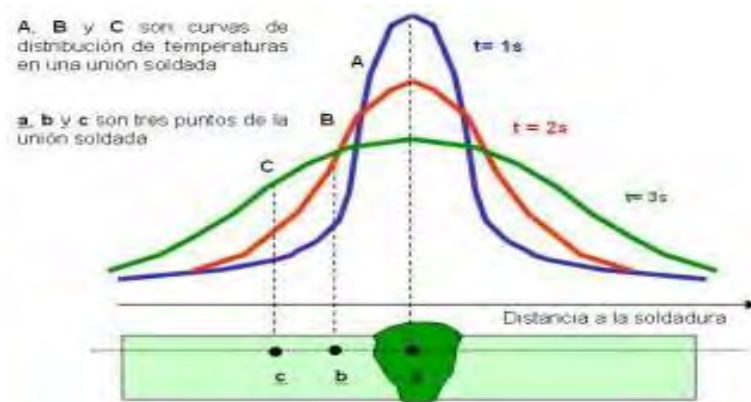
Estas curvas reales de distribución de temperaturas son muy importantes, ya que nos permiten conocer en un momento determinado cual es la temperatura en diferentes puntos de la pieza que está siendo soldada. Si conocemos la temperatura en cada punto, podremos predecir qué zonas del metal se verán afectadas micro estructuralmente. (Carlos fosca, 2003, p.79).

Sin embargo, la fuente de calor se aplica a la pieza a soldar durante un lapso de tiempo determinado, por lo tanto, es lógico pensar que un primer momento, esta se calienta y luego, una vez que la fuente de calor deja de actuar, comienza a enfriarse. Esto significa que cada punto del metal experimenta una variación de su temperatura en función del tiempo, es decir, un ciclo térmico. (Carlos fosca, 2003, p.79).

Si representamos los dos conceptos, distribución de temperaturas y ciclo térmico en un mismo gráfico, tendremos una serie de curvas de temperaturas que van cambiando en el tiempo como se ilustra en la figura 9.

## Figura 9

*Distribución de temperaturas en una sección transversal cualquiera*



Fuente: Carlos Fosca. Metalurgia de la soldadura, PUCP.

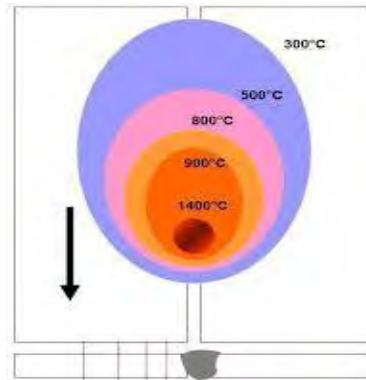
De la figura 9, podemos aseverar que la distribución de temperatura representa las temperaturas existentes en un momento determinado, en varios puntos del metal que ha sido o está siendo soldado y el ciclo térmico representa como varía la temperatura a lo largo de todo el tiempo de un punto cualesquiera del metal durante la soldadura, por tanto representa la historia térmica de un punto cualquiera del metal y por ello tiene una influencia notable en la microestructura final de dicho metal y en sus propiedades mecánicas.

Si colocamos ahora termocuplas sobre la superficie de la plancha a soldar, para medir en cada punto de aquella el inicio térmico durante la soldadura y dibujamos las curvas isotermas a partir de las mediciones de temperatura, obtendríamos una representación como la de la figura 9.

Tanto las curvas de distribución de temperatura como las isotermas dependen de los siguientes factores:

**Figura 10**

*Curvas isotermas en una plancha sometida a soldadura a tope*



- El baño fundido, que actúa como foco de calor más o menos permanente. Aquí los parámetros a tomar en cuenta son la intensidad de corriente, el voltaje y la velocidad de avance.
- La masa del 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 (junta a tope, en filete, etc.).
- La temperatura inicial del metal base, que incide sobre el gradiente de temperatura. Aquí el factor a considerar es la temperatura ambiente o la temperatura a la cual el metal ha de ser precalentado antes de soldar.

### ***2.10.1. Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura por arco.***

Los factores que influyen son:

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

El aporte de calor es la energía que se genera durante la soldadura. Puede ser de origen químico, eléctrico o mecánico. A lo largo de este curso nos referimos



fundamentalmente a los procesos de soldadura por arco eléctrico.

El aporte de calor se expresa normalmente el término de joules por milímetro y se define como:

$$H = \frac{V \times I}{v} f \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

H= Energía de soldeo, en J/mm V = voltaje, en V

A = amperaje, en A

v = velocidad de soldeo, en mm/s

Esta energía o aporte de calor neto viene condicionada por la eficiencia del proceso de soldadura empleando (y en menor parte, por la posición de soldadura). La tabla 9 muestra las eficiencias térmicas de diferentes procesos de soldadura.

**Tabla 9**

*Eficiencia térmica de diferentes procesos de soldadura*

Proceso	F
SMAW	0.60 – 0.70
GMAW	0.70 – 0.85
TIG	0.60 – 0.65
SAW	0.90 – 0.95

Fuente: <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/20/20-38.pdf>

Así, el calor de aporte neto viene expresado por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4,13\rho \cdot C \cdot t \cdot Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_{max} - T_b} \quad \text{Ec. 2.3}$$

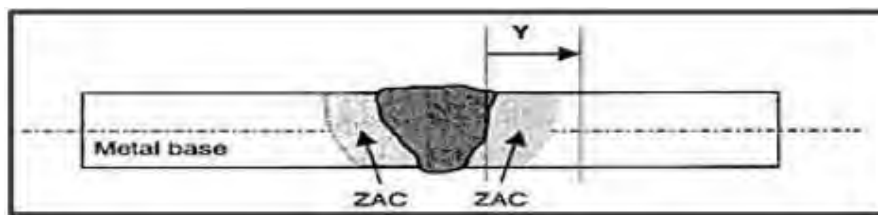
### 2.10.2. Ecuación de la temperatura máxima en cada punto de la ZAC

En esta parte, se presenta algunas ecuaciones que nos permiten analizar mejor como afectan distintas variables sobre las diferentes características del ciclo térmico en un proceso de soldadura.

En la figura 11, la soldadura a tope con penetración completa y de una sola pasada realizada en plancha, la distribución de las temperaturas máximas, en el metal base adyacente a la soldadura viene dada por la ecuación 2.3

**Figura 11**

*Temperatura máxima de la ZAC a una distancia Y*



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

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4,13\rho.C.t.Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_{max} - T_o} \quad Ec. 2.3$$

Donde:

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

$T_0$  = Temperatura inicial de la chapa. ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_m$  = Temperatura de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ ) (Temperatura del liquidus del metal a soldar)

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

$H_{\text{net}}$  = energía aportada neta ( $\text{J/mm}$ )  $t$  = Espesor de la chapa a soldar ( $\text{mm}$ )

$\rho$  = Densidad del material ( $\text{g/mm}^3$ )

$\rho C$  = Calor específico volumétrico ( $\text{J/mm}^3\cdot^{\circ}\text{C}$ )  $Y$  = Ancho de la zona afectada térmicamente en  $\text{mm}$

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

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

Una de las aplicaciones más interesantes de la ecuación de la  $T_{\text{máx.}}$ , es la de la estimación del ancho de la ZAC por la soldadura. Sin embargo, para calcular el ancho de la ZAC debe identificarse primero el rango de temperaturas que la delimita. No cabe duda de que el extremo de la ZAC más cercano a la soldadura, está limitado por la temperatura de fusión del metal base ( $T_{\text{fusión}}$ ) dado que la ZAC es la región de metal sólido más próxima al baño fundido. El extremo más alejado de la ZAC viene definido por la temperatura mínima, por encima de la cual se producen transformaciones microestructurales en estado sólido en el metal base, que alteran significativamente las

propiedades de la unión soldada. Por ejemplo, para el caso de los aceros al carbono, o de baja aleación, tienen un contorno definido por aquellos puntos que han alcanzado una temperatura máxima de 723 °C.

Por tanto, el ancho de la ZAC está determinado por la ecuación 2.4.

$$r = \left[ \left( \frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left( \frac{1}{T_{fusion} - T_o} \right) \right] \times \left[ \frac{H_{neto}}{4,13 \cdot \rho \cdot C \cdot t} \right] \quad \text{Ec. 2.4}$$

Fuente: introducción a la metalurgia de la soldadura

### 2.11. Ecuación de la velocidad de enfriamiento para chapas gruesas y delgadas

Los cálculos y comparaciones de las velocidades de enfriamiento requieren una cuidadosa especificación de las condiciones en que se producen. Indicar solamente "velocidad de enfriamiento" de una soldadura no es adecuado, debido a que la velocidad de enfriamiento varía, como el gradiente térmico, con la posición y el tiempo. El método más útil es determinar la velocidad de enfriamiento sobre el eje de la soldadura en el momento en que el metal está a una temperatura determinada de interés,  $T_c$ . A temperaturas por debajo de la de fusión, la velocidad de enfriamiento en la soldadura y en su zona afectada térmicamente inmediata es substancialmente independiente de la posición.

En los aceros al carbono y de baja aleación, la temperatura de interés está en las proximidades de la "nariz" perlítica de temperaturas sobre el diagrama tiempo-temperatura- transformación (diagrama TTT). La temperatura exacta no es crítica, pero debe ser la misma paratodos los cálculos y comparaciones. Un valor de  $T_c = 550$  °C es suficiente para la mayoría de los aceros.

El uso práctico más importante de la ecuación de la velocidad de enfriamiento es el cálculo de los requisitos de precalentamiento. Por ejemplo, cuando las chapas son relativamente gruesas y se necesitan varias pasadas, más de seis para completar la unión, la velocidad de enfriamiento,  $R$ , viene dada por la ecuación 2.5.

$$R = \frac{2\pi K(T_c - T_o)^2}{H_{net}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

$R$  = Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura (C/seg) en el momento justo en que el punto se está enfriando a la temperatura de interés  $T_c$ .

$k$  = Conductividad térmica del metal (J/mm, x seg, x °C)

Si las chapas son relativamente delgadas, requiriendo menos de cuatro pasadas, la fórmula es la mostrada en la ecuación 2.6.

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

(Ec. 2.6)

Sin embargo, la velocidad de enfriamiento en las proximidades de la zona fundida es sólo un pequeño tanto por ciento menos que la del eje central de la soldadura. Consiguientemente, la ecuación de la velocidad de enfriamiento se aplica a toda la soldadura y a la inmediata ZAC.

La distinción entre chapa gruesa y delgada requiere algunas explicaciones. La

ecuación para chapas gruesas se emplea cuando el flujo de calor es tridimensional, hacia abajo tanto como hacia los laterales de la soldadura. La ecuación de chapas gruesas se podría aplicar, por ejemplo, a un pequeño cordón depositado sobre una chapa de espesor grueso. La ecuación para chapas delgadas se aplicaría a cualquier pasada única, soldadura de penetración completa, o corte térmico. Algunas veces, no es fácil determinar si la chapa es gruesa o delgada debido a que estos términos no tienen un significado absoluto. Por esta razón, es útil definir una cantidad adimensional “denominada espesor relativo de la chapa”  $r$ , calculada por la ecuación 2.7.

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

(Ec. 2.7)

La ecuación para chapas gruesas se aplica cuando  $r$  es mayor de 0,9 y la ecuación de chapas delgadas cuando  $r$  es menor que 0,6. Cuando  $r$  está comprendido entre 0,6 y 0,9 la ecuación de las chapas gruesas da una velocidad de enfriamiento demasiado alta y la ecuación de las chapas delgadas una velocidad que es demasiado baja. Sin embargo, si se efectúa una división arbitraria a un valor de  $r = 0,75$ , considerando los valores más altos como chapas gruesas y los que estén por debajo como chapas delgadas, el error máximo no suele exceder del 15% en los cálculos de la velocidad de enfriamiento, siendo menor aún el error al aplicar las ecuaciones para calcular las necesidades de precalentamiento.

## 2.12. Tiempo de solidificación

La velocidad a la cual el metal fundido solidifica durante el soldeo, puede tener un efecto acusado sobre su estructura metalúrgica, propiedades, facilidad de tratamiento térmico y contenido de impurezas. El tiempo de solidificación,  $St$  (seg.) del metal fundido depende del aporte térmico neto y viene dado por la fórmula:

$$St = \frac{L * Hnet}{2\pi K \rho C (Tm - To)^2} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

$St$  = Tiempo de solidificación, tiempo transcurrido desde el principio hasta el final de la solidificación en un punto determinado del metal fundido (seg.).

$L$  = Calor de fusión (J/mm<sup>3</sup>).

El tiempo de solidificación es función del aporte térmico y de la temperatura inicial.

Si se compara con cualquier otro proceso de fundición, la solidificación del baño fundido durante el soldeo es extremadamente rápida. Por esa razón no es adecuado describir la estructura del metal fundido como una estructura de fundición; la estructura que se obtiene al solidificar la soldadura, tiene características específicas distintas de cualesquiera otras estructuras. La principal razón por la cual el metal de soldadura se enfría mucho más rápidamente que las fundiciones clásicas, es que el baño fundido está en un mejor contacto con el metal frío que le rodea y que actúa como molde.

## 2.13. Temperatura de precalentamiento (método de Seferian)

Seferian propone un método fundamentado en sus estudios en los que usa fórmula para el carbono equivalente ( $Ct$ ), que lo plantea como suma de un carbono equivalente químico ( $Ce$ ). El cual depende de la composición química del acero y de un

carbono equivalente del espesor ( $C_s$ ) llamado también Seferian, de tal forma tenemos la siguiente ecuación:

Donde:

$$C_t = C_e + C_s \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$C_e = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$C_s = 0.005 \times e(\text{mm}) \times C_e \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$C_s$ : carbono equivalente del espesor (%)

$e$ : espesor de la pieza (mm)

$C_e$ : carbono equivalente químico (%)

Finalmente, para obtener la temperatura de precalentamiento se aplica la fórmula desarrollada por Seferian y que se expresa de la siguiente manera:

$$T_p = 350 \sqrt{C_t - 0.25} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

#### 2.14. Carbono equivalente

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

La dureza máxima de un acero depende, principalmente, de su % C.L a dureza máxima real bajo el cordón depende no solo del contenido del acero, sino también de su



templabilidad bajo los térmicos presentes durante la soldadura en la que influyen muchos otros factores.

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

#### **2.14.1. Formulas del carbono equivalente (CE)**

El cálculo del carbono equivalente representa una forma de describir la composición química por medio de un solo número, a fin de analizar como las variaciones de la misma influyen en el comportamiento del material.

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

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

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

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

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

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (Ec.2.13)$$

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

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

Fueron propuestas por Ito y Bessyo.

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} 5V \quad (Ec.2.14)$$

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

c) **El tipo CEMW**

Propuesta por DUREN en el año 1981

$$\mathbf{CEMW} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \dots (Ec. 2.15)$$

Ambas pueden elegirse para aceros que tengan una proporción de carbono inferior a 0.22% y en el caso de un enfriamiento rápido:  $t_{8/5} < 6$  segundos. Esta ecuación da una mejor correlación con las situaciones reales de soldaduras en campo, donde las velocidades de enfriamiento suelen ser mayores ( $t_{8/5} = 2-3$  seg.).

d) **Formula del CEN.**

Propuesta por Yurioka (1981).

$$\mathbf{CEN} = C + A(C) \left[ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right] \dots (Ec. 2.16)$$

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

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

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

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

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

**e) Temperatura de precalentamiento (método de Seferian).**

La velocidad de enfriamiento tiene un efecto sobre la microestructura de la ZAC, esta velocidad depende de varios factores, entre los cuales podemos citar: velocidad de enfriamiento (esta velocidad depende de los espesores del material base), la geometría de la unión, el calor neto aportado y la temperatura de precalentamiento.

Para el cálculo de la temperatura de precalentamiento se usó el método de SEFERIAN.

*Seferian propone la siguiente ecuación:*

$$T_p = 350 \sqrt{C_t - 0.25}$$

(Ec.2.17)

$$C_t = C_q + C_e$$

(Ec. 2.18)

$$C_q = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13}$$

(Ec. 2.19)

$$C_e = 0.005 \times e(\text{mm}) \times C_e$$

Donde:

$C_t$  = Equivalente total del carbono;  $C_q$  = Equivalente químico

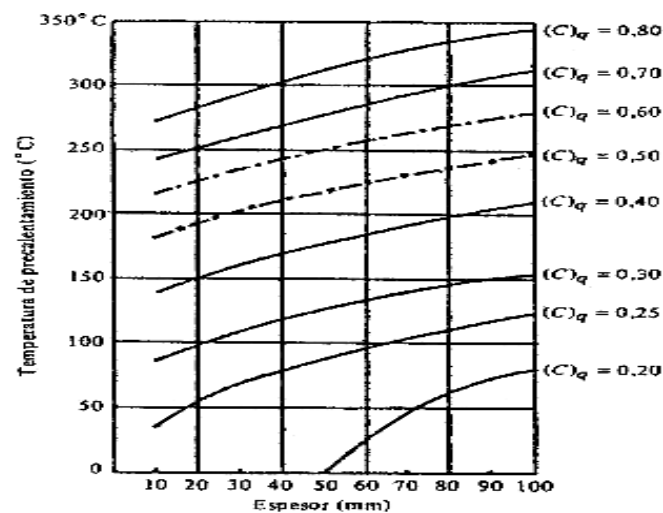
$C_e$  = Equivalente en carbono del espesor.

$e$  = espesor del material.

Seferian determina gráficamente la temperatura de precalentamiento como se muestra en la figura 12.

**Figura 12**

*Gráfico de Seferian*



Como puede observarse, Seferian no tiene en cuenta la energía neta aportada en el proceso de soldadura y por esta razón, las temperaturas resultantes son superiores a las realmente necesarias en aproximadamente 25 a 50 °C.

#### **2.14.2. Utilización del diagrama de Graville para evaluar la soldabilidad de los aceros**

El diagrama de Graville, resulta una herramienta útil para evaluar la soldabilidad de los aceros. El valor del CE (%) va a medir la susceptibilidad a la fisuración en frío del metal base en la zona afectada por el calor (ZAC) debido a la soldadura. A mayores %C va a significar un aumento del riesgo que se produzca una fisuración en frío.

Otra información a extraer del diagrama de Graville es la posibilidad de comprobar la necesidad de tener que realizar algún tipo de precalentamiento o tratamiento térmico post-soldadura basada en la composición química (no considera espesor), dado que en la misma gráficamente indica la relación entre %Carbono y el CE% del metal base.

En la figura 13, se puede observar las zonas de riesgo para la soldabilidad, que es la misma que la figura 14.

Figura 13

Zonas que indican los grados de soldabilidad.

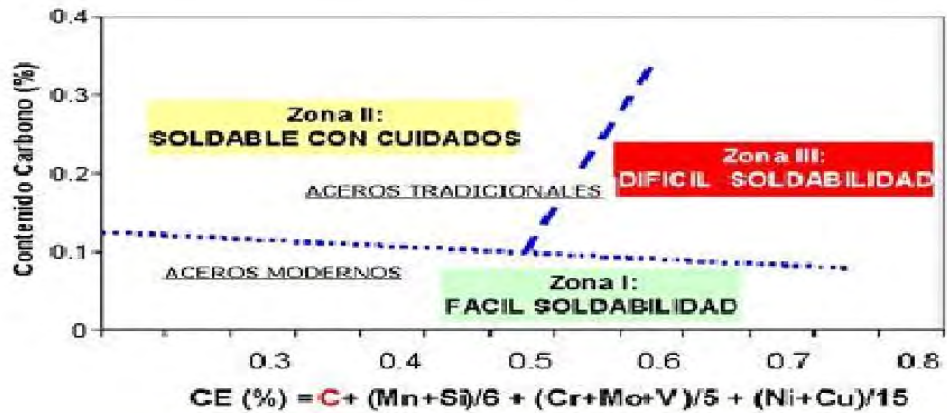
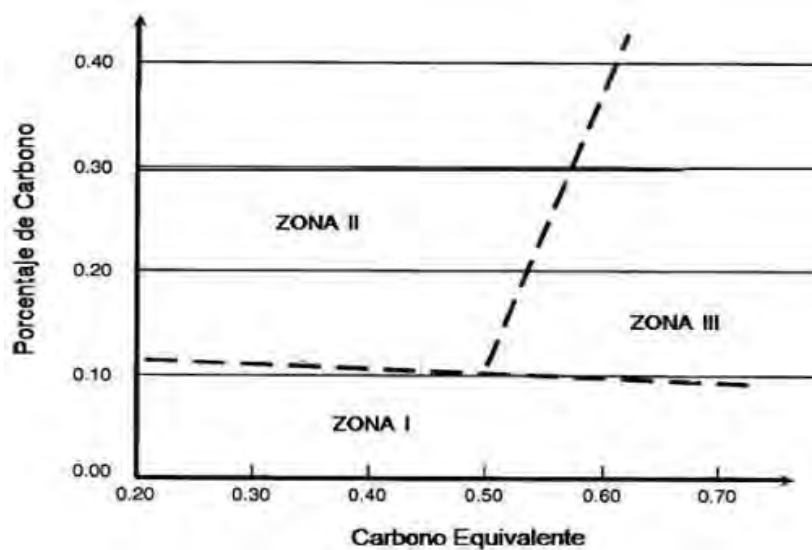


Figura 14

Diagrama de Graville.



Las figuras antes mencionadas muestran tres zonas, las cuales se pueden describir de la siguiente manera:

Zona I: Aceros de bajo carbono y bajo endurecimiento no susceptibles a fisuras.

Zona II: Aceros con mayor porcentaje de Carbono y bajo endurecimiento, el riesgo a fisuras en la ZAC puede ser evitado mediante el control de la velocidad de enfriamiento, por medio del aporte térmico o en menor extensión el pre calentamiento.

Zona III: Aceros con elevado porcentaje de carbono y alto endurecimiento y en todas las condiciones de soldadura pueden producir micro estructuras susceptibles a fisuras.

Desde el punto de vista de selección de parámetros de soldadura este diagrama indicaría que si por su composición química un acero se ubica en la zona II su soldadura debe involucrar el uso de procesos de bajo hidrógeno y pre calentamiento, mientras que si un acero es ubicado en la Zona III se deben aplicar procesos de bajo hidrógeno, pre calentamiento y tratamientos térmicos post soldadura.

### **2.15. Dilución.**

Durante la soldadura por fusión, el metal de cada una de las partes a unir y el aporte (si se utiliza) se funden conjuntamente formando el baño de fusión o metal de soldadura. Tras la posterior solidificación, el metal de soldadura resultante tendrá una sola fase o una mezcla de dos fases.

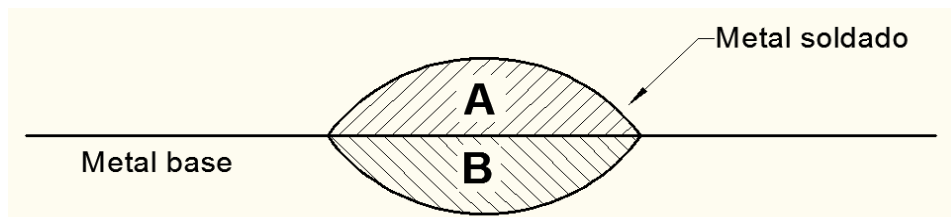
Para cualquier composición de metal de aporte dada, los cambios en el procedimiento de soldadura pueden causar variaciones en la dilución.



En la figura 15, se muestra esquemáticamente las zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución.

### Figura 15

*Zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución*



El grado de dilución se puede estimar de acuerdo a la siguiente ecuación 2.17 y 2.18.

$$\% \text{ dilucion} = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad \text{Ec. 2.17}$$

$$\% \text{ Dilución} = \frac{\text{Área sombreada}}{\text{Área total del cordón de soldadura}} \times 100 \quad \text{Ec. 2.18}$$

En la tabla 10 se muestran los niveles de dilución para diferentes procesos de soldadura.

**Tabla 10**

Niveles de dilución de los procesos de soldadura

Proceso	Dilución (%)	Observaciones
Electro escoria	100	El metal base contribuye con la zona fundida-
Soldadura por haz de Electrones	100	Excepto si se emplea hilo de aporte
Soldadura laser	100	Excepto si se emplea hilo de aporte
Arco eléctrico manual (SMAW)	20 – 30 30 – 40 10 - 20	En general Pasada de raíz En depósitos (overlay)
Arco sumergido	25-50 10 - 15	En general En depósitos (overlay)
MIG/MAG (GMAW)	25 – 50 15 - 30	Arco “spray” Arco “Arco cortocuito”
TIG (GTAW)	20 – 50 100	Sin material de aporte

### **2.15.1. Variables de soldadura que afectan la dilución**

Gran cantidad de depósitos se realiza con los procesos de soldadura por arco eléctrico. Debido a la importancia de la dilución, es necesario conocer el efecto de cada variable. Las mismas son:

#### **a. Amperaje**

Incrementando el amperaje (densidad de corriente) aumenta la dilución. El arco es más caliente y rígido, la penetración es más profunda y mayor es la fusión del metal base.

#### **b. Polaridad**

Con corriente directa con polo negativo al electrodo (CDEN) da menos penetración y, por lo tanto, menor dilución que con el electrodo al polo positivo (CDEP). Alternando las corrientes da diluciones intermedias a ambas.

#### **c. Diámetro del electrodo:**

Diámetros pequeños de electrodo significan menores amperajes y por lo tanto menor dilución. En soldadura por arco bajo protección gaseosa, para un dado amperaje, diámetros grandes de electrodo (y bajas densidades de corriente) dan diluciones más bajas si el mayor diámetro resulta en transferencia globular; mientras que los diámetros más pequeños resultan en transferencia de rocío. Con otros procesos de soldadura el resultado puede variar.

#### **d. Extensión del electrodo:**

Un electrodo largo disminuye la dilución (para procesos con electrodo consumible) por incremento en la velocidad de fusión del electrodo (calor) y la

difusión de la energía del arco mientras ésta afecte sobre el metal base. A la inversa, un electrodo corto incrementa la dilución, dentro de ciertos límites.

**e. Paso o separación de cordones:**

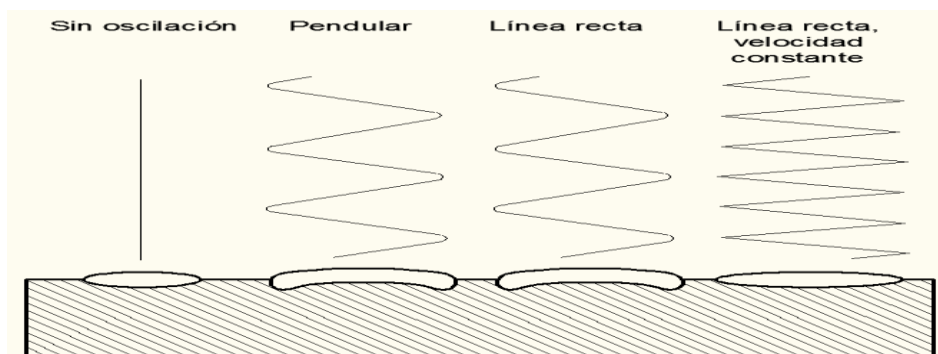
Una ajustada separación entre cordones (mayor superposición) reduce la dilución debido a que mayor cantidad de cordones previos y menor material base se refunden e incorporan a la pileta líquida. Una amplia separación de cordones (menor superposición) incrementa la dilución.

**f. Oscilación del electrodo:**

Cuando se oscila ampliamente el electrodo, se obtienen cordones anchos y de menor penetración, por lo que es menor la dilución; los cordones finos, estirados, producen máxima dilución. La frecuencia de oscilación también afecta la dilución, como regla se puede indicar que a mayor frecuencia de oscilación existirá menor dilución. En la figura 16, se puede observar el efecto que tiene el tipo de oscilación en el depósito.

**Figura 16**

*Tipos de oscilación y su efecto en el cordón de soldadura*



*Fuente:* Agustín gualco “efecto de los parámetros de Soldadura”; (2011)

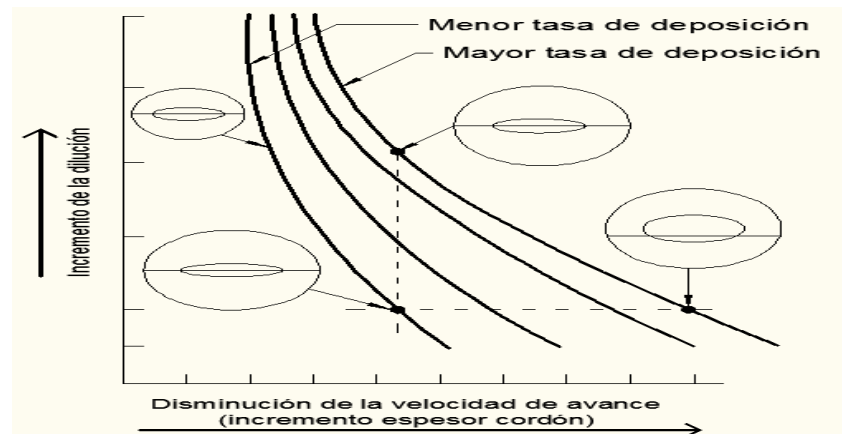
### g. Velocidad de avance

El efecto de la velocidad de avance en la dilución. Un decaimiento en la velocidad de avance disminuye la cantidad de metal fundido por unidad de tiempo (t) y/o distancia e incrementa la cantidad de recargue agregado: esto reduce la dilución. Esta reducción se genera por el cambio de forma del cordón y el espesor y por el hecho de que la fuerza del arco es ejercida sobre la pileta líquida más que sobre el metal base.

### h. Posición de soldadura e inclinación de la pieza de trabajo.

**Figura 17**

*Efecto de la velocidad de avance sobre la dilución*



Este efecto tiene una importante influencia sobre la dilución. Dependerá de la posición o la inclinación de la pieza de trabajo.

## 2.16. Composición química del cordón de soldadura

En cuanto a la composición química del cordón de soldadura es preciso conocer las relaciones de dilución y las composiciones químicas del metal base y de aporte.

En ese sentido la composición de un elemento de aleación específico en el cordón de soldadura diluido se calcula mediante la ecuación.

$$XW = (DA) (XA) + (DB) (XB) + (1 - DT) (XF) \quad (\text{ec.2.19})$$

Donde:

$XW$  = Porcentaje promedio del elemento  $X$  en el depósito de soldadura

$XA$  = Porcentaje promedio del elemento  $X$  en el metal base A

$XB$  = Porcentaje promedio del elemento  $X$  en el metal base B

$DA$  = Porcentaje de dilución del metal base A, expresado en decimal

$DB$  = Porcentaje de dilución del metal base B, expresado en decimal

$DT$  = Porcentaje de dilución total, expresado en decimal

## 2.17. Control de calidad de las soldaduras

Hay numerosos ensayos usados para determinar las varias propiedades mecánicas y químicas de los metales. Mientras que algunos de esos ensayos proveen valores para más de una propiedad, la mayoría son diseñados para determinar el valor de una característica específica. Por esto, puede ser necesario realizar varios ensayos diferentes para determinar toda la información deseada.

Los métodos de ensayo son generalmente agrupados en dos clases, destructivos y no destructivos. Los ensayos destructivos dejan al material o parte fuera de uso para servicio una vez que se realiza el ensayo. Estos ensayos determinan como el material

se comporta cuando es cargado a rotura. Los ensayos no destructivos no afectan a la pieza o componente para su posterior uso.

### **2.17.1. *Ensayos destructivos en uniones soldadas***

Los ensayos destructivos de control de calidad de las materias soldadas son esenciales en cualquier aplicación de responsabilidad; obteniéndose la verificación detallada de las estructuras y propiedades obtenidas. El objetivo más importante de los ensayos destructivos es la verificación del comportamiento final de las soldaduras ejecutadas.

Se tienen los siguientes tipos de ensayos destructivos: ensayo de tracción, ensayo de doblado, ensayo de impacto y ensayo de dureza.

#### **a. Ensayo de tracción.**

Ensayo estático que consiste en aplicar a la probeta, en dirección axial, un esfuerzo de tracción creciente, generalmente hasta la rotura, con el fin de determinar una o más de sus características mecánicas. Este ensayo tiene por objetivo definir la resistencia elástica, resistencia última y plasticidad del material cuando se le somete a fuerzas uniaxiales.

El resultado deseado por lo general se limita a conocer el valor de la resistencia máxima debido a que las muestras no son homogéneas. Las pruebas de tracción Para probar soldaduras, se deben llevar a cabo en el metal base, y en el metal soldado para determinar las propiedades mecánicas, “Si el metal de soldadura es más resistente que la placa, se producen fallas en la placa; si la soldadura es débil, se producen fallas en la soldadura” (Callister, W.D. ed. Reverte S.A., Barcelona)

Se requiere una máquina, prensa hidráulica por lo general capaz de:

- Alcanzar la fuerza suficiente para producir la fractura de la probeta.
- Controlar la velocidad de aumento de fuerzas.
- Registrar las fuerzas que se aplican y los alargamientos.

#### **b. Ensayo de impacto**

Esta prueba consiste en impactar una probeta estándar mediante un péndulo que se deja caer desde cierta altura. La prueba de impacto se realiza a diferentes temperaturas de acuerdo a lo exigido en los estándares. Las pruebas de impacto se utilizan para conocer cuanta energía puede absorber un material al ser impactado y el resultado se mide en Joules o en Libra-pie. (Callister, W.D. ed. Reverte S.A., Barcelona)

Existen numerosos tipos de pruebas de impacto, el más utilizado es la prueba Charpy “V”, es espécimen estándar usado, es una barra cuadrada de 55mm de longitud por 10mmX10mm.

#### **c. Ensayo de dureza**

Se puede definir la dureza de un material como aquella propiedad de la capa superficial del material de poder resistir toda deformación elástica, plástica o destrucción debido a la acción de esfuerzos de contacto locales originados por otro cuerpo (llamado indentador o penetrador), más duro, de determinada forma y dimensiones, el cual no sufre deformaciones residuales durante el contacto. (Callister, W.D. ed. Reverte S.A., Barcelona).



Se utilizan diferentes fórmulas para determinar el valor de la dureza. Se distinguen las siguientes escalas de dureza: Brinell, Vickers, Knoop, y Rockwell.

### 1. Dureza Rockwell (Hardness Rockwell series C.)

El principio de esta, se diferencia de los otros en que para Rockwell la profundidad de la impresión está relacionada con la dureza más que el diámetro o las diagonales de la impresión. Esto agiliza la medida porque la máquina que mide la dureza Rockwell está diseñada para grabar la profundidad de penetración del indentador. En la tabla 11, se puede observar las diferentes escalas de dureza Rockwell.

**Tabla 11**

*Escalas de ensayo de dureza*

Escala	Indentador	Carga Total	Color de escala	Aplicaciones
A	Cono diamante	60	Negro	Metales duros, superficies templadas, chapa fina (<0,4 mm)
D	Cono diamante	100	Negro	Piezas con superficies templada de dureza media, chapas
C	Cono diamante	150	Negro	Aceros templados
F	Bola de $\phi$ 1/16"	60	Rojo	Aleaciones cobre recocido. Chapa fina metálica (>0,6 mm)
B	Bola de $\phi$ 1/16"	100	Rojo	Aceros blandos, de construcción, metales no ferrosos
G	Bola de $\phi$ 1/16"	150	Rojo	Bronce, cobre-berilio, cobre-níquel, fundición maleable
H	Bola de $\phi$ 1/8"	60	Rojo	Aluminio, zinc, plomo
E	Bola de $\phi$ 1/8"	100	Rojo	Fundición, aleaciones Al-Mg, metales antifricción o sintéticos
K	Bola de $\phi$ 1/8"	150	Rojo	Metales antifricción o de dureza muy baja, Ebonita (ASTM D530-59T), Madera laminada (ASTM D 805-52), Materiales sintéticos (ASTM D-785-60T), Otros materiales muy blandos o muy finos.
L	Bola de $\phi$ 1/4"	60	Rojo	
M	Bola de $\phi$ 1/4"	100	Rojo	
P	Bola de $\phi$ 1/4"	150	Rojo	
R	Bola de $\phi$ 1/2"	60	Rojo	
S	Bola de $\phi$ 1/2"	100	Rojo	
V	Bola de $\phi$ 1/2"	150	Rojo	

Fuente: Franco Gimero, José Manuel; 2004, pág. 50

El principio de esta, se diferencia de los otros en que para Rockwell la profundidad de la impresión está relacionada con la dureza más que el diámetro o las diagonales de la impresión.

Esto agiliza la medida porque la máquina que mide la dureza Rockwell está diseñada para grabar la profundidad de penetración del indentador.

Hay varias escalas Rockwell, las más comunes son:

- Escala B (Indentador redondo de acero de 1/16 pulgada de diámetro, 100Kg de carga). Se usa para medir la dureza de los metales no ferrosos
- Escala C (indentador en forma de cono 120° de apertura, de diamante, 150 Kg de carga).

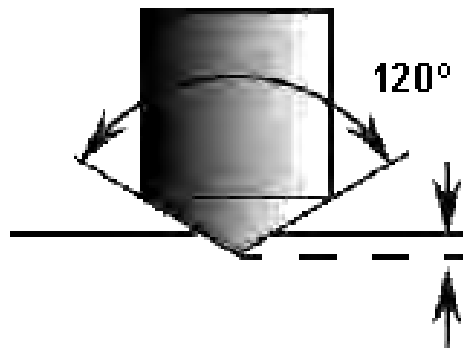
Se usa para medir la dureza de los aceros.

El ensayo de dureza ROCKWELL C, utiliza como Indentador un cono de diamante,

Tal como se muestra en la figura 18, y utiliza una carga de 150 kg.

### Figura 18

*Cono de diamante*



La dureza HR se calcula mediante la siguiente relación:

Para el cono de diamante:

$$HR = 100 - \frac{ch}{0.002} \quad Ec. 2.20$$

Donde:

HRC = Dureza Rockwell

Ch = Altura de penetración.

### ***Ensayos no destructivos***

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

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

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

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

#### **a) Inspección visual.**

Se realiza en toda la secuencia de operaciones a lo largo de todo el proceso productivo, desde la recepción de los materiales y tiene como fin asegurar la

calidad de las uniones soldadas. La inspección visual es una de las Pruebas No Destructivas (PND) más empleada. La soldadura de sellado de los perfiles huecos de acero requiere inspección visual.

## 2.18. Las discontinuidades en soldadura

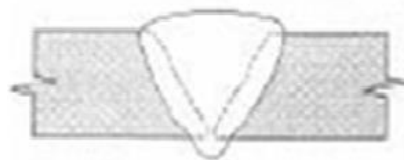
En soldadura, las discontinuidades se clasifican en: superficiales e internas

### 2.18.1. *Discontinuidades superficiales*

- a) **Exceso de penetración:** Se produce por efecto de un movimiento que causa la penetración del electrodo dentro de los biselos, los cuales son distribuidos en esas áreas. Causa que el material chorree al interior y puede retener escoria o no en su interior. Este defecto puede producir en soldadura de gaseoductos, desgaste por erosión. La imagen radiográfica da una densidad más clara en el centro del ancho de la imagen, ya sea extendida a lo largo de la soldadura o en gotas circulares aisladas, pudiendo presentar en su interior una mancha deforme negra figura 19.

**Figura 19**

*Exceso de penetración*

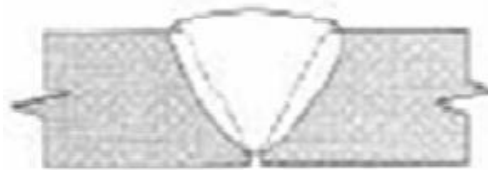


- b) **Falta de penetración:** Como en las uniones en U o en V son visibles por la cara posterior, esta imperfección puede considerarse superficial. A menudo la raíz de la soldadura no quedará adecuadamente rellena con metal dejando un vacío que aparecerá en la radiografía como una línea negra oscura firmemente marcada,

gruesa y negra, continua o intermitente reemplazando el cordón de la primera pasada. Puede ser debida a una separación excesivamente pequeña de la raíz, a un electrodo demasiado grueso, a una corriente de soldadura insuficiente, a una velocidad excesiva de pasada, penetración incorrecta en la ranura. Este defecto por lo general no es aceptable y requiere la eliminación del cordón de soldadura anterior y repetición del proceso figura 20.

### Figura 20

*Falta de penetración*

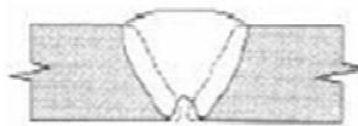


c) **Concavidades.** Estas discontinuidades se presentan de dos tipos:

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

**Figura 21***Concavidad externa*

**Concavidad interna:** Insuficiente refuerzo interno de la soldadura en su cordón de primera pasada el cual al enfriarse disminuye su espesor pasando a ser menor que el del material base. Figura 22.

**Figura 22***Concavidad interna*

- d) **Socavaduras o mordeduras de borde:** La socavadura es una ranura fundida en el metal base, adyacente a la raíz de una soldadura o a la sobre monta, que no ha sido llenada por el metal desoldadura figura 23.

Causas y corrección

1. Exceso de calor - Corrija el amperaje de su maquina
2. Electrodo inadecuado - Cambie el electrodo
3. Manipulación incorrecta - Mejore el movimiento manual

4. Arco muy intenso - Corrija el arco
5. Velocidad inadecuada - Mejore la velocidad y corrija el movimiento del electrodo

### Figura 23

*Socavaduras o mordeduras de borde*



- e) **Quemado:** Es una zona de la pasada de raíz donde la penetración excesiva ha causado que el aporte de la soldadura penetre dentro de la misma soplándose. Resulta de factores que producen excesivo calor en un área determinada, tales como: excesiva corriente, velocidad lenta del electrodo, manejo incorrecto del electrodo. Hay destrucción completa de los biselés. Esta discontinuidad se observa en la figura 24.

### Figura 24

*Quemado*



- f) **Salpicaduras:** Son imperfecciones consistentes en esferuelas de metal fundido depositadas aleatoriamente sobre el cordón y su vecindad. Pueden ser provocadas

por humedad en el revestimiento del electrodo. En la figura 25 se observa esta discontinuidad.

**Figura 25**

*Salpicaduras de metal.*



- g) **Falta de continuidad del cordón:** Se origina al interrumpir el soldador el cordón y no empalmar bien la reanudación del trabajo. Su severidad es muy variable ya que, en los casos más severos, pueden considerarse auténticas faltas de fusión transversales, en tanto que, en otras ocasiones, son simples surcos normales al eje del cordón. Su aspecto radiográfico es el de una línea oscura u oblicua, relativamente nítida figura 26.

**Figura 26**

*Falta de continuidad del cordón.*





### 2.18.2. *Discontinuidades internas*

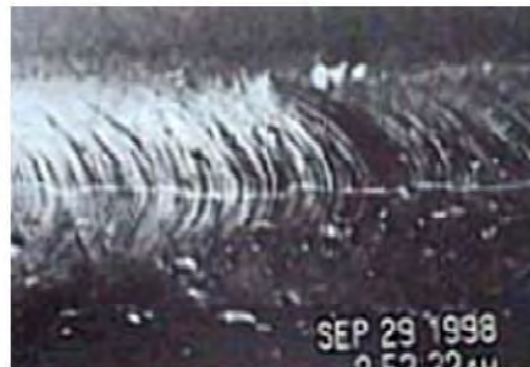
Pueden clasificarse en:

#### a) **Fisuras longitudinales**

Pueden producirse en el centro del cordón (generalmente por movimientos durante o posteriores a la soldadura) o en la interfase del material base con el de aporte (por causa de un enfriamiento brusco o falta de un correcto precalentamiento en grandes espesores). Esta discontinuidad se observa en la figura 27.

**Figura 27**

*Fisuras longitudinales*



#### b) **Fisuras transversales**

Producidas generalmente en aceros duros, por combinación de elementos que al enfriarse a la temperatura normal producen la fisura que puede o no

prolongarse al metal base figura N° 28.

### Figura 28

*Fisuras transversales*

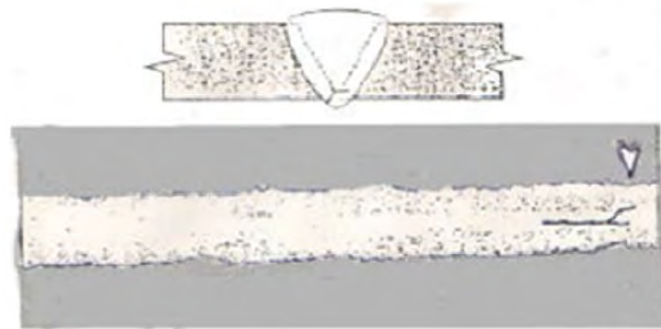


### c) Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)

En el arranque de la soldadura por cambio de electrodo pueden producirse fisuras en formade estrella por efecto del brusco enfriamiento y recalentamiento del material (son fisuras en caliente), figura 29.

### Figura 29

*Fisura de interrupción.*



**d) Fisuras alrededor del cordón (ZAC)**

Fisuras en frío: Se produce por la falta de precalentamiento (crítica para ciertos tipos de aceros), en aceros duros (estructura martensítica en ZAC como resultado del ciclo térmico de soldadura) o de mucho espesor, figura 30.

**Figura 30**

*Fisuras en la zona afectada por el calor.*



**e) Falta de penetración**

Se da en la zona de raíz cuando no ha penetrado el metal fundido. Si la unión es en X o enK, la raíz queda en corazón mismo del cordón, siendo la falta del metal de aporte en dicha zona rigurosamente interna, figura 31.

**Figura 31**

*Falta de penetración.*

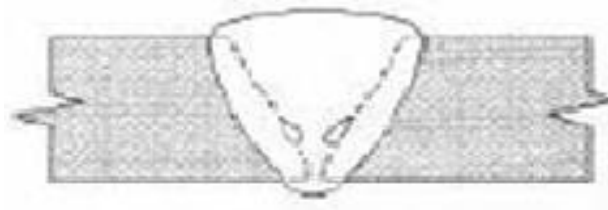


### f) Falta de fusión

Generalmente ocasionada por falta de temperatura suficiente para fundir el metal base o el cordón anterior ya sólido, figura 32.

#### Figura 32

*Falta de fusión*



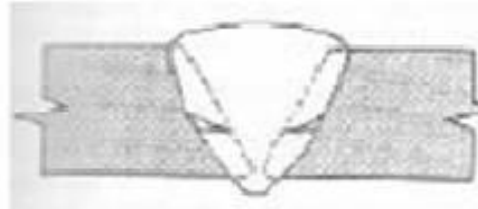
- *Falta de fusión entre pasadas.*

Se produce en las interfases de la soldadura, donde las capas adyacentes del metal, o el metal base y el metal de soldadura no se fusionan debidamente, por lo general debido a una capa muy fina de óxido que se forma en las superficies. Esta capa de óxido puede deberse a una falta de calentamiento del metal base o al depósito previo del metal de soldadura en volumen suficientemente alto que impide que cualquier capa de óxido, escoria, impurezas, etc. migre a la superficie.

También puede deberse a la falta de corriente suficiente o la mala ubicación del arco eléctrico dentro de los biseles, el cual, al producirse más sobre uno, deja al otro sin fundir, figura 33.

**Figura 33**

*Falta de fusión*



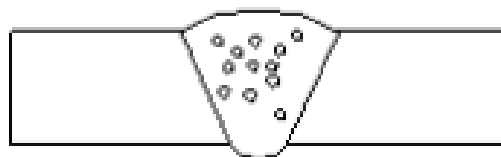
### 2.18.3. *Discontinuidades como inclusiones*

#### a) **Inclusiones gaseosas.**

Por diversas razones, en el metal de soldadura fundido se forman gases que pueden quedar atrapados si no hay tiempo suficiente para que escapen antes de la solidificación de la soldadura. El gas así atrapado, por lo general tiene la forma de agujeros redondos denominados porosidades esféricas, o de forma alargada llamados porosidad tubular o vermicular, figura 34.

**Figura 34**

*Inclusiones gaseosas.*



#### b) **Porosidad agrupada (nido de poros).**

Producida generalmente por un agente oxidante o excesiva humedad del

revestimiento. Pueden también encontrarse capas de óxido sobre los biseles, las que al fundirse desprenden gas. El tamaño de estos poros es igual en toda la zona, figura 35.

### Figura 35

*Porosidad agrupada.*



### c) Porosidad alineada.

Generalmente surge en la pasada de base del cordón soldado, por efecto de la dificultad de penetrar con el electrodo, por mala regulación eléctrica en

Correspondencia con el fundente utilizado por máquinas automáticas y por acumulación de algunos de los elementos del mismo. Figura 36.

### Figura 36

*Porosidad alineada*



**d) Inclusiones no metálicas.**

Proviene de agentes extraños como pueden ser del material de aporte. Esta discontinuidad se observa en la figura 37.

**Figura 37**

*Inclusiones no metálicas.*



**e) Inclusiones de escoria aisladas.**

La mayoría de las soldaduras contienen escorias que han sido atrapadas en el metal depositado durante la solidificación. Son depósitos de carbón, óxidos metálicos y silicatos principalmente, figura 38.

**Figura 38**

*Inclusión de escoria aisladas*



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

**f) Escorias alineadas.**

Se producen por movimientos inadecuados del electrodo por parte del soldador. Quedan alineadas sobre el costado del cordón soldado. En el caso de la soldadura automática, el fundente suele quedar atrapado por una mala regulación de la máquina o por falta de limpieza, pero en este caso estará en el centro del cordón. Este tipo de defecto es muy agresivo, figura 39.

**Figura 39**

*Escorias alineadas.*



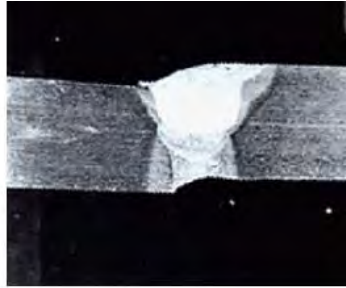


**g) Desalineado (high low).**

Desalineamiento de las partes a ser soldadas, figura 40.

**Figura 40**

*Desalineado.*



## CAPITULO III

### METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

#### 3.1. Nivel o tipo de investigación

- a) *Experimental*: Se estudia variables de interés, para la aplicación de los conocimientos teóricos en la metalurgia de la soldadura, de esta manera determinar el calor neto aportado y sus propiedades mecánicas después de la soldadura, así como también se investigará todo y cada uno de los detalles del trabajo.
- b) *Descriptivo*: Esta investigación se la realiza describiendo el problema en una circunstancia espacial determinada, además esta investigación será la más adecuada para la problemática de la investigación, por su origen y su desarrollo.
- c) *Correlacional*: En este tipo de investigación va a tener como finalidad determinar el grado de relación o sociedad no causal, existente entre dos o más variables evaluando la hipótesis, sujeta a comprobación.
- d) *Explicativa*: La investigación intenta informar de un aspecto de la realidad, explicando su significatividad dentro de una teoría de referencia encargada de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto.

##### 3.1.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación del estudio es experimental, debido a que se estudia variables de interés, para la aplicación de los conocimientos teóricos en la metalurgia de la soldadura, de esta manera determinar el nivel de la soldabilidad del acero AISI 4340, el calor neto aportado y sus propiedades mecánicas después de la soldadura.

##### 3.1.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es del tipo explicativo. De tal manera que se busca conocer las

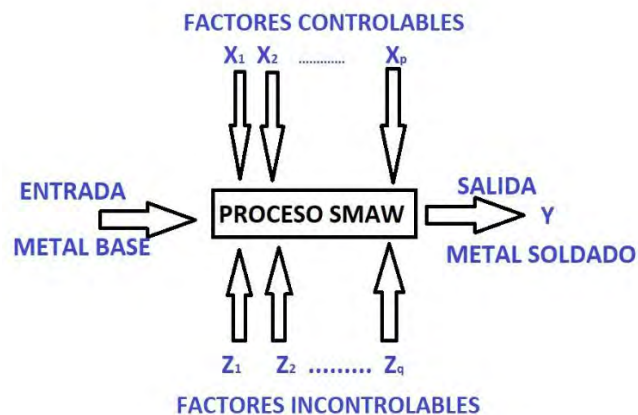
causas que afectan la soldabilidad del acero AISI 4340 y se pretende encontrar la influencia del calor neto en la microestructura del acero en estudio.

### 3.1.3. *Sistemas y procesos identificados*

El proceso de soldadura SMAW es identificado como un proceso productivo el cual se presenta mediante la figura N° 41.

**Figura 41**

*Sistemas y procesos identificados*



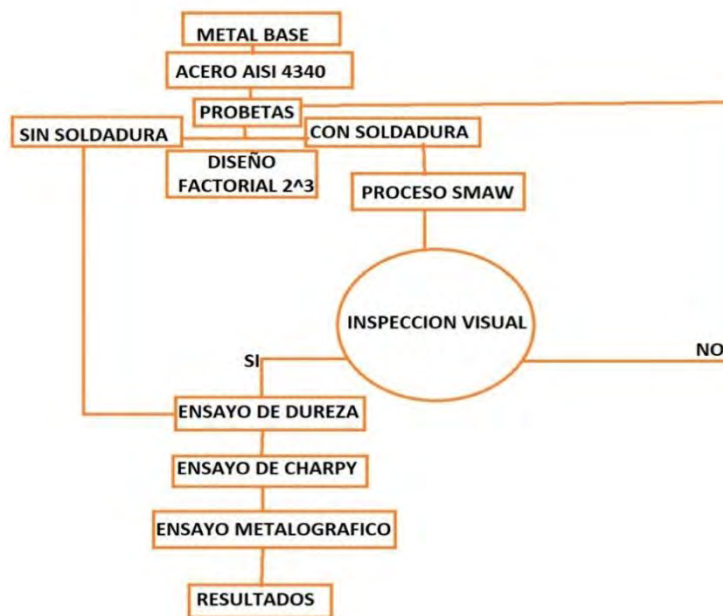
En la Figura N° 41, se aprecia el proceso de soldadura SMAW donde, se transforma las entradas (metal base) en salidas (metal soldado) que tienen una o más respuestas observables. Donde el metal base es identificado como el sistema, ya que en éste ocurren todos los fenómenos propios del proceso de soldadura. Para este estudio de investigación, el metal base está integrado por el acero AISI 4340. Se sabe que en el proceso SMAW intervienen variables controlables e incontrolables. Como variables controlables se tiene lo siguiente: intensidad de corriente, metal de aporte, ángulo de inclinación del electrodo, posición de

soldadura, velocidad de avance, longitud de arco y tipo de junta. De los mencionados, los de mayor influencia son el metal de aporte, intensidad de corriente y ángulo de inclinación del electrodo, mediante las cuales fue posible determinar la influencia del calor neto en la microestructura del acero AISI 4340. Entre los factores incontrolables se tiene a la composición química del metal base y a las condiciones del medio ambiente.

### 3.1.4. Protocolo de desarrollo de experimentos

**Figura 42**

*Muestra el protocolo que se siguió en la metodología experimental*



En la figura N° 42, se aprecia que el metal base lo constituye el acero AISI 4340, del cual se prepararon las probetas. Donde las probetas con soldadura se sometieron a los ensayos de dureza, Charpy y metalográfico; y de igual manera fueron llevados para el planteamiento del diseño experimental y también ser evaluadas visualmente en los ensayos.

### **3.1.5. Diseño de la experimentacion**

Se optó por realizar el diseño factorial de experimentos. Eligiendo el diseño factorial de 3 factores y 2 niveles.

#### **3.1.5.1. Analisis y niveles de las variables**

##### **3.1.5.1.1 Variables independientes**

Las variables independientes que se utilizaron se encuentran en la siguiente tabla N° 12.

**Tabla 12**

*Variables independientes*

Orden	Variable	Unidad	Símbolo	Niveles	
				Mínimo	Máximo
A	Material de aporte	Código AWS	EXXXX	E 312-16	E 309Mo-16
B	Intensidad de corriente	Amperios	(A)	70	130
C	Angulo de inclinación del electrodo	Grados sexagesimales	( ° )	75	85

Las variables observadas en la tabla N° 12, fueron consideradas como las más influyentes en la

influencia del calor neto en la microestructura del acero AISI 4340, por las siguientes razones.

- **El material de aporte**, porque representa una influencia metalúrgica importante debido a la composición química de su revestimiento. Los electrodos para aceros especiales austeníticos ferríticos poseen alta resistencia a la fisuración al soldar metales base de difícil soldabilidad. Por tanto se eligió el electrodo para soldar aceros especiales E 312-16 y E 309Mo-16.
- **La intensidad de corriente**, esta variable influye directamente en el aporte de calor en la soldadura. El fabricante del material del aporte OERLIKON y BOHLER recomiendan trabajar con un rango de amperaje entre 70 y 130 amperios, de acuerdo al tipo y diámetro del electrodo.
- **El ángulo de inclinación del electrodo**, esta variable ingiere en la penetración y el golpe de fuerza del electrodo. De la misma forma, el código ANSI/AWS D1.1 recomienda trabajar con ángulos entre 75-85°, para posición horizontal (1G).

#### 3.1.5.1.2. Variables dependientes

La variable dependiente más importante es la influencia del calor neto en la microestructura del acero AISI 4340. También se tiene la dureza, Tenacidad al impacto y la microestructura.

#### 3.1.1.1. Diseño factorial $2^3$

Con el diseño de experimentos se estudió el efecto del material de aporte (A), intensidad de corriente (B) y ángulo de inclinación del electrodo (C), sobre el calor neto aportado. Siendo el calor neto la variable más importante, que se expresa de manera cuantitativa.

Para ello se decidió correr un experimento factorial  $2^3$  con dos replicas. Es decir, se estudian

tres factores en dos niveles cada uno, haciendo  $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$  tratamientos diferentes, a parte de la réplica, donde se entiende por replica a correr más de una vez un mismo tratamiento o la combinación de factores. Los niveles de prueba de cada factor, tanto en unidades originales como en unidades codificadas se muestran en la Tabla N° 13

**Tabla 13**

*Niveles de prueba de los factores del diseño experimental*

FACTOR	UNIDADES ORIGINALES		UNIDADES CODIFICADAS	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto
A: Material de aporte	E 312-26	E 309Mo-16	-1	1
B: Intensidad de corriente	70	130	-1	1
C: Angulo de inclinación	75	85	-1	1

En ese sentido, el planteamiento del diseño factorial  $2^3$  con dos replicas es la que muestra en la tabla N° 14, a partir del cual se ejecutara el proceso de soldadura. Es importante señalar, que el orden en base a esta tabla se siguió el orden de experimentos.

Tabla 14

*Planteamiento del diseño factorial 2<sup>3</sup> con dos replicas (orden de las pruebas experimentales)*

Replica	N° pruebas	Factores						Respuesta
		escala codificada			escala decodificada			Calor neto aportado (J/mm)
		A	B	C	electrodo (AWS)	Amperaje (A)	inclinación del electrodo (°)	
1	1	-	-	-	E 312-16	70	75	Y11
		1	1	1				
	2	1	-	-	E 312-16	90	75	Y21
			1	1				
	3	-	1	-	E 312-16	105	75	Y31
			1	1				
	4	1	1	-	E 312-16	120	75	Y41
				1				
	5	-	-	1	E 312-16	130	85	Y51
			1	1				
2	6	1	-	1	E 309Mo-16	80	85	Y61
			1					
	7	-	1	1	E 309Mo-16	100	85	Y71
			1					
	8	1	1	1	E 309Mo-16	110	85	Y81
	9	-	-	-	E 312-16	80	75	Y12
			1	1	1			
	10	1	-	-	E 312-16	85	75	Y22
			1	1				
2	11	-	1	-	E 312-16	115	75	Y32
			1	1				
	12	1	1	-	E 312-16	125	75	Y42
				1				
	13	-	-	1	E 312-26	85	85	Y52
			1	1				
2	14	1	-	1	E 309Mo-16	75	85	Y62
				1				
	15	-	1	1	E 309Mo-16	125	85	Y72
			1					
16	1	1	1	E 309Mo-16	130	85	Y82	



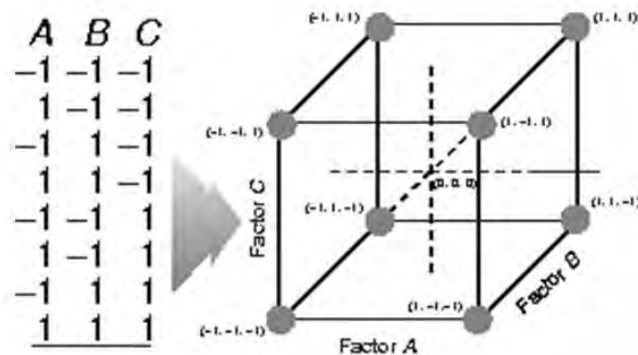
Se encuentran en estudio tres factores A, B y C, cada uno con dos niveles. Este diseño se conoce como diseño factorial,  $2^3$  y las ocho combinaciones de tratamientos pueden representarse gráficamente mediante un cubo.

Existen en realidad tres notaciones distintas que se usan ampliamente para las corridas o ejecuciones en el diseño  $2^k$ :

- La primera es la notación "+,-", llamada "geométrica".
- La segunda consiste en el uso de letras minúsculas para identificar las combinaciones de tratamientos.
- En la tercera se utilizan los dígitos 1 y 0 para denotar los niveles alto y bajo del factor, respectivamente.

### Figura 43

*Diseño factorial  $2^3$  y su representación geométrica*



Por último, es importante indicar que, aunque el diseño factorial  $2^3$  consista en ocho tratamientos, esto con la finalidad de conseguir un análisis del ANOVA.

En ese sentido, el planteamiento del diseño factorial  $2^3$  es la que muestra en la figura N<sup>a</sup> 43, a partir del cual se ejecutara el proceso de soldadura. Es importante señalar, que el orden en base a esta tabla se siguió el orden de experimentos.

## **3.2. Población y muestra**

### **3.2.1. Población**

En la presente investigación se determina como población a los aceros de medio carbono, baja aleación, tratado térmicamente y de alta resistencia, AISI 4340, pieza de maquinaria de pesada.

### **3.2.2. Muestra**

Acero AISI 4340 tratado térmicamente, distribuido en ocho probetas, cuyas medidas son las siguientes: ancho de 34.5mm, largo de 72mm y espesor 6.35mm, cada una de las probetas están con las mismas medidas.

## **3.3. Técnicas e instrumentos de colecta de datos**

### **3.3.1. Técnica.**

Para la realización del presente trabajo de investigación se recurrirá a la técnica de la “Inspección Visual”, según a los criterios del código de soldadura estructural ANSI/AWS D1.1.

### **3.3.2. Instrumentos.**

Durante el desarrollo del trabajo se usarán los siguientes instrumentos: maquina cepilladora con arranque de viruta, máquina de soldar por arco eléctrico, soplete con gas, pirómetro, goniómetro, durómetro Rockwell, péndulo de Charpy, desbastador, pulidor y

microscopio metalográfico. También se utilizaron instrumentos y herramientas menores antes, durante y después de la soldadura.

### **3.3.3. Viabilidad.**

El desarrollo del presente trabajo de investigación es viable, porque se cuenta con los equipos y materiales necesarios para la experimentación y control de calidad.

## CAPITULO IV

### ENSAYOS EXPERIMENTALES

#### 4.1. Equipos y materiales utilizados en la investigación

##### 4.1.1. Equipos para la experimentación

###### a) Máquina cepilladora.

Se utilizó para realizar el chaflan (bordes en V) de las probetas. En la tabla 15 se detallan sus características y en la figura N° 44, se observa dicha máquina.

**Tabla 15**

*Características técnicas*

Modelo	Regruesadora DH 330
Dimensiones (Largo x Ancho x Alto)	579 x 857 x 574 mm
Mesa de regruesado L x A	840 x 330 mm
Altura / anchura de paso	152 mm/330 mm
Velocidad de avance	7 m/min
Número de cuchillas	2
N° de revoluciones del árbol portacuchillas	9.800 /min
Potencia nominal absorbida	1,8 Kw
Peso	35Kg
Diámetro del árbol portacuchillas	47 mm

**Figura 44***Maquina cepilladora***b) Fuente de poder.**

Sus características se muestran en la tabla 16 y en la figura 45 dicha máquina.

**Tabla 16***Características técnicas*

Modelo	ARC 250 IGBT (380V)
Tipo de corriente	Tensión Trifásica 380v
Tension de red (50-60Hz)	AC380V±15%
Rango de corriente ARC FORCE (A)	0~140
Rango de corriente (A)	10~250
Dimensiones (mm)	450×160×385
Peso (kg)	13.5
Salida nominal	250A/30V
Energia de entrada (KW)	9.2
Tension en vacio (V)	65
Ciclo de trabajo (40°C)	60% - 250Amp 100% - 190Amp
Eficiencia (%)	85
Diametro de electrodos (mm)	1.6 – 4.00

**Figura 45***Fuente de poder***c) Durómetro.**

En la tabla 17 se indican sus características.

**Tabla 17**

*Características técnicas del equipo del durómetro Rockwell*

Imagen	Características	Valor
	Marca	MITUTOYO
	Serie	220257
	Modelo	RB – I
	Peso del durómetro (Kg)	100
	Altura máxima de prueba (mm)	210




---

Peso de los accesorios (Kg)	17
Dimensiones de la base del aparato (mm)	452 x 180


---

**d) Péndulo de Charpy.**

Este equipo se encuentra en el taller de la empresa. En la tabla 18, se describen sus características.

**Tabla 18**

*Características técnicas del péndulo de Charpy*

	Características	Valor
	Norma	ASTM E – 23
	Modelo	XJJ – 5
	Angulo $\alpha$ (°)	62.13
	Velocidad (m/s)	4.11 – 8
	Peso del martillo	36.24 (lb)
	Peso de la barra	4.62 (lb)
	Longitud del brazo	1200 (mm)


---

e) **Desbastador metalográfico.**

En la tabla 19, se detallan sus características.

**Tabla 19**

*Características técnicas del desbastador metalográfico*

	Características	Valor
	Especificación	Desbastadora de dos platos
	Diámetro de plato (mm)	240
	Velocidad (rpm)	450
	Motor	370 W
	Dimensiones externas (mm)	700X630X320
	Conexión	220V, C.A. 50Hz

f) **Pulidor metalográfico.**

En la figura 46 se observa el pulidor.

**Figura 46**

*Pulidor metalográfico.*






**g) Microscopio metalográfico.**

En la tabla 20, se describen sus características.

**Tabla 20**

*Característica Microscopio metalográfico*

	Características	Valor
	Especificación	Microscopio PETIP
	Alimentación	220V,C.A/50 Hz
	Mesa	Fija
	Aumento	De 100 a 1000
	Ajuste micrométrico y macrométrico	Mediante perillas
	portaobjetos	Con sistema de enganche y presión

**h) Herramientas e instrumentos menores.**

En el desarrollo de la parte experimental, se utilizaron herramientas e instrumentos de medición que se detallan en la tabla 21.

**Tabla 21***Herramientas e Instrumentos menores.*

<b>Herramientas o instrumento</b>	<b>Tamaño o capacidad</b>	<b>Marca</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Aplicación</b>
Goniómetro	0 -180°	CARD DECK		Medición de Angulo.
Flexómetro	3 m	STANLE Y		Medición.
Pirómetro	650 ° C	FLUKE		Medición de temperatura.
Amoladora	7 pulg.	BOSCH	2000	Desbaste de bisel y Desbaste primario.
Escobilla para amoladora	3 " diam.	TRUPER		Limpieza.
Tornillo de banco	8 pulg.	STANLE Y		Sujeción de probetas.

*Materiales para la investigación***a) Material base**

Se usaron probetas de acero AISI 4340, proveniente de piezas de maquinaria pesada. En la figura 47, se muestra el acero objeto de investigación. En el anexo 2 se muestra la ficha técnica de dicho acero.

**Figura 47***Acero AISI 4340*

- ***Composición química del acero AISI 4340:***

En la tabla se detalla la composición química del acero ASTM AISI 4340 usado en nuestra investigación

**Tabla 22***Composición química del acero ASTM AISI 4340*

<b>Designación</b>	<b>C (%)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Cr (%)</b>	<b>Mo (%)</b>	<b>Si (%)</b>
AISI 4340	0.34	0.5	1.5	1.5	0.2	0.3

### Propiedades mecánicas

- *Sus propiedades mecánicas se detallan en la tabla 23.*

**Tabla 23**

*Propiedades mecánicas del acero AISI 4340*

Diámetro mm.		Límite de fluencia N/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción N/mm <sup>2</sup>	Elongación (Lo = 5d) % mín.	Estricción % mín.	Resiliencia según DVM Joule
desde	hasta					
	16	980	1180 - 1380	9	40	41
16	40	885	1080 - 1280	10	45	48
40	100	785	980 - 1180	11	50	48
100	160	685	880 - 1080	12	55	48
160	250	590	780 - 930	13	55	48

Fuente: Catalogo BHOLER – VOESTALPINE

#### b) Material de aporte.

Para la experimentación del presente trabajo de investigación se usó el electrodo E 312-16 y E 309 Mo-16.

En el anexo C y D, se detalla la ficha técnica de dichos electrodos.

Es un electrodo austenítico – ferrítico par a la soldadura de aceros disímiles y aceros de difícil soldabilidad, con un contenido aproximado de 30% de ferrita. El metal depositado es resistente a la fisuración, corrosión, impacto, calor. Fricción metal-metal, es muy dúctil y tenaz, de fácil encendido del arco, forma cordones planos libres de salpicadura y con ausencia demordeduras.

- *Características:*
  - Electrodo para aceros inoxidable austeníticos
  - Revestimiento rutilico. Color blanco
  - Toda posición

- Corriente continua, electrodo positivo o corriente alterna (CCEP, CA).

Resistente a las fisuras y grietas debido a las dos fases microestructurales austenita-ferrita.

- **Aplicaciones Típicas**

- Reparación de ejes y engranajes
- Rellenos de aceros templables difíciles
- Aceros inoxidables 312, 314 y 303
- Soldabilidad de aceros difíciles

- **Análisis químico y propiedades del electrodo E 312-16 y E 309Mo-16**

El análisis químico y sus propiedades mecánicas del metal depositado se muestran en la tabla 24 y 25.

**Tabla 24**

*Análisis químico del electrodo E 312-16*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros.
0.10	1.00	0.90	Max.0.025	Max.0.02	0.5	10.00	29.00	-----	-----

Fuente: Manual de bolsillo. Orelikon S.A.

**Tabla 25**

*Análisis químico del electrodo E 309Mo-16*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros.
<0.15	<2.5	<1.2	-----	-----	2-3	11-14	22-25	-----	-----

Fuente: Manual de bolsillo. Voestalpine-Bohler.

**Tabla 26***Propiedades mecánicas del electrodo E 312-16*

Tratamiento térmico	Resistencia a la tracción [MPa (psi)]	Límite de fluencia [MPa (psi)]	de	Elongación en 2'' [%]	Energía absorbida (+20°C) [J]
Sin tratamiento	740- 840			Mayor a 25	-----

Fuente: Manual de bolsillo. Orelikon S.A.

**Tabla 27***Propiedades mecánicas del electrodo E 309Mo-16*

Tratamiento térmico	Resistencia a la tracción [MPa (psi)]	Límite de fluencia [MPa (psi)]	de	Elongación en 2'' [%]	Energía absorbida (+20°C) [J]
Sin tratamiento	>550	-		Mayor a 25	-----

Fuente: Manual de bolsillo. Voestalpine-Bohler.

**4.2. Probetas objeto de investigación****a) Características de las probetas**

Para la experimentación se usaron 8 probetas con las características que se muestran en la tabla 28.

**Tabla 28***Características de las probetas*

Denominación	Cantidad
Ancho (mm)	34.5
Longitud (mm)	72
Espesor (mm)	1/4 pulg (6.35 mm)

**b) Tipo de junta**

Se seleccionó una junta a tope, con chaflán en “V” con 60°. En la figura N° 48, se observan las probetas listas para su soldadura. En la figura 48 se puede observar las probetas para la experimentación.

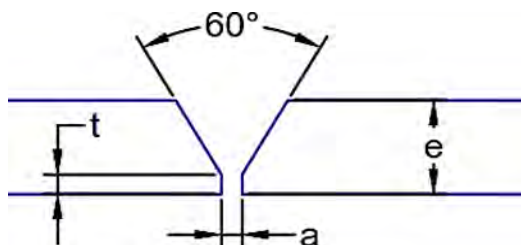
**Figura 48**

*Provetas de acero AISI 4340*



**Figura 49**

*Nomenclatura de la junta*



La junta tiene la nomenclatura que se muestra en la figura 49.

Donde:

**Tabla 29**

*Nomenclatura de la junta*

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Probeta de experimentación</i>
A	Cara de la raíz	2 mm
E	Espesor de la probeta.	6.35 mm
T	Abertura de raíz	2 mm

### 4.3. Soldabilidad de las probetas

#### 4.3.1. Condiciones de soldabilidad de las probetas.

La soldadura de las probetas se realizó con las condiciones descritas en la tabla



**Tabla 30***Condiciones de soldabilidad*

Proceso	SMAW
Espesor de material base	6.35 mm
Posición de soldadura.	1G
Numero de pasadas	1
Tipo de corriente	DCEP
Polaridad	Invertida
Material de aporte	E 312-16 y E 309Mo-16 Diámetro del electrodo: 1/8"
Velocidad de soldadura	Variado (mm/s)
Tipo de junta	A tope en "V" de 60°

**4.3.2. Cálculo de carbono equivalente.**

La soldabilidad de los aceros se evalúa mediante el parámetro denominado "carbono equivalente" (CE). Existen una gran cantidad de fórmulas empíricas para el cálculo del carbono equivalente. Para la soldadura de las probetas se estimó este cálculo, el cual se muestra en la tabla 31.

**Tabla 31***Determinación del carbono equivalente (CE)*

ACEROS AL CARBONO		
		<i>introducir los porcentajes de cada uno</i>
Elemento químico		<i>% de los elementos indicados</i>
(C)	Carbono	0.34
(Mn)	Manganeso	0.5
(Cu)	Cobre	1.5
(Ni)	Niquel	1.5
(Cr)	Cromo	0.2
(Mo)	Molibdeno	

(V)	Vanadio	0.3	
(Si)	Silicio		
Carbono equivalente (	0.913%	$C_{eq} = C + [(Mn+Si)/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15]$	(fórmula larga incluye Si)
Carbono equivalente (	0.863%	$C_{eq} = C + [(Mn)/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15]$	(fórmula larga)
Carbono equivalente (	0.465%	$C_{eq} = C + [(Mn)/4]$	(fórmula corta)

Fuente: [www.protubsa.com](http://www.protubsa.com)

Los resultados del cálculo de Carbono equivalente nos indican que este acero debe ser precalentado.

#### 4.3.3. Cálculo de la temperatura de precalentamiento para el acero AISI 4340 (método de Seferian)

Para el cálculo de la temperatura de precalentamiento se usó el método de SEFERIAN.

Aplicando las ecuaciones 2.17, 2.18 y 2.18, se tiene:

Método de Seferian: 
$$T_p = 350 \sqrt{C_t - 0.25}$$
 (ec. 2.17)

Donde:

$C_t = C_q + C_e$  (ec. 2.18)

$$C_q = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13}$$
 (ec. 2.19)

$C_e = 0.005 \times e(\text{mm}) \times C_e$

Donde:

$C_t$  = Equivalente total del carbono

$C_q$  = Equivalente químico

$C_e$  = Equivalente en carbono del espesor.

$e$  = espesor del material.

Reemplazando valores tenemos:

$$C_q = 0.34 + \frac{0.5 + 0.9}{9} + \frac{2}{18} + \frac{0.2}{13}$$

$$C_q = 0.62$$

$$C_e = 0.005 \times 6.35 \text{ mm} \times 0.62 = 0.019685 \text{ mm}$$

$$C_t = 0.62 + 0.019685 = 0.639685$$

Por lo tanto, la temperatura de precalentamiento del acero objeto de investigación es:

$$T_p = 350\sqrt{0.639685 - 0.25} = 218^\circ\text{C}$$

#### 4.4. Parámetros de las variables para soldadura

Los parámetros utilizados para la soldadura de las probetas se muestran en la tabla 32.

**Tabla 32***Parámetros de soldabilidad*

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión (V)	Velocidad de soldeo (mm/s)	de Eficiencia térmica (%)
1	70	22	2.48	75
2	90	23	2.48	75
3	105	24	2.48	75
4	120	25	2.48	75
5	130	27	2.48	75
6	80	25	2.48	75
7	100	23	2.48	75
8	110	22	2.48	75

**Figura 50***Soldabilidad de las probetas.*

## 4.5. Cálculos realizados

### 4.5.1. Cálculo del calor neto.

Para determinar el calor neto o la energía de soldeo se usó de la ec. 2.2.

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} (f) \quad \text{ec. 2.2.}$$

Donde:

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

V = Tensión de corriente (Voltios -V)

I = Intensidad de corriente (Amperios - A)

v = velocidad de avance (mm/s)

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

*Probeta N° 1*

$$H_{net} = \frac{22 \times 70}{2.48} (0.75) = 465.72 \text{ J/mm}$$

*Probeta N° 2*

$$H_{net} = \frac{23 \times 90}{2.48} (0.75) = 626.00 \text{ J/mm}$$

*Probeta N° 3*

$$H_{net} = \frac{24 \times 105}{2.48} (0.75) = 762.09 \text{ J/mm}$$

*Probeta N° 4*

$$H_{net} = \frac{25 \times 120}{2.48} (0.75) = 907.25 \text{ J/mm}$$

*Probeta N° 5*

$$H_{net} = \frac{27 \times 130}{2.48} (0.75) = 1061.49 \text{ J/mm}$$

*Probeta N° 6*

$$H_{neto} = \frac{25 \times 80}{2.48} (0.75) = 604.83 \text{ J/mm}$$

*Probeta N° 7*

$$H_{neto} = \frac{23 \times 100}{2.48} (0.75) = 695.56 \text{ J/mm}$$

*Probeta N° 8*

$$H_{neto} = \frac{22 \times 110}{2.48} (0.75) = 731.85 \text{ J/mm}$$

Los valores obtenidos se resumen en la tabla 33.

**Tabla 33**

*Valores de calor neto.*

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión (V)	Velocidad de soldeo (mm/s)	Eficiencia térmica (%)	Calor neto (J/mm)
1	70	22	2.48	75	465.72
2	90	23	2.48	75	626.00
3	105	24	2.48	75	762.09
4	120	25	2.48	75	907.25
5	130	27	2.48	75	1061.49
6	80	25	2.48	75	604.83
7	100	23	2.48	75	695.56
8	110	22	2.48	75	731.85

### 3.1.1. Cálculo del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC)

En el marco teórico fue desarrollada la ecuación del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC), y fue calculado a partir de la ecuación 2.4.

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left( \frac{1}{T_{fusion} - T_o} \right) \right] \times \left[ \frac{H_{neto}}{4.13 \rho x C x t} \right] \quad [ec. 2.4]$$

Donde:

Y = ancho de la ZAC (mm)

T<sub>max</sub> = Temperatura máxima en la zona adyacente al ZAC (°C)

T<sub>o</sub> = Temperatura inicial del material (°C)

T<sub>fusion</sub> = Temperatura de fusión (°C)

ρ = Densidad del material (g/mm<sup>3</sup>)

C = Calor específico del metal sólido (J/g. °C)

$t$  = Espesor del material (mm)

$H_{\text{neto}}$  = Calor neto (J/mm)

Los datos para el caso del acero se tienen los siguientes datos:

- Temperatura de fusión:  $T_{\text{fusión}} = 1500^{\circ}\text{C}$
- Temperatura máxima:  $T_{\text{max}} = 723^{\circ}\text{C}$
- Temperatura inicial:  $T_0 = 218^{\circ}\text{C}$
- Densidad del acero:  $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3 = 0.00785 \text{ g/mm}^3$
- Calor específico del acero:  $C = 0.134 \text{ cal/g. }^{\circ}\text{C} = 0.561 \text{ J/g. }^{\circ}\text{C}$
- Espesor del material:  $t = 6.35 \text{ mm}$

Tener en cuenta que la temperatura adyacente al ZAC ( $T_{\text{max}}$ ), se calculó cuando se proyectó la intersección de la línea  $Ac_3$  en el diagrama hierro- carbono, esto con el porcentaje de carbono del acero AISI 4340 (0.34%C). De lo cual se puede interpretar según diagrama hierro- carbono, a partir de  $850^{\circ}\text{C}$ , empiezan los cambios microestructurales del acero AISI 4340.

En cuanto a los calores netos ( $H_{\text{neto}}$ ), se obtuvieron a partir de la tabla 32 y 33, para las diferentes etapas de soldadura.

Cabe señalar que para hallar el calor específico volumétrico del acero, se debe tener en cuenta la densidad del acero y el calor específico del acero, como indica lo siguiente:

$$\rho C = \rho \times C = 0.00785 \times 0.561 = \mathbf{0.0044 \text{ J/mm}^3}.$$

*Prueba N° 1*

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{530 - 218} \right) - \left( \frac{1}{1500 - 218} \right) \right] \times \left[ \frac{465.72}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 9.79 \text{ mm}$$



*Probeta N° 2*

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{530 - 218} \right) - \left( \frac{1}{1500 - 218} \right) \right] x \left[ \frac{626.00}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 13.15 \text{ mm}$$

*Probeta N° 3*

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{530 - 218} \right) - \left( \frac{1}{1500 - 218} \right) \right] x \left[ \frac{762.00}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 16.01 \text{ mm}$$

*Probeta N° 4*

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{530 - 218} \right) - \left( \frac{1}{1500 - 218} \right) \right] x \left[ \frac{907.25}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 18.28 \text{ mm}$$

*Probeta N° 5*

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{530 - 218} \right) - \left( \frac{1}{1500 - 218} \right) \right] x \left[ \frac{1061.49}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 22.31 \text{ mm}$$

*Probeta N° 6*

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{530 - 218} \right) - \left( \frac{1}{1500 - 218} \right) \right] x \left[ \frac{604.83}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 12.71 \text{ mm}$$

*Probeta N° 7*

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{530 - 218} \right) - \left( \frac{1}{1500 - 218} \right) \right] x \left[ \frac{695.56}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 14.62 \text{ mm}$$

*Probeta N° 8*

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{530 - 218} \right) - \left( \frac{1}{1500 - 218} \right) \right] x \left[ \frac{731.85}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 15.38 \text{ mm}$$

Los valores obtenidos se resumen en la tabla

**Tabla 34**

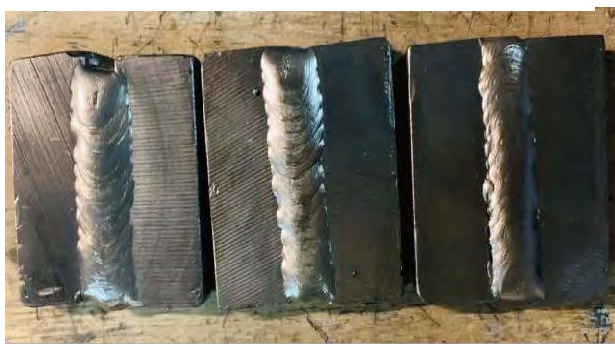
*Ancho de la ZAC*

Probeta	Ancho de la ZAC (mm)
1	9.79 mm
2	13.15 mm
3	16.01 mm
4	18.28 mm
5	22.31 mm
6	12.71 mm
7	14.62 mm
8	15.38 mm

En la figura 51 se observa las probetas soldadas.

### **Figura 51**

*Probetas soldadas.*



## **4.6. Control de calidad de las probetas**

### **4.6.1. Inspección visual de las probetas soldadas**

Una vez ejecutado los depósitos en las probetas, se realizó la inspección visual de las mismas con la finalidad de seleccionar la mejor probeta para su posterior análisis.

La inspección visual se aplica para verificar la calidad del depósito. La inspección visual constituye una parte importante del control de calidad práctico. De manera que la inspección visual es de importancia primordial.

El ensayo de inspección visual es un método de ensayo no destructivo que permite la detección de discontinuidades que afectan a la superficie visualmente accesible de los objetos.

La inspección visual es el método no destructivo por excelencia, siendo su alcance de aplicación extremadamente extenso.

En la tabla N° 35, se detallan los resultados del examen visual.

**Tabla 35**

Resultados del examen visual.

Probeta	Defecto	Causa	Calidad del deposito
1	Penetración Incompleta	Intensidad de corriente baja. Excesiva velocidad de soldeo.	Mala
2	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja, alta velocidad de soldeo	Regular.
3	Deposito aceptable	Velocidad de soldeo aceptable Intensidad de corriente aceptable	Buena
4	Deposito Correcto	Amperaje, velocidad de soldeo y Ángulo de soldeos ideales.	Muy Buena.
5	Exceso de penetración	Exceso de recargue de material, lenta velocidad de soldeo	Mala
6	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja.	Mala
7	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja	Regular
8	Deposito aceptable	Velocidad de soldeo aceptable	Buena

De los resultados de control de calidad, se seleccionó la probeta N° 4 para continuar con los estudios siguientes.

#### **4.6.2. Cálculo de la composición química del depósito soldadura (Probeta seleccionada N° 4)**

Para calcular la composición química del depósito de soldadura, previamente se tiene que determinar la dilución total.

- ***Cálculo del coeficiente de dilución.***

Para calcular el coeficiente de dilución se extrae una sección transversal de la probeta soldada. A esta probeta se le pule y se hace un ataque químico para que pudiera observarse y determinarse cuantitativamente las zonas, como se aprecia en la figura 52

**Figura 52**

*Probeta soldada atacada con el reactivo AGUA REGIA.*

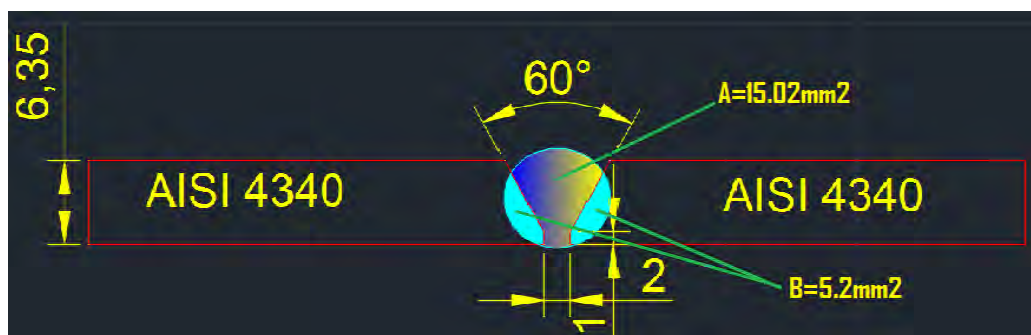


#### ***4.6.3. Cálculo de la dilución***

Una vez hecho las mediciones respectivas al cordón de soldadura, estas se grafican usando el software de dibujo asistido por computadora (AutoCAD), el que se visualiza en la figura 53.

**Figura 53**

*Dimensiones de la sección transversal de la probeta*



Para el cálculo de la dilución hacemos uso de la ecuación N° 2.17

$$\text{Porcentaje de dilucion} = \frac{B}{A+B} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de dilucion} = \frac{5.2}{15.02 + 5.2} \times 100 = 20.4$$

De acuerdo a los valores de la figura 57, calculamos la dilución:

En base a este resultado calculamos la composición química del depósito con la siguiente ecuación:

$$X_w = (DT) (X_A) + (1-DT) (X_f) \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde:

$X_w$  = Porcentaje medio del elemento X en el depósito (composición del metal base).

$X_A$  = Porcentaje medio del elemento X en el metal base A.

$X_f$  = Porcentaje medio del elemento X en el metal de aporte (a determinar)

$DT$  = Porcentaje de dilución del metal base A expresado como un decimal.

En la tabla 36, se tienen las composiciones químicas del acero AISI 4340 y del electrodo E312 – 16.

**Tabla 36**

*Composiciones químicas del acero AISI 4340 y del electrodo E312 – 16.*

Elemento	Acero AISI 4043	Metal de aporte E 312-16
Carbono (C)	0,34%	0.10%
Manganeso (Mn)	0.5%	1.00 %
Fósforo (P)	-----	0.025 %
Azufre (S)	-----	0.02%

Silicio (Si)	0,3%	0.30%
Niquel (Ni)	1.5 %	10.00 %
Cromo (Cr)	1.5 %	29.00 %
Molibdeno (Mo)	0.2 %	0.5 %

---

Fuente: Manual de bolsillo. Oerlikon S.A.

**Tabla 37**

*Cálculo de la composición química del depósito de soldadura.*

---

$\%C = 0.204(0.34) + (1-0.204) (0.10) = 0.15\%$
$\%Mn = 0.204(0.5) + (1-0.204) (1) = 0.89\%$
$\%Si = 0.204(0.3) + (1-0.204) (0.30) = 0.3\%$
$\%P = 0.204(0) + (1-0.204) (0.25) = 0.2\%$
$\%S = 0.204(0) + (1-0.204) (0.02) = 0.016\%$
$\%Ni = 0.204(1.5) + (1-0.204) (10) = 8.27 \%$
$\%Cr = 0.204(1.5) + (1-0.204) (29) = 23.39 \%$
$\%Mo = 0.204(0.2) + (1-0.204) (0.5) = 0.44\%$

---

Resumiendo, entonces la composición química (%) final del depósito, se muestra en la tabla 38.

**Tabla 38**

*Composición química del depósito*

---

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo
0.15	0.89	0.3	0.2	0.016	8.27	23.39	0.44

---

#### **4.6.4. Cálculo de la temperatura máxima**

De la probeta seleccionada (probeta 4, que tiene 9.14 mm), calcularemos la temperatura máxima para diferentes anchos de la ZAC haciendo uso de la fórmula:

$$T_{max} = \frac{1}{\frac{4.13 \times \rho \times C \times t \times Y}{H_{neto}} + \frac{1}{T_{ofusion} - T^{\circ}}} + T^{\circ}$$

Donde:

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

$T_o$  = Temperatura inicial de la chapa.

$T_f$  = Temperatura de fusión

$\rho \cdot C$  (calor específico volumétrico) =  $0.044 \left( \frac{J}{mm^3 \cdot ^{\circ}C} \right)$

$H_{neto}$  = energía aportada neta (J/mm).

a) **Para 50% de la ZAC (9.14 mm):**

$$T_{max} = \frac{1}{\frac{4.13 \times 0.0044 \times 6.35 \times 9.14}{907.25} + \frac{1}{1500 - 218}} + 218 = 732^{\circ}C$$

b) **Para 25% de la ZAC (4.57 mm):**

$$T_{max} = \frac{1}{\frac{4.13 \times 0.0044 \times 6.35 \times 4.57}{907.25} + \frac{1}{1500 - 218}} + 218 = 952^{\circ}C$$



#### 4.6.5. Cálculo de la velocidad de enfriamiento

La velocidad de enfriamiento tiene efecto sobre la estructura metalúrgica y las propiedades mecánicas de la ZAC. Por esta razón es que se calcula la velocidad de enfriamiento en el depósito del recubrimiento.

Para determinar la velocidad de enfriamiento, primeramente, es necesario determinar si el espesor de la probeta corresponde a una plancha delgada o gruesa, para esto se utiliza la ecuación 3.5.

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

Reemplazando valores se tiene:

$$r = 9.00 \sqrt{\frac{0.0044(1500 - 218)}{907.25}} = 0.69$$

Como el valor calculado es mayor a 0.6, entonces para calcular la velocidad de enfriamiento se aplica la siguiente ecuación:

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

Dónde:

$R$  = Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura (C/seg) en el momento justo en que el punto se está enfriando a la temperatura de interés  $T_c$ .

$k$  = Conductividad térmica del metal (J/mm, x seg, x °C)

Para nuestro caso tenemos los valores siguientes:

$K$  = Conductividad térmica del acero, 0.052 J/mm-seg-°C

$T_c$  = 530 °C.

$T_o$  = Temperatura inicial = 218 °C

a) En el depósito de soldadura.

$$R = \frac{2\pi(0.052)(1500 - 218)}{907.25} = 592 \text{ } ^\circ\text{C/seg.}$$

b) Para un ancho de ZAC = 4.57 mm.

$$R = \frac{2\pi(0.052)(952 - 218)}{907.25} = 194.00 \text{ } ^\circ\text{C/seg.}$$

c) Para un ancho de la ZAC = 9.14 mm.

$$R = \frac{2\pi(0.052)(732 - 218)}{907.25} = 95 \text{ } ^\circ\text{C/seg.}$$

**Tabla 39**

*Resumen del cálculo de la velocidad de enfriamiento.*

Ancho de la ZAC		Velocidad de enfriamiento (°C/seg)
Porcentaje (%)	En milímetros	
Deposito	-----	592.00
25	4.57	194.00
50	9.14	95.00

#### **4.6.6. Ensayo metalográfico.**

El objetivo del ensayo metalográfico es identificar los cambios microestructurales ocurridos por efecto del calor aportado.

##### **a) Procedimiento de preparación de las probetas**

- *Desbaste.* - Se usó en primera instancia el desbastador con lijar # 280, las probetas de desbaste en la cara y costado, donde se logró una superficie libre de irregularidad y también se quitó las impurezas y el óxido presente. Luego se desbaste con los lijares # 400 y # 600, en el cual se logró una superficie lisa y fina.

**Figura 54**

*Desbaste de las probetas.*



Fuente: [Fotografía de Dina Hancoo] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

- *Pulido.* - Una vez concluido el desbaste se continuo con la etapa de pulido, donde se empleó la pasta de diamante brasso, hasta obtener una superficie brillante y lisa, tal como se observa en la figura 54.

### Figura 55

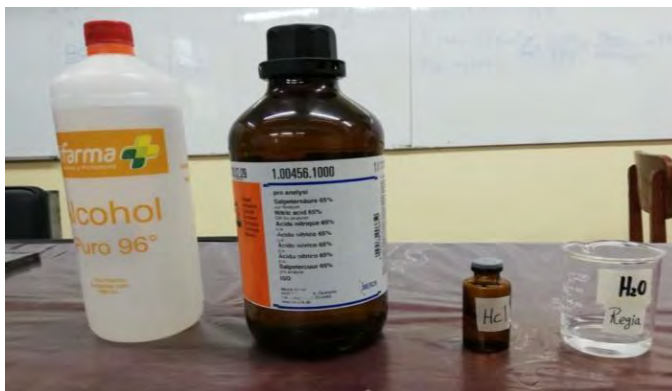
*Pulido de probetas.*



- *Ataque químico.* - Al concluir con el pulido, se procedió con el ataque químico para lo cual se utilizó los materiales e insumos como Alcohol al 96%, y Reactivo Agua Regia ( $\text{HNO}_3+3\text{HCl}$ ) para el ataque químico de las probetas. Cabe indicar que el Agua regia se preparó en proporción de 3 a 1 partes en volumen; es decir se preparó 12 ml de Ácido clorhídrico concentrado al 37% ( $\text{HCl}$ ) y 4ml de Ácido Nítrico concentrado al (65%). En la figura 58 se observa los insumos para preparar el reactivo de ataque.

## Figura 56

*Materiales e insumos usados en el ataque químico.*



Fuente: [Fotografía de Dina Hanco] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

Una vez listo todos los materiales se procedieron con el ataque químico, en el siguiente orden:

1. Se limpió la superficie de las probetas con algodón empapado de alcohol de 96°.
2. Se secó la superficie con una secadora manual.
3. Se realizó el ataque químico con Agua regia durante 4 minutos con 15 segundos.
4. Se realizó el lavado y el enjuague con alcohol a 96°.
5. Luego se procedió el secado final.

En la figura 57 Se observa las probetas después del ataque, donde se visualizan muy claramente la zona de soldadura.

**Figura 57**

*Probetas después del ataque químico*



Fuente: [Fotografía de Dina Hanco] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

La observación en el microscopio consistió en identificar las microestructuras del depósito de soldadura y la ZAC. Se enfatizó en diferenciar y analizar la zona de fusión (ZF) de la soldadura y sobre todo la zona afectada por el calor (ZAC), ver la figura 58.

**Figura 58**

*Observación de las microestructuras con el microscopio*



Fuente: [Fotografía de Dina Hanco] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

#### 4.6.7. Control de calidad de Prueba de dureza.

El ensayo de dureza se realiza con la finalidad de observar cómo variaron la dureza en el depósito de soldadura y la ZAC como consecuencia del cambio microestructural. En la figura N° 59 y en la figura 60 se puede observar la probeta y los puntos donde se han tomado las durezas.

**Figura 59**

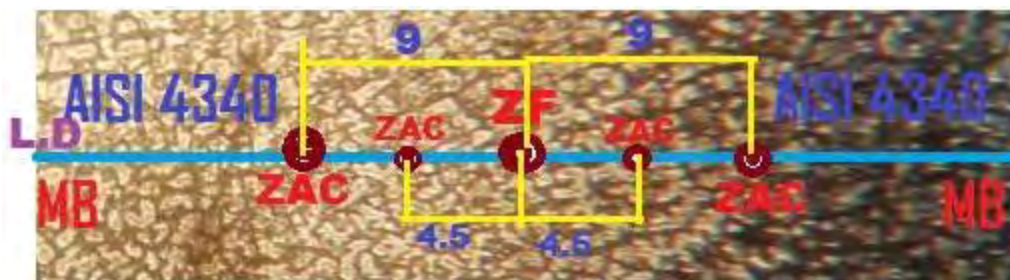
*Probeta para la prueba de dureza.*



Fuente: [Fotografía de Dina Hanco] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica,

**Figura 60**

*Esquema de barrido de dureza*



En la figura 60, se aprecia, que los puntos para medir la dureza están ubicados sobre: el metal base (MB) y la zona afectada por el calor (ZAC), la zona de fusión (ZF) de la soldadura, todo a una distancia que se visualiza en milímetros. En la tabla 40 se

detallan las condiciones en que han sido tomadas las durezas.

**Tabla 40**

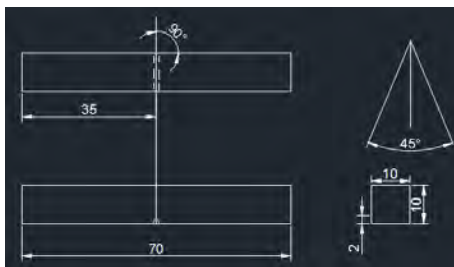
*Resultados de la dureza y tipo de microestructura*

Ancho de la ZAC (mm)	Veloc. De enfriamiento (°C/seg)	Dureza (HR C)	Tipo de microestructura
Deposito	592	46	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeños porcentajes de soluciones solidas de hierro y níquel; carburos de cromo.</li> <li>• Poco de austenita.</li> <li>• Martensita revenida.</li> </ul>
4.57	194.00	48	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeños porcentajes de soluciones solidas de hierro y níquel; carburos de cromo.</li> <li>• Martensita revenida.</li> </ul>
9.14	95.00	47	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeños porcentajes de soluciones solidas de hierro y níquel; carburos de cromo.</li> <li>• Martensita revenida.</li> </ul>
Metal base	-----	49	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Martensita revenida.</li> </ul> <p>Martensita revenida, es decir cementita dispersa en ferrita.</p>

#### 4.6.8. Control de calidad de Prueba de Charpy.

**Figura 61**

*Dimensiones de las probetas, para el ensayo de Charpy*



Este ensayo se realiza con la finalidad de conocer el comportamiento de las juntas



soldadas, si es dúctil o frágil. El ensayo de Charpy mide la energía absorbida por la junta soldada al deformarse y romperse; también es basado en la teoría de la conservación de la energía entre dos puntos, de esta forma es posible obtener la energía que se mide al chocar el martillo con la muestra de la junta soldada con dimensiones estandarizadas según norma ASTM E23-02-AWS B4.0. Para lo cual se prepararon las 2 probetas representativas, según las dimensiones observadas en la figura 61.

En la tabla 41, se observan los resultados de las dos probetas representativas

**Tabla 41**

*Resultados del ensayo de impacto Charpy*

N° probeta	Material /tipo de junta	Tamaño de muestra (mm <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Medio	Energía absorbida (Kg.m)	Expansión lateral (mm)
	Acero AISI 4340	10X10	20	Ambiente	26	3.80
4	Junta soldada	10X10	20	Ambiente	23	1.80
	Junta soldada	10X10	100	Horno	25	2.60

## CAPITULO V

### RESULTADOS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

#### 5.1. Inspección visual

**Tabla 42**

*Resultados de la inspección visual*

Probeta	Defecto	Causa	Calidad del deposito
1	Penetración Incompleta	Intensidad de corriente baja. Excesiva velocidad de soldeo.	Mala
2	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja, alta velocidad de soldeo	Regular.
3	Deposito aceptable	Velocidad de soldeo aceptable	Buena
4	Deposito Correcto	Intensidad de corriente aceptable Amperaje, velocidad de soldeo y Ángulo de soldeos ideales.	Muy Buena.
5	Exceso de penetración	Exceso de recargue de material, lenta velocidad de soldeo	Mala
6	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja.	Mala
7	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja	Regular
8	Deposito aceptable	Velocidad de soldeo aceptable	Buena

Interpretación. De la siguiente tabla 42. Se observa que las 8 probetas pasaron la inspección visual. De tal modo, la probeta N° 4, es muy buena, ya que no se encontraron discontinuidades, ni presencia de grietas, ni socavaciones, ni fusión incompleta que pudieran afectar la sanidad de la junta soldada.

## 5.2. Análisis metalográfico

### 5.2.1. Análisis e interpretación para el acero AISI 4340

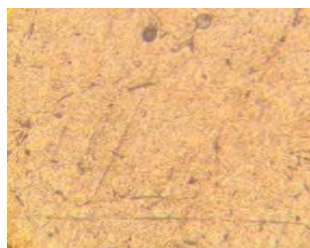
Resultados En la figura 62, se presenta la microestructura del metal base acero AISI 4340, en los aumentos de 100X y 500X, respectivamente.

**Figura 62**

*Microestructura del acero AISI 4340 a 100X y 500X*



100X



500X

Fuente: [Fotografía de Dina Hanco] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

**Interpretación.** A partir de la microestructura observada para el acero AISI 4340, se deduce una microestructura martensita revenida es decir cementita dispersa en ferrita., esto es cementita y ferrita.

En consecuencia, presenta propiedades de alta tenacidad, que se traduce en la resistencia a la tracción, de 1080 N/mm<sup>2</sup>, esto por presentar ferrita. Y alta ductilidad, que se traduce en el alargamiento, por presentar una matriz ferrítica.

### 5.2.2. Análisis e interpretación en el depósito de la soldadura con el electrodo E 312-16

En la figura 63, se pueden ver los resultados que se aprecian en las microestructuras presentadas en el depósito de la soldadura con el electrodo E 312-16. A una velocidad de enfriamiento de 592 °C/seg y una dureza de 46 HRC.

**Figura 63**

*Microestructuras en el depósito de la soldadura con el electrodo E 312-16*



A. ZAC – ZF (100X)

B. ZAC – ZF (200X)

Fuente: [Fotografía de Dina Hanco] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

***Interpretación:***

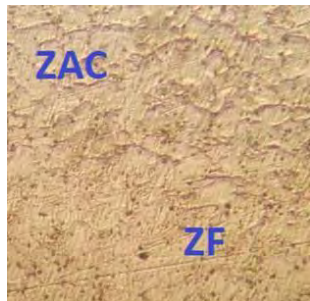
En el resultado de la microestructura presentada, se observa la combinación de martensita revenida (ferrita + cementita), y pequeños porcentajes de solución sólida de hierro y níquel, carburo de cromo y un poco de austenita. Esto es característico en estos depósitos de soldadura.

***5.2.3. Análisis e interpretación para 50% de la ZAC (9.14 mm), soldado con el electrodo E 312- 16***

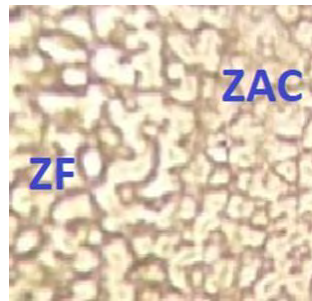
En la figura 64, se pueden ver los resultados que se aprecian en las microestructuras presentadas en el depósito de la soldadura con el electrodo E 312-16. A una temperatura máxima de 732°C y velocidad de enfriamiento de 95 °C/seg y una dureza de 47 HRC.

**Figura 64**

*Microestructuras para 50% de la ZAC (9.14 mm), soldado con el electrodo E 312-16*



A. ZAC – ZF (100X)



B. ZAC – ZF (200X)

Fuente: [Fotografía de Dina Hanco] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

#### **Interpretación:**

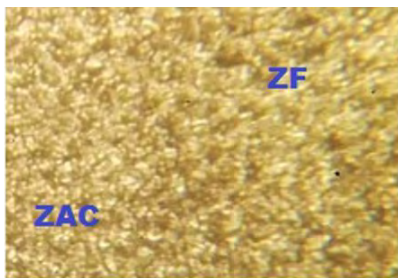
En el resultado de la microestructura presentada, se puede observar la combinación de martensita revenida (ferrita + cementita), y pequeños porcentajes de solución sólida de hierro y níquel, carburo de cromo. Esto indica que la junta soldada tiene buena ductilidad y tenacidad, es por ello que se alargan su vida útil.

#### **5.2.4. Análisis e interpretación para 25% de la ZAC (4.57 mm), soldado con el electrodo E 312- 16**

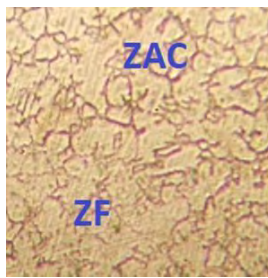
En la figura 65, se pueden ver los resultados que se aprecian en las microestructuras presentadas en el depósito de la soldadura con el electrodo E 312-16. A una temperatura máxima de 952°C y velocidad de enfriamiento de 194°C/seg y una dureza de 48 HRC.

#### **Figura 65**

*Microestructuras para 25% de la ZAC (4.57 mm), soldado con el electrodo E 312-16*



A. ZAC – ZF (100X)



B. ZAC – ZF (200X)

Fuente: [Fotografía de Dina Hanco] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

**Interpretación:** En el resultado de la microestructura presentada, se puede observar la combinación de martensita revenida (ferrita + cementita), y pequeños porcentajes de solución sólida de hierro y níquel, carburo de cromo. Esto indica que la junta soldada tiene buena ductilidad y tenacidad, es por ello que se alargan su vida útil.

### 5.3. Calor Neto

#### 5.3.1. Presentación de resultados de calor neto

El resultado del calor neto, altera las propiedades mecánicas en la ZAC y también para saber si produce cambio microestructural en la ZAC. En la siguiente tabla N° 43. Se muestran los resultados.

Tabla 43

Presentación de resultados de calor neto

N° de replica	N° de prueba	Factores			Tensión (voltios)	Veloci- dad de avance (mm/s)	Calor Neto (J/mm)
		escala decodificada					
		T.E (AWS)	I.C (A)	A.A.E (°)	(AISI 4340)	(AISI 4340)	(AISI 4340)
1	1	E 312-16	70	75	22	2.48	465.72
	2	E 312-16	90	75	23	2.48	626.00
	3	E 312-16	105	75	24	2.48	762.09
	4	E 312-16	120	75	25	2.48	907.25
	5	E 312-26	130	85	27	2.48	1061.94
	6	E 309Mo-16	80	85	25	2.48	604.83
	7	E 309Mo-16	100	85	23	2.48	695.56
	8	E 309Mo-16	110	85	22	2.48	731.85
	9	E 312-16	80	75	21	2.48	450.35
	10	E 312-16	85	75	23	2.48	560.70
	11	E 312-16	115	75	24	2.48	805.43
2	12	E 312-16	125	75	25	2.48	830.89
	13	E 312-26	85	85	23	2.48	600.70
	14	E 309Mo-16	75	85	23	2.48	597.04
	15	E 309Mo-16	125	85	24	2.48	750.56
	16	E 309Mo-16	130	85	26	2.48	1050.70

De la tabla N° 43, el calor neto, del acero AISI 4340 varía entre 465.72 – 1061.94 (J/mm), lo cual está dentro de los rangos previstos. Así mismo, es preciso analizar el calor neto en la ZAC.

### 5.3.2. Análisis e interpretación de resultados de calor neto en la ZAC para el acero AISI 4340

Para el análisis e interpretación de los resultados del calor neto obtenido en la ZAC, se seguirá el procedimiento, a partir de la tabla N° 44, donde se muestran los resultados para el calor neto en la ZAC del acero AISI 4340 conforme al diseño factorial  $2^3$  con 2 réplicas.

**Tabla 44**

*Resultados de calor neto obtenidas para la ZAC en el acero AISI 4340*

N° de replica	A: T.E (AWS)	B: I.C (A)	C:A.A.E (°)	A	B	C	Calor neto	Total
Calor Neto (AISI 4340) replica 1	E 312-16	70	75	-1	-1	-1	465.72	465.72=[1]
	E 312-16	90	75	1	-1	-1	626.00	a=626.00
	E 312-16	105	75	-1	1	-1	762.09	b=762.09
	E 312-16	120	75	1	1	-1	907.25	ab=1061.49
	E 312-26	130	85	1	-1	1	1061.49	c=907.25
	E 309Mo-16	80	85	1	-1	1	604.83	ac=604.83
	E 309Mo-16	100	85	-1	1	1	695.56	bc=695.56
	E 309Mo-16	110	85	1	1	1	731.85	abc=731.85



	E 312-16	80	75	-1	-1	-1	450.35	465.72=[1]
	E 312-16	85	75	1	-1	-1	560.70	a=626.00
	E 312-16	115	75	-1	1	-1	805.43	b=762.09
Calor	E 312-16	125	75	1	1	-1	830.89	ab=907.25
Neto	E 312-16	85	85	1	-1	1	600.70	c=1061.49
(AISI	E 312-26	75	85	1	-1	1	597.04	ac=604.83
4340)	E 309Mo-16	125	85	-1	1	1	750.56	bc=695.56
replica 2	E 309Mo-16	130	85	1	1	1	1050.70	abc=731.85

En la tabla N° 44, se puede ver el procesamiento de los resultados, donde es necesario evaluar si los efectos de las variables independientes sobre el calor neto en la zona afectada por el calor (ZAC) son significativos o no. Para poder lograr, se tiene que plantear las siguientes hipótesis nulas: H0: efecto de A = 0, H0: efecto de B = 0, H0: efecto de C = 0, H0: efecto de AB = 0, H0: efecto de AC = 0, H0: efecto de BC = 0 y H0: efecto de ABC = 0; cada una contra la hipótesis alternativa (Hi) de que el efecto en cuestión es diferente de cero. Estas hipótesis se comprueban con el análisis de varianza.

De tal modo, se empleó el software MINITAB, para los cálculos del análisis de varianza (ANOVA); donde se incluyen los siguientes cálculos: efectos de cada una de las variables, suma de cuadrados y el valor estadístico P. Seguidamente, se obtuvo la tabla ANOVA.

**Tabla 45**

*ANOVA para los datos de calor neto de la ZAC en el acero AISI 4340*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Medio Cuadrado</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
A (metal de aporte)	1	27.563	27.563	16.33	0.004
B (intensidad de corriente)	1	3.063	3.063	1.81	0.215
C (ángulo de avance)	1	14.063	14.063	8.33	0.020
Interacciones de 2 términos	3	43.187	14.396	8.53	0.007
A*B	1	27.562	27.562	16.33	0.004
A*C	1	1.562	1.562	0.93	0.364
B*C	1	14.063	14.063	8.33	0.020
Interacciones de 3 términos	1	1.562	1.562	0.93	0.364
A*B*C	1	1.562	1.562	0.93	0.364
Error	8	13.500	1.687		
Total	15	102.938			
R2 = 86.89 %		R2 ajustada = 75.41 %			

De la siguiente tabla N° 45, podemos hacer los siguientes análisis:

En la columna donde se muestra los valores de P, se rechazaron las siguientes hipótesis nulas: H0: efecto de A = 0, H0: efecto de C = 0 y H0: efecto de AB = 0, H0: efecto de BC = 0 cuyas entradas son menores que 0.05; sin embargo, se aceptaron las hipótesis nulas: H0: efecto de B = 0, H0: efecto de AC = 0, y H0: efecto de ABC = 0, cuyas entradas son mayores que 0.05.

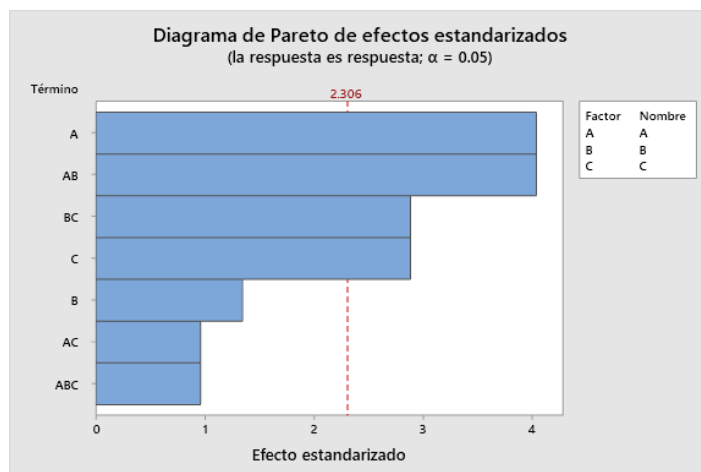
Por lo expuesto, se concluye que HA: efecto de A  $\neq$  0, HC: efecto de C  $\neq$  0, HAB: efecto de AB  $\neq$  0 y HBC: efecto de BC  $\neq$  0 respectivamente, con  $\alpha = 0.05$ . Es decir, se acepta que, si hay efecto de A, C, AB Y BC, es decir estos cuatro efectos están activos o

son significativos. Del valor  $F_0$  se observa que el efecto más importante es del factor A. También, al final del ANOVA se obtiene el coeficiente de determinación que indica que un alto porcentaje de la variabilidad en el experimento ( $R^2 = 86.89\%$ ) y esto será explicado por los efectos considerados en la tabla N° 45.

En la figura N° 66, se graficaron estos efectos en un diagrama de Pareto, con la finalidad de poder visualizar cuál de los efectos tiene mayor significancia, ya que dichos efectos se compararon en referencia al valor crítico en la tabla de distribución T Student con 8 grados de libertad y  $\alpha = 0.05$ , esto es  $t(0.025, 8) = 2.306$ . Por lo tanto, las barras que superen dicho valor son significativos.

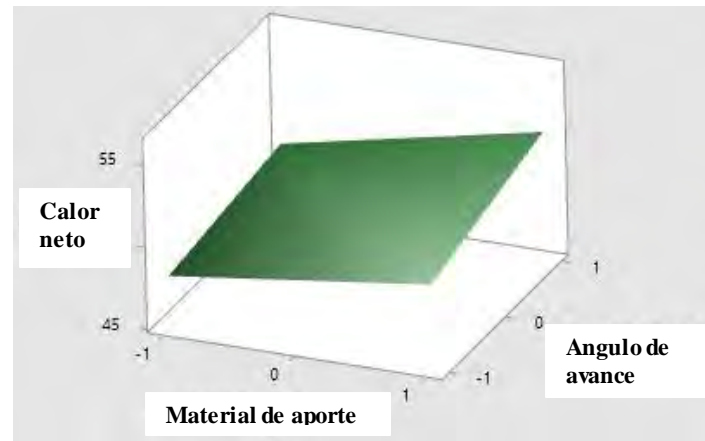
**Figura 66**

*Diagrama de Pareto de efectos*



**Figura 67**

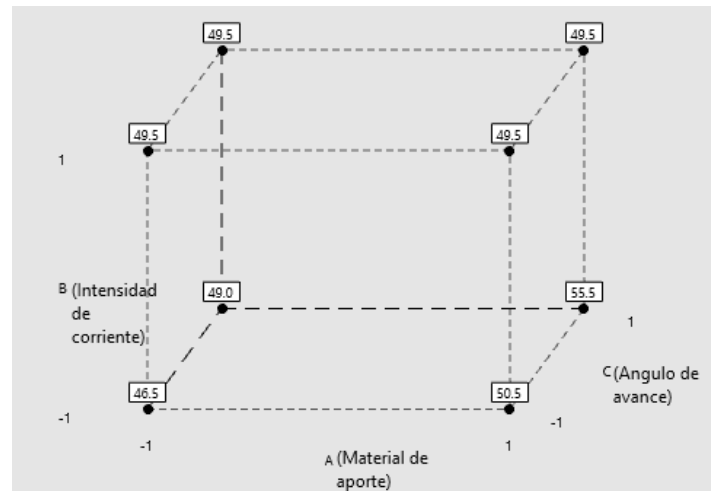
*Superficie de calor neto vs ángulo de avance, material de aporte*



De la figura N° 67, se puede apreciar una interacción muy importante entre el material de aporte y el ángulo de avance. De modo que se puede afirmar lo siguiente; que cuando el material de aporte con nivel bajo, el ángulo de avance si afectara de manera significativa el calor neto. Así mismo, cuando el material de aporte con nivel alto, el ángulo de avance no tiene un efecto considerable sobre el calor neto. Es decir, cuando se trabaja con material de aporte con nivel bajo, el calor neto será baja, y por lo tanto el ángulo de avance también se encuentre con nivel bajo.

**Figura 68**

*Grafica de cubo y respuesta predicha para el calor neto de la ZAC del acero AISI 4340*



De la figura N° 68, se deduce que los dos tratamientos de los factores, en donde el calor neto tienen valores mínimos son: (-1, 1, -1) y (1, 1,-1) y esto es (E 312-16, 120, 75) y (E 312-16, 125, 75), estas condiciones se pueden observar en la figura N° 68, por lo tanto, se puede apreciar en cada punto del diseño.

De este modo, para la predicción en cada punto del diseño en el cubo, se utilizó el modelo de la regresión, esto para ver los efectos que tienen una influencia significativa sobre el calor neto, y está en unidades codificadas a partir del ANOVA:

$$\text{Calor neto} = 49.938 + 1.313 A - 0.438 B + 0.938 C - 1.312 A*B + 0.313 A*C - 0.938 B*C - 0.312 A*B*C$$

#### **5.4. Control de Calidad de Prueba de Charpy y Prueba de dureza**

### 5.4.1. Presentación de resultados del ensayo de charpy y de la dureza.

Los resultados obtenidos en el ensayo de impacto Charpy se muestran en la tabla 46. Cabe señalar que, se realizó para las 2 probetas representativas y se empleó como la norma ASTM E23-02 – AWS B4.0

**Tabla 46**

*Resultados del ensayo de impacto Charpy y de la dureza*

N° probeta	Material /tipo de junta	Tamaño de muestra (mm <sup>2</sup> )	Temperatura a (°C)	Medio	Energía absorbida (Kg.m)	Expansión lateral (mm)
4	Acero AISI 4340	10X10	20	Ambiente	26	3.80
	Junta soldada	10X10	20	Ambiente	23	1.80
	Junta soldada	10X10	100	Horno	25	2.60

Ancho de la ZAC (mm)	Veloc. De enfriamiento (°C/seg)	Dureza (HR C)	Tipo de microestructura
Deposito	592	46	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeños porcentajes de soluciones solidas de hierro y níquel; carburos de cromo.</li> <li>• Poco de austenita.</li> <li>• Martensita revenida.</li> <li>• Pequeños porcentajes de soluciones solidas de hierro y níquel; carburos de cromo.</li> <li>• Martensita revenida.</li> <li>• Pequeños porcentajes de soluciones solidas de hierro y níquel; carburos de cromo.</li> <li>• Martensita revenida.</li> </ul>
4.57	194.00	48	
9.14	95.00	47	
Metal base	-----	49	

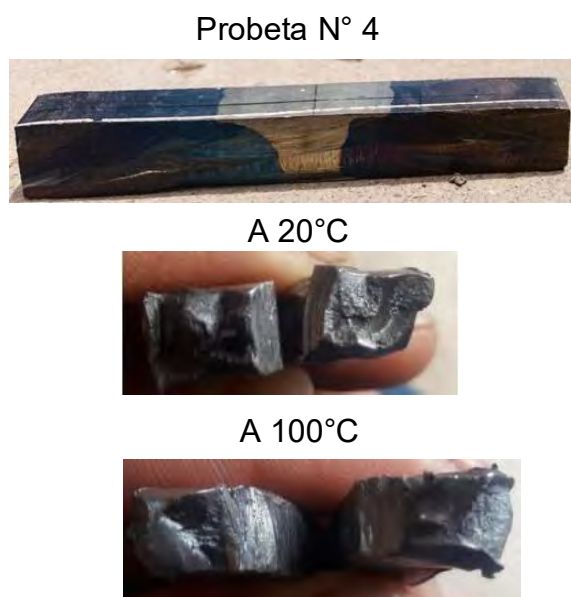
Martensita revenida, es decir cementita dispersa en ferrita.

**Interpretación:** En la tabla 46, se observa el resultado para el metal base y se encuentran dentro del margen establecido. Por un lado, el acero AISI 4340 presentó una energía absorbida de 26 Kg.m, esto es, un comportamiento dúctil, es decir tiene más resistencia elástica, por sus elementos de aleación.

Para el caso de la probeta N°4, para la junta soldada, fue necesario observar la superficie de la probeta rota, ver figura 69.

### Figura 69

*Superficie de la probeta rota por el ensayo Charpy*



Fuente: fotografía (Empresa SEM Ingenieros E.I.R.L., Cusco, 2020)

En base a la tabla 46 y a la figura 69, se observa un mejor comportamiento en la probeta N°04.

Por otro lado, a la temperatura de 100 °C, se presentó una situación diferente:

puesto que presento una mayor absorción de energía, incluso un poco mayor que el metal base.

En cuando a la dureza del metal base (MB), del acero AISI 4340 varía entre 46 - 49 HRC, lo cual está dentro de los rangos previstos. Así mismo, es preciso analizar la dureza de la (ZAC) y también la dureza de la zona fundida (ZF).

**Interpretación.** Se concluye que, es normal que la junta soldada presente un comportamiento de mayor fragilidad en comparación a la del metal base, puesto que sufrió alteraciones microestructurales, sobre todo en la zona afectada por el calor, esto se evidencia de mejor forma en la expansión lateral. Por otro lado, se entiende que al aumentar la temperatura aumente el flujo plástico en las partículas del acero que posibilitan que se deformen, por ende, que presente un comportamiento dúctil. Con todo ello se notó que la probeta con el tratamiento N° 04 presento un mejor comportamiento frente a esta prueba.

El resultado del barrido de dureza es después de haber hecho un post calentamiento de la probeta, esto con la finalidad de darle un poco más de dureza en la zona afectada por el calor (ZAC) y también mejorar sus propiedades mecánicas. En la tabla N° 46. Se muestran los resultados.

### **5.5. Interpretación de resultados del cálculo de dilución**

La dilución calculada fue de 20.4, es una dilución aceptable y que se presenta en general para este tipo de junta, esto es junta de ranura en V con penetración completa.

Por lo cual, el porcentaje de dilución es aceptable

### **5.6. Composición química del depósito de soldadura.**



Para la probeta soldada con el electrodo E312-16

**Tabla 47**

*Resultados de la composición química del depósito de soldadura con el electrodo E 312-16*

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo
0.15	0.89	0.3	0.2	0.016	8.27	23.39	0.44

**Interpretación.** Se puede observar que, el porcentaje de carbono del depósito de soldadura, con el electrodo E 312-16 es de 0.15 %C, que sería similar al del metal. Esto debido a que el metal de aporte, posee una composición menor de carbono y el metal base tiene más cantidad de carbono. Esto quiere decir, que el cordón de soldadura debe presentar un comportamiento dúctil y tenaz esto con la finalidad de evitar fisuras. De la misma forma, para los demás elementos de la composición química del depósito de soldadura, están influidas directamente por la composición química del metal base y del metal de aporte y también están influidas por la dilución. Esto influye en las propiedades mecánicas del cordón de soldadura.

## CONCLUSIONES

1. La probeta más representativa de las 8 probetas, es la probeta N° 4, donde se obtuvo un calor neto de 907.25 J/mm, por ende hubo influencia de calor neto en la microestructura del acero AISI 4340; teniendo los siguientes parámetros de soldabilidad: tipo de electrodo E 312-16, intensidad de corriente de 120 A, velocidad de avance del electrodo de 2.48 mm/s, ángulo de avance del electrodo de 75°.

Teniendo el siguiente modelo matemático:

$$\begin{aligned} \text{Calor neto (J/mm)} = & 49.938 + 1.313 A - 0.438 B + 0.938 C - 1.312 A*B + 0.313 A*C \\ & - 0.938 B*C - 0.312 A*B*C \end{aligned}$$

Donde, la variable más influyente en la determinación del calor neto es el material de aporte, seguido de la intensidad de corriente. En ese sentido el calor neto aportado influye en la microestructura del acero AISI 4340 y en las propiedades mecánicas. Comparando la microestructura del metal base (MB) y de la probeta N°4 soldado con el electrodo E 312-16, se obtuvo un ligero cambio microestructural, donde la microestructura del metal base tuvo como resultado: martensita revenida (ferrita + cementita); en comparación con la probeta N°4 se tuvo como resultado: martensita revenida (ferrita + cementita) y pequeños porcentajes de soluciones solidas de níquel y hierro y también carburos de cromo.

2. La intensidad de corriente influye en la soldabilidad del acero AISI 4340 de manera significativa, ya que trabajando con una intensidad de 120 amperios, se obtiene propiedades mecánicas similares al del metal base y no hubo endurecimiento elevado en la ZAC producto de los cambios microestructurales de la soldadura.

3. La dureza en la ZAC de 48 HRC frente a la dureza del metal base (MB) de 49 HRC, es decir no hubo endurecimiento elevado en la ZAC producto de los cambios microestructurales de la soldadura.
4. En el ensayo de impacto de Charpy, las juntas soldadas presentaron una ligera pérdida de ductilidad en comparación con el metal base de 26 Kgm a 23 Kgm, obteniéndose propiedades mecánicas similares entre el metal base y la junta soldada (probeta N°4), donde el metal base es dúctil y tenaz al igual que la junta soldada, pero la junta soldada también contiene soluciones solidas de níquel y carburos de cromo.
5. En el ensayo metalográfico, se obtuvo un tamaño de grano ASTM N° 5 en la ZF y ASMT N° 7 en la ZAC. Las formas de los granos en la ZAC son estriadas y aciculares, que es la combinación de martensita revenida (cementita + ferrita).
  - En la ZAC presenta un 79 % de martensita revenida (39% de cementita + 40% de ferrita) y 21 % entre (pequeños porcentajes de soluciones solidas de hierro y níquel; carburos de cromo). Esto quiere decir que hubo un ligero crecimiento de grano. Con esto se puede afirmar que es dúctil y tenaz por la presencia de cementita y ferrita.

## RECOMENDACIONES

1. Se debe seleccionar materiales de aporte con similar composición química al acero AISI 4340(material de aporte)
2. Se debe precalentar las probetas antes de soldar y de esta manera reducir la velocidad de enfriamiento de la unión, evitar el templado, disminuir las pérdidas de calor, eliminar la humedad.
3. Se debe realizar el post- calentamiento para mejorar sus propiedades mecánicas y aliviar las tensiones internas, así prevenir la fisuración.
4. Se debe seguir los procedimientos establecidos en el código de soldadura, como es el caso del código de soldadura estructural AWS D1.1.

**BIBLIOGRAFIA**

- Carlos Fosca Pastor, “Introducción a la Metalurgia de la Soldadura”, Lima, enero 2003. José Apraiz Barreiro, “Aceros Especiales”, 1978.
- Carlos Alonso Marcos, “Soldadura con Electrodo Revestido de Estructuras de Acero Carbono, Inoxidable y otros Materiales”,
- Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones, José Apraiz Barreiro, 1978.
- José Apraiz Barreiro, “Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones”, 1978.
- Hernández Riesgo, G, “Manual del soldador”, CESOL, 2000.
- José Antonio, Pero – Sanz Elorz, “Aceros, Metalurgia Física, Selección y Diseño”, James M. Gere, “Mecánica de Materiales”, 6ta edición, Grossman / Bain “Principios de tratamiento Térmico”,
- Soldaduras especiales para reparación, fabricación y mantenimiento, manual técnico, BHOLER – VOESTALPINE, 2008.
- A.P. GULIAEV, “Metalografía” 2da. Edición, 1983.
- Piredda, M. V. (1984). Soldadura eléctrica manual (2a ed.). México: Limusa. American Welding Society, “Structural Welding Code – Steel”, AWS, 2000. Manual de Mantenimiento, catalogo INDURA, marzo 2010.
- Manual de Durómetro Rockwell, RB-1,
- OERLIKON. (2001). Manual de soldadura. Lima: Exsa S.A.

## SITIOS WEB

ACEROS DE DIFÍCIL SOLDABILIDAD (s.f.). Recuperado el 30 de octubre de 2019, de <https://es.scribd.com/document/358456579/Aceros-de-dificil-Soldabilidad-pdf>

ACEROS AL CARBONO (s.f.). Recuperado el 10 de enero de 2020,

De <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn47.html>

CATALOGO OERLIKON. (2016). Recuperado el 22 de diciembre de 2019,

De [https://maher.es/assets/catalogos/OERLIKON\\_CATALOGO\\_2016.pdf](https://maher.es/assets/catalogos/OERLIKON_CATALOGO_2016.pdf)

ALEACIONES DE FIERRO (s.f.). Recuperado el 5 de octubre de 2019, de <http://rodolfo-novakovic.blogspot.com/2006/03/aleaciones-de-ferro.html>

<https://slideplayer.es/slide/5403410/>

DIAGRAMA DE FIERRO – CARBONO (s.f.). Recuperado el 15 de diciembre de 2019, de [diagramadeca.blogspot.com/2014/10/juntas-de-soldadura.html](http://diagramadeca.blogspot.com/2014/10/juntas-de-soldadura.html)

Diagrama de fases (hierro-carbono). (2015). Recuperado el 10 de agosto de 2019, de

[https://tratamientodelosmetales.wordpress.com/2015/11/14/diagramas-de-](https://tratamientodelosmetales.wordpress.com/2015/11/14/diagramas-de-faseshierro-carbon-y-regla-de-la-palanca/)

[faseshierro-carbon-y-regla-de-la-palanca/](https://tratamientodelosmetales.wordpress.com/2015/11/14/diagramas-de-faseshierro-carbon-y-regla-de-la-palanca/)

Ensayos de Rockwell (s.f.). Recuperado el 12 de octubre de 2019, de [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/pfcm2\\_7\\_3](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/pfcm2_7_3).

Equivalencias entre durezas. (s.f.). Recuperado el 11 de noviembre de 2019,

de<https://www.cemausa.com/docs/DUREZA.pdf>

Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). Análisis y diseños de experimentos (2a ed.). México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.

INDURA. (s.f.). Manual de mantenimiento. Recuperado el 10 de diciembre de 2019, de <http://www.indura.com.pe/Descargar/Manual%20de%20Electrodos%20de%20Mantenimiento%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fpe%2Fbiblioteca%2F88b5e916117e44998a73030487259a53.pdf>

MANUAL DEL SOLDADOR (s.f.). Recuperado el 17 de diciembre de 2019, de [https://www.taringa.net/+ebooks\\_tutoriales/manual-del-soldador-oxgasa\\_urqzk](https://www.taringa.net/+ebooks_tutoriales/manual-del-soldador-oxgasa_urqzk)

MICROCOSTITUYENTES DEL ACERO (s.f.). Recuperado el 15 de enero de 2020, de <file:///C:/Users/user/Downloads/CAP2%20Ferrita,%20perlita%20y%20cementita.pdf>

LINCOLN ELECTRIC. (s.f.). Soldeo manual con electrodos revestidos (SMAW). Recuperado el 15 de diciembre de 2019, de <https://www.solysol.com.es/data/documents/soldadura=20electrodo=20rec.doc.pdf>

Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido. (s.f.). Recuperado el 10 de diciembre de 2018, de [https://procesosunefa.wikispaces.com/file/view/Proceso\\_SMAW.pdf](https://procesosunefa.wikispaces.com/file/view/Proceso_SMAW.pdf)

SOLDEXA. (s.f). Manual de soldadura y catálogo de productos. Recuperado el 20 de noviembre de 2019, de

[https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/support/documentation/upload/manual\\_de\\_bolsillo.pdf](https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.pdf)

PROCESOS DE LA SOLDADURA (s.f). Recuperado el 30 de noviembre de 2019, de

<http://blog.utp.edu.co/metalografia/capitulo-18-soldadura-metalurgia-de-la-soldadura-procesos-de-soldadura-soldabilidad/>

POSICIONES DE SOLDADURA (s.f). Recuperado el 20 de octubre de 2019, de

<https://es.slideshare.net/OmarDanielRetamozo/soldadura-por-electrodosposiciones-de-soldadura>

SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO (s.f). Recuperado el 10 de enero de 2020, de

<http://soldaduraporarcoelectrico16.blogspot.com/2016/03/tipos-de-juntas-para-sodadura.html>

TESIS DE ACERO ESPECIAL SAE 4340 (s.f). Recuperado el 5 de enero de 2020, de

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon\\_cj/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap3.pdf)

Wikipedia. (s.f). Inspección por líquidos penetrantes. Recuperado el 5 de diciembre de 2019, de

[https://es.wikipedia.org/wiki/Inspecci%C3%B3n\\_por\\_l%C3%ADquidos\\_penetrantes](https://es.wikipedia.org/wiki/Inspecci%C3%B3n_por_l%C3%ADquidos_penetrantes)



# ANEXOS

## Anexo A

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tipo de variable	Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Rango	Técnica e instrumentos de medición
Independiente	Tipo de electrodo	Es un conductor utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito y también puede actuar como material de aporte en la soldadura.	Presenta una nomenclatura estándar formada por la letra E y cuatro dígitos.		EXXX		
	Intensidad de corriente	Es una magnitud que refleja el nivel de electricidad que logra atravesar un conductor en un determinado tiempo.	Es el número de electrones que viajan a través de un material por unidad de tiempo.		A	70 - 130	Amperímetro
	Angulo de avance de electrodo	Posición de soldeo en dirección de avance.	Es el ángulo con que se sostiene el electrodo durante la soldadura.		-	75-85	Goniómetro
Dependiente	Soldabilidad	Es la capacidad que tienen los materiales, de la misma o diferente naturaleza para ser unidos de manera permanente mediante procesos de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones.	La soldabilidad busca conseguir la continuidad metálica de la unión, que presenta las mismas propiedades del metal base, es decir, similar dureza, buena tenacidad, similar microestructura.	Calor neto	J/mm	465.72 – 1061.49	Microscopio metalográfico
				microestructura	Tamaño	-	
					Morfología	Acicular - equiaxial	
				% de microconstituyentes	Ferrita, cementita, carburos de cromo, solución sólida de níquel, martensita revenida.		
				Dureza	HRC	46-49	
Tenacidad de impacto	Kg.mm	23-26	Péndulo de Charpy				
Interviniente	Composición química del metal base	Naturaleza química de un Material			%		Microscopio electrónico
	Temperatura inicial	Estado inicial que se manifiesta en los cuerpos en forma de calor.			°C	218°	Pirómetro
	Velocidad de soldeo	Tiene que ser acorde del tipo de electrodo y la intensidad de corriente que se aplica.			Mm/seg	Determinar	

## Anexo B



## DEPARTAMENTO TÉCNICO

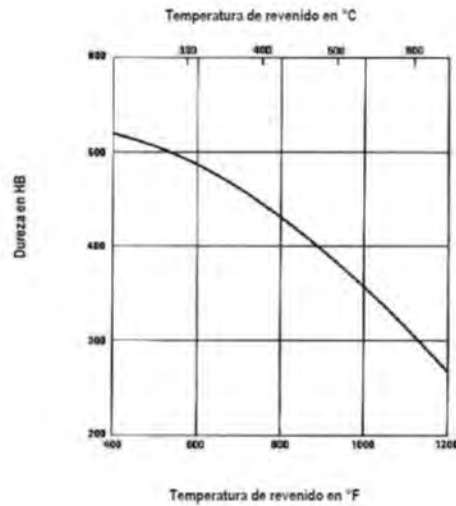
## ACERO GRADO MAQUINARIA

TX 15  
(SIMILAR AISI TIPO 4340)

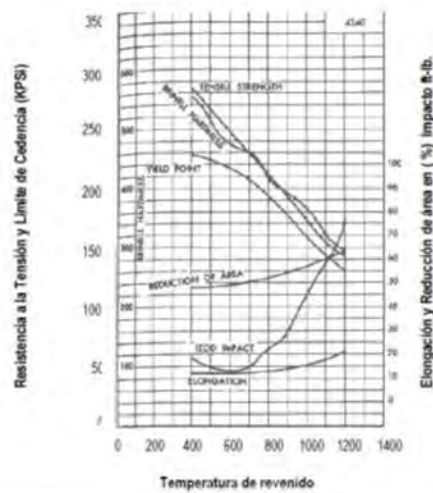
ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO		Carbono	0.40	Silicio	0.25
		Manganeso	0.70	Cromo	0.80
		Fósforo	0.035 máx.	Níquel	1.80
		Azufre	0.040 máx.	Molibdeno	0.25
DESCRIPCIÓN		Acero de baja aleación y medio carbono, su alta templeabilidad permite obtener buenas propiedades en secciones grandes es considerado como una buena opción en donde se requiere de buena dureza y alta tenacidad. Dependiendo del contenido de carbono puede alcanzar durezas de 54 a 59 HRC en estado de temple.		Debido a su alta templeabilidad puede ser endurecido al aire en secciones delgadas, puede ser forjado sin dificultad la maquinabilidad es relativamente pobre no debe ser considerado para la soldadura por métodos convencionales debido a la susceptibilidad de agrietarse.	
APLICACIONES		Industria automotriz: Cigüeñales, flecha para eje trasero, bielas motrices, propelas, engranes, flechas de dirección, semiejes para remolques, flechas de transmisión y potencia.		Industria de petróleo: Brocas de perforación, barrenas, cuerpos fresadores, collarines de perforación.	
TRATAMIENTO TÉRMICO		Normalizado: Calentar a 870 °C (1600 °F) y enfriar al aire.  Recocido: Para obtener una estructura predominantemente perlítica, calentar a 830 °C (1525 °F), enfriar rápidamente hasta 650 °C (1200 °F) y mantener por 8 hrs. Para obtener una estructura esferoidizada calentar a 750 °C (1380 °F) enfriar rápidamente a 705 °C (1300 °F), enfriar a 565 °C (1050 °F) a una velocidad de 3 °C por hora.		Endurecido: Austenizar a 845 °C (1550 °F) y enfriar rápidamente en aceite, para secciones delgadas puede enfriarse en aire.  Revenido: Calentar después del temple a la temperatura deseada para obtener la dureza propiedades mecánicas requerida. La figura 2 indica el efecto de la temperatura de revenido sobre la dureza.	
PROPIEDADES FÍSICAS		Dureza Rc en estado de temple			
		Redondo	Sup.	% Radio	Centro
		½"	58	58	56
		1"	57	57	56
		2"	56	55	54
		4"	53	49	47
		Temperaturas críticas			
		Ac <sub>1</sub> = 730 °C			
		Ac <sub>3</sub> = 775 °C			
		Coef. De expansión térmica			
		Rango Temp. X10 <sup>-6</sup> /°C			
		0-100 12.3			
		0-200 12.7			
		0-400 13.7			
		0-600 14.5			

Los datos indicados son típicos y una referencia básica, para detalles particulares dirigirse al departamento técnico de Aceros Fortuna al Tel. (0155) 5010-4898

**PROPIEDADES MECANICAS**



**Fig. 2 Dureza vs Temperatura de revenido**  
Normalizado a 870 °C (1600 °F)  
Templado en aceite a 845 °C (1550 °F)  
(Fuente: Republic Steel).



**Fig. 3 Propiedades Mecánicas vs Temperatura de revenido.**  
Normalizado a 871 °C Templado en aceite a 816 °C (Fuente Bethlehem Steel)

**CONDICION Y FORMAS DISPONIBLES**

Redondo,  
Solera,  
Placa.

Sin tratamiento termico.  
Recocido.  
Tratado.

Los datos indicados son típicos y una referencia básica, para detalles particulares dirigirse al departamento técnico de Aceros Fortuna al Tel. (0155) 5010-4898

## Anexo C

## SMAW

## Acero Inoxidable



## INOX 29/9

Electrodo cuyo depósito tiene una estructura austeno-ferrítica con Ferrita > 20%, insensible a la fisuración en caliente. El material depositado presenta una alta resistencia a la rotura y es muy empleado para soldar aceros de difícil soldabilidad y unir aceros disímiles. El revestimiento rutílico le permite obtener depósitos libres de poros y con buen acabado. El INOX 29/9 es resistente al impacto, calor, corrosión y a la fricción metal-metal. Los depósitos son maquinables.

Clasificación	
AWS A5.4 / ASME SFA-5.4	E312-16

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

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,10	1,00	0,90	máx. 0,025	máx. 0,020	0,5	10,00	29,00	-	-

## Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	740 - 840 (107 300 - 121 800)	> 600 (87 000)	> 25	-

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener en un lugar seco y evitar humedad.</li> <li>Almacenamiento bajo horno: 50°C.</li> <li>Resecado de 300°C a 350°C por 2 horas.</li> </ul>

Posiciones de Soldadura			
P, H, Va, Sc.			
			
1G	2G	3G	4G

## Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP								
Diámetro	[mm]	1,60	2,00	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	5/64	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	-	55	80	110	160	-	-
Amperaje máximo	-	-	85	120	150	220	-	-

## Aplicaciones

- Electrodo especial ideal para labores de mantenimiento y reparación, en todos los sectores industriales.
- Para soldar aceros al carbono y aceros aleados con problemas de soldabilidad (aceros de difícil soldabilidad).
- Para soldar una gran variedad de aceros: herramientas, tratados térmicamente, inoxidable y rápidos.
- Ideal para soldar aceros disímiles, unir acero al carbono con acero inoxidable y planchas de acero galvanizado.
- Para recuperar ejes, matrices, moldes, herramientas, cadenas, engranajes, paletas de agitadores, cremalleras, tornillos extrusores y en general, piezas de alta resistencia.
- Como base para recubrimientos protectores especiales.
- Muy usado en la industria siderúrgica (resistente al descascamiento hasta 110°C) para relleno de ejes, mandriles, rodillos, cama cojin para cuchilas de corte en caliente, etc.



## Anexo D

**UTP 653**

Electrodo austenítico especial para uniones y revestimientos. Rendimiento 120 %.

**Especificación**

AWS A5.4	AWS A5.4M	EN 1600
-E309Mo-16	-E309Mo-16	-E23 12 2 LR32

**Campo de aplicación**

UTP 653 se recomienda para uniones en aceros para calderas, aceros aleados, bonificados y de grano fino. Además se puede utilizar para juntas entre aceros aleados y no aleados, así como en aceros fundidos, aceros al manganeso endurecidos, aceros para herramienta.

Se utiliza también para unir aceros con recubrimiento anticorrosivo del lado del recubrimiento y como cordones base para recubrimientos anticorrosivos.

**Características**

Es ideal para la fabricación de moldes, dados y matrices. El molibdeno en relación con el alto contenido de cromo y níquel, endurece el depósito por medio de trabajo en frío (hasta 350 HB). Se suelda en todas las posiciones excepto en vertical descendente. Tiene arco estable y la escoria se quita fácilmente.

**Análisis estándar del depósito ( % en peso )**

C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo
< 0.15	22.00 - 25.00	11.00 - 14.00	< 2.50	< 1.20	2.00 - 3.00

**Propiedades mecánicas típicas del depósito**

Resistencia a la tracción MPa	Alargamiento (l = 4d) %
> 550	> 25

22

**Instrucciones para soldar**

Mantenga un arco corto con el electrodo en posición perpendicular, con respecto al trabajo. Soldar utilizando bajo amperaje. Utilizar siempre electrodos secos. Electrodos húmedos por haber estado expuestos al ambiente, se deben secar a una temperatura entre 250 y 300 °C de 2 a 3 h.

En espesores gruesos, y de acuerdo al material base, se debe realizar un precalentamiento entre 150 y 400 °C.

**Posiciones de soldadura      Tipos de corriente**

Corriente Directa / Electrodo Positivo (DC/EP) (= +)

**Parámetros recomendados**

Electrodo	Ø x L (mm)	2,4 x 250	3,2 x 350	4,0 x 400	5,0 x 450
Amperaje	(A)	50 - 80	80 - 110	110 - 140	140 - 180

**Presentaciones**

StaPac (caja de cartón)  
Caja de cartón de 5 kg

CanPac (Lata sellada herméticamente)  
Pregunte a nuestro Representante Técnico la disponibilidad de esta presentación.

Los datos e información contenidos en esta ficha técnica son exclusivamente para dar orientación acerca de la aplicación de ciertos productos. El usuario es totalmente responsable de la debida utilización de dichos productos para dar cumplimiento con los estándares, especificaciones, procedimientos de mantenimiento y códigos de construcción, fabricación, montaje o reparación aplicables.