

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



**TESIS**

**SOLDABILIDAD DEL ACERO AVANZADO DE ALTA RESISTENCIA (AHSS)  
DEL TIPO MARTENSÍTICO DE DOBLE FASE POR EL PROCESO TIG**

**PRESENTADO POR:**

-Br. YETMAR HUALLPARIMACHI LEIVA

-Br. JUAN CARLOS HUAMAN GASPAR

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

**ASESOR:**

ING. EDUARDO MARCELO QUISPE NINA.

**CUSCO – PERÚ**

2023

## INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: SOLDABILIDAD DEL ACERO AVANZADO DE ALTA RESISTENCIA (AHSS) DEL TIPO MARTENSITICO DE DOBLE FASE POR EL PROCESO TIG.

presentado por: YETMAR HUALLPARINACHI LEIVA con DNI Nro.: 74069415

presentado por: JOAN C. HUANDU GASPAR con DNI Nro.: 75657396

para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6% %.

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

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 09 de ENERO de 2024.



Firma

Post firma: Eduardo Marcelo Bluspe Nina

Nro. de DNI: 23957149

ORCID del Asesor: 0000 - 0002 - 4473 - 1580

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259: 302559205

NOMBRE DEL TRABAJO

**Tesis Soldabilidad del acero avanzado de alta resistencia (AHSS) del tipo martensítico de docle fase**

AUTOR

**YETMAR HUALLPARIMACHI LEIVA y**

RECUENTO DE PALABRAS

**21636 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**117337 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**128 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**8.6MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jan 9, 2024 2:39 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jan 9, 2024 2:41 PM GMT-5**

### ● 6% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 6% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 30 palabras)

## 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: “SOLDABILIDAD DEL ACERO AVANZADO DE ALTA RESISTENCIA (AHSS) DEL TIPO MARTENSÍTICO DE DOBLE FASE POR EL PROCESO TIG. (INVESTIGACION TECNOLOGICA)”

El presente trabajo de investigación permitirá conocer a los interesados en la soldadura, la soldabilidad de estos aceros muy poco conocidos en la ciudad del Cusco.

Yetmar Huallparimachi Leiva.

Juan Carlos Huamán Gaspar.

## DEDICATORIA

A Dios por haberme otorgado fortaleza, perseverancia y salud para poder concluir mis estudios universitarios.

A mi madre victoria por poner en mi toda su fe y su confianza de ver este sueño hecho realidad.

A mi hermano Windel por su apoyo por estar presente en cada momento, por darme sus positivos consejos, por su confianza, por ser el hermano y amigo por eso y más infinitas gracias, y así poder culminar con éxito mi tesis.

Yetmar Huallparimachi Leiva.

## DEDICATORIA

A Dios por brindarme la vida, la salud y sabiduría para seguir capacitándome, de esta manera lograr cada una de mis metas.

A mis padres, Gerardo y Dorotea por brindarme todo su apoyo y consejos que un hijo necesita y por ser mi más grande motivación y motor en mi vida, a mi hermano José Luis por su apoyo, consejo y comprensión y compartir sus conocimientos y experiencias, así poder culminar con éxito mi tesis.

Juan Carlos Huamán Gaspar.

## AGRADECIMIENTO

A nuestra alma mater Universidad Nacional San Antonio Abad Del Cusco, nuestra primera casa de estudios, por haberme formado como investigadores para brindar beneficios a la sociedad.

A los docentes de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica que con sus conocimientos y sobre todo su formación en la rectitud y valores

de esfuerzo, me apoyaron desde el inicio de la etapa universitaria a desenvolverme en el ámbito profesional.

A mis padres por darnos la facilidad para lograr una formación como personas responsables y educadas.

A mis familiares, quienes con sus consejos y apoyo supieron guiarnos a lo largo de nuestra carrera y de quienes aprendimos que con perseverancia y esfuerzo se logra el éxito.

En especial a nuestro asesor: Ing. Eduardo Marcelo Quispe Nina, por su apoyo, su paciencia, confianza, conocimientos y sobre todo su formación educativa y valores como profesional.

Los tesisistas.

## ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT.....	xv
SIMBOLOGÍA .....	xvii
CAPITULO I .....	1
METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Problema General Y Especificos.....	2
1.2.1. Problema General.....	2
1.2.2. Problema Especifico .....	2
1.3. Justificación e Importancia.....	3
1.3.1. Justificación Tecnológica.....	3
1.3.2. justificación Social.....	3
1.3.3. justificación Económica.....	3
1.3.4. justificación Ambiental.....	3
1.4. Objetivo General Y Específico .....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Hipótesis General y Específicas .....	4
1.5.1. Hipótesis General.....	4
1.5.2. Hipótesis Específicos .....	5
1.6. Nivel o Tipo De Investigación .....	6
1.6.1. Explorativa.....	6
1.6.2. Descriptiva .....	6
1.6.3. Correlacional.....	6
1.6.4. Explicativa .....	6
1.7. Población Y Muestra.....	7
1.7.1. Población.....	7

1.7.2.	Muestra .....	7
1.8.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	7
1.8.1.	Técnicas .....	7
1.8.2.	Instrumentos.....	7
1.9.	Viabilidad.....	7
CAPITULO II.....		8
FUNDAMENTO TEORICO .....		8
2.1.	Antecedentes .....	8
2.1.1.	Antecedentes Nacionales .....	8
2.1.2.	Antecedentes Internacionales.....	9
2.2.	Aceros Avanzados de alta Resistencia .....	11
2.2.1.	Descripción General.....	11
2.2.2.	Clasificación de Los Aceros AHSS .....	12
2.2.3.	Sistema de Designación para los Aceros AHSS .....	13
2.2.4.	Propiedades Mecánicas de los Aceros AHSS.....	14
2.2.5.	Aplicaciones de los Aceros AHSS.....	15
2.2.6.	Clasificación De Los Aceros AHSS .....	17
2.2.6.1.	Aceros doble fase (DP).....	17
2.2.6.2.	Aceros TRIP. ....	23
2.2.6.3.	Aceros martensíticos (M) .....	28
2.2.6.4.	Acero de fase compleja (CP).....	31
2.2.6.5.	Aceros ferríticos-bainíticos (FB).....	31
2.2.6.6.	Aceros plasticidad inducida por maclaje (TWIN).....	32
2.2.7.	Conformabilidad de los Aceros Avanzados de Alta Resistencia.....	33
2.3.	Soldadura Por GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).....	35
2.3.1.	Fundamentos del Proceso .....	35
2.3.2.	Ventajas y Limitaciones.....	36
2.3.3.	Aplicaciones del Proceso de Soldadura GTAW .....	37
2.3.4.	Variables del Proceso.....	38
2.3.5.	Selección del Tipo de Corriente.....	40
2.3.5.1.	Arco con corriente continua. ....	41
2.3.5.2.	Arco con corriente alterna. ....	41
2.3.6.	Equipamiento .....	42
2.3.7.	Metales de Aportación .....	44

2.3.8.	Gases de Protección .....	44
2.3.9.	Cebado del Arco .....	45
2.4.	Zonas Metalúrgicas de la Soldadura .....	47
2.5.	Ciclo Térmico en la Unión Soldada .....	47
2.5.1.	Factores que Afectan en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco 48	
2.5.2.	Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor .....	49
2.5.3.	Fórmula de la Velocidad de Enfriamiento para Chapas Gruesas y Delgadas.....	50
2.6.	Microconstituyentes de los Aceros al Carbono .....	52
2.6.1.	Ferrita ( $\alpha$ ) .....	52
2.6.2.	Cementita ( $Fe_3C$ ).....	53
2.6.3.	Perlita (P) .....	54
2.6.4.	Austenita ( $\gamma$ ).....	55
2.6.5.	Bainita .....	56
2.6.6.	Martensita .....	56
2.7.	Tratamientos Térmicos de los Aceros al Carbono .....	57
2.8.	Diagramas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) .....	59
2.9.	Curvas de la “S” .....	60
2.10.	Posiciones de Soldadura .....	61
2.11.	Uniones Básicas de Soldadura.....	62
2.12.	Control de Calidad de las Soldaduras.....	63
2.12.1.	Ensayos Destructivos .....	63
2.12.2.	Ensayos no Destructivos .....	70
2.12.2.1.	Inspección visual. ....	70
2.12.2.2.	Líquidos penetrantes (PT). ....	72
2.13.	Discontinuidades de la Soldadura.....	74
CAPITULO III.....		83
METODO EXPERIMENTAL .....		83
3.1.	Maquinaria y Equipos .....	83
3.2.	Material de Ensayo.....	85
3.2.1.	Características y Codificación de las Probetas para Investigación.....	86
3.3.	Consumibles.....	87
3.3.1.	Material de Aporte ER70S-6 .....	87
3.3.2.	Argón .....	88
3.4.	Ejecución de la Soldadura de las Probetas .....	88

3.5.	Cálculo del Calor Aportado.....	91
3.6.	Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor .....	92
3.7.	Control de Calidad de las probetas.....	93
3.7.1.	Inspección Visual de los Cupones .....	93
3.7.2.	Inspección con Tintes Penetrantes .....	94
3.7.3.	Ensayo de Doblado Guiado de Cara y Raíz.....	98
3.7.4.	Ensayo de Dureza .....	100
3.8.	Resultados y Análisis .....	100
3.8.1.	Inspección Visual de los Cupones .....	101
3.8.2.	Inspección con Tintes Penetrantes .....	102
3.8.3.	Ensayo de Doblado Guiado de Cara y Raíz.....	102
3.8.4.	Ensayo de Dureza .....	102
CONCLUSIONES .....		104
RECOMENDACIONES.....		105
BIBLIOGRAFÍA .....		106

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Variables independientes.</i> .....	5
<b>Tabla 2</b> <i>Variables dependientes.</i> .....	5
<b>Tabla 3</b> <i>Interviniente o externa.</i> .....	5
<b>Tabla 4</b> <i>Ejemplos de grados de aceros y sus propiedades en base a ULSAB-AVC. YS y UTS son valores mínimos. Tot. EL (elongación total) es un valor típico para un gran rango de espesores y longitudes calibradas.</i> .....	14
<b>Tabla 5</b> <i>Propiedades mecánicas típicas de los principales grados de acero AHSS.</i> .....	15
<b>Tabla 6</b> <i>Composición química de aceros doble fase 600.</i> .....	21
<b>Tabla 7</b> <i>Composición química de aceros TRIP 800 [26].</i> .....	26
<b>Tabla 8</b> <i>Composición química del acero martencítico.</i> .....	30
<b>Tabla 9</b> <i>Características de tipos de corriente para soldadura GTAW</i> .....	39
<b>Tabla 10</b> <i>Características del soldeo de acuerdo con la corriente seleccionada.</i> .....	41
<b>Tabla 11</b> <i>Eficiencia térmica de los diferentes procesos de soldadura.</i> .....	48
<b>Tabla 12</b> <i>Propiedades mecánicas de la perlita.</i> .....	55
<b>Tabla 13</b> <i>Escalas de dureza Rockwell.</i> .....	65
<b>Tabla 14</b> <i>Características de la fuente de poder.</i> .....	83
<b>Tabla 15</b> <i>Características mecánicas del acero Mart 1250/1520.</i> .....	86
<b>Tabla 16</b> <i>Composición química del acero Mart 1250/1520</i> .....	86
<b>Tabla 17</b> <i>Propiedades mecánicas.</i> .....	87
<b>Tabla 18</b> <i>Análisis químico del metal depositado (valores típicos) (%).</i> .....	87
<b>Tabla 19</b> <i>Detalle de la junta a tope con bordes rectos.</i> .....	89
<b>Tabla 20</b> <i>Parámetros de soldabilidad.</i> .....	90
<b>Tabla 21</b> <i>Examen visual.</i> .....	94
<b>Tabla 22</b> <i>Visualización del examen por tintes penetrantes.</i> .....	98
<b>Tabla 23</b> <i>Ensayo de dobléz.</i> .....	99
<b>Tabla 24</b> <i>Altura de la penetración del indentador.</i> .....	100
<b>Tabla 25</b> <i>Valores calculados de Dureza (Rockwell C).</i> .....	100
<b>Tabla 26</b> <i>Durezas promedio.</i> .....	100
<b>Tabla 27</b> <i>Resultados de la inspección visual.</i> .....	101

<b>Tabla 28</b> <i>Resultados del ensayo por tintes penetrantes</i> .....	102
<b>Tabla 29</b> <i>Resultados del ensayo de doblado.</i> .....	102
<b>Tabla 30</b> <i>Resultados promedio del ensayo de dureza.</i> .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Clasificación de aceros AHSS en función de su conformabilidad.</i> .....	13
<b>Figura 2</b> <i>Carrocería para automóvil fabricada con diferentes grados de acero AHSS.</i> .....	17
<b>Figura 3</b> <i>Esquema de obtención de aceros DP por enfriamiento controlado [22].</i> .....	18
<b>Figura 4</b> <i>Esquema de la microestructura de los aceros DP.</i> .....	20
<b>Figura 5</b> <i>Representación esquemática de un ciclo de tratamiento térmico para producir un acero DP.</i> .....	20
<b>Figura 6</b> <i>El esquema muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros doble fase y su porcentaje de elongación.</i> .....	22
<b>Figura 7</b> <i>Comparación de la curva <math>\sigma</math>-<math>\epsilon</math> de un DP con un HSLA con el límite elástico similar (350Mpa). El acero DP presenta un trabajo de endurecimiento inicial más elevado, una tensión máxima más elevada y un radio YS/TS más pequeño que el HSLA.</i> .....	22
<b>Figura 8</b> <i>Esquema que muestra la obtención de los aceros TRIP [22].</i> .....	23
<b>Figura 9</b> <i>Microestructura típica de un acero TRIP [10].</i> .....	24
<b>Figura 10</b> <i>Esquema muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros TRIP y su porcentaje de elongación.</i> .....	27
<b>Figura 11</b> <i>Comparación de TRIP, DP y HSLA mediante curva <math>\sigma</math>-<math>\epsilon</math> ingenieril [10].</i> .....	27
<b>Figura 12</b> <i>Esquema de la microestructura de los aceros martensíticos.</i> .....	29
<b>Figura 13</b> <i>Esquema que muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros martensíticos y su porcentaje de elongación.</i> .....	30
<b>Figura 14</b> <i>Rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros de fase compleja y su porcentaje de elongación.</i> .....	31
<b>Figura 15</b> <i>Rangos de esfuerzo a la tensión y cedencia en aceros de FB.</i> .....	32
<b>Figura 16</b> <i>Esquema de los rangos de esfuerzo a la tensión y cedencia en aceros TWIP.</i> .....	33
<b>Figura 17</b> <i>Esquema del proceso TIG.</i> .....	35
<b>Figura 18</b> <i>Cebado del arco por raspado (G = fuente de alimentación).</i> .....	46
<b>Figura 19</b> <i>Zonas de la unión soldada.</i> .....	47
<b>Figura 20</b> <i>Microestructura del acero con 100% de Ferrita X100.</i> .....	52
<b>Figura 21</b> <i>Microestructura del acero 1%C, red blanca de cementita.</i> .....	53
<b>Figura 22</b> <i>Microestructura del acero con 100% Perlita x400.</i> .....	54

<b>Figura 23</b> <i>Microestructura de un acero de 0.2% de carbono enfriado lentamente</i> .....	56
<b>Figura 24</b> <i>Microestructura de la martensita X400</i> .....	57
<b>Figura 25</b> <i>Curvas temperatura – tiempo representativas de los tratamientos térmicos más importantes en aceros al carbono</i> .....	58
<b>Figura 26</b> <i>Ejemplo de diagrama TTT para un acero</i> .....	60
<b>Figura 27</b> <i>Curvas de la “S”</i> .....	61
<b>Figura 28</b> <i>Posiciones para soldadura de ranura (placas)</i> .....	61
<b>Figura 29</b> <i>Posiciones para soldadura de filete</i> .....	62
<b>Figura 30</b> <i>Posiciones para soldadura de tubos</i> .....	62
<b>Figura 31</b> <i>Uniones básicas de soldadura</i> .....	63
<b>Figura 32</b> <i>Dispositivo (matriz) para dobléz de probetas</i> .....	68
<b>Figura 33</b> <i>Soldadura en cara y raíz</i> .....	69
<b>Figura 34</b> <i>Kit básico de líquidos penetrantes</i> .....	73
<b>Figura 35</b> <i>Tipos de discontinuidades</i> .....	75
<b>Figura 36</b> <i>Grietas</i> .....	75
<b>Figura 37</b> <i>Falta de penetración</i> .....	76
<b>Figura 38</b> <i>Concavidades</i> .....	77
<b>Figura 39</b> <i>Concavidad interna</i> .....	77
<b>Figura 40</b> <i>Socavaduras</i> .....	78
<b>Figura 41</b> <i>Salpicadura</i> .....	78
<b>Figura 42</b> <i>Falta de continuidad del cordón</i> .....	79
<b>Figura 43</b> <i>Fisura longitudinal</i> .....	80
<b>Figura 44</b> <i>Fisuras</i> .....	80
<b>Figura 45</b> <i>Descuelgues</i> .....	81
<b>Figura 46</b> <i>Porosidades</i> .....	81
<b>Figura 47</b> <i>Deformaciones</i> .....	82
<b>Figura 48</b> <i>Fuente de poder</i> .....	83
<b>Figura 49</b> <i>Durómetro</i> .....	84
<b>Figura 50</b> <i>Equipo de dobléz</i> .....	85
<b>Figura 51</b> <i>Probetas codificadas</i> .....	86
<b>Figura 52</b> <i>Junta a tope con bordes rectos</i> .....	89

<b>Figura 53</b> <i>Soldadura de las probetas</i> .....	90
<b>Figura 54</b> <i>Kit de tintes penetrantes</i> .....	94
<b>Figura 55</b> <i>Limpieza de las probetas</i> .....	95
<b>Figura 56</b> <i>Recubrimiento de las probetas con el penetrante</i> .....	96
<b>Figura 57</b> <i>Aplicación del revelador</i> .....	97
<b>Figura 58</b> <i>Selección de la probeta para la prueba de dobléz</i> .....	98
<b>Figura 59</b> <i>Aplicación de carga en la parte central de la probeta</i> .....	99

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto que produce la intensidad de corriente en la soldabilidad de los aceros avanzados de alta resistencia del tipo martensítico por el proceso TIG, analizando las uniones soldadas a través de ensayos destructivos y no destructivos. Estas propiedades se analizan dado que la soldadura es disímil y sus propiedades mecánicas son diferentes. Las uniones se realizan con soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW), llamados también soldadura TIG. Estas uniones están soldadas de acuerdo con los parámetros de soldabilidad de la tabla número 20. La investigación presenta o se caracteriza por ser una investigación Explorativa, descriptiva, correlacional y explicativa, el nivel de investigación a emplearse en la presente tesis es el no experimental - descriptivo. La población son los aceros avanzados de alta resistencia AHSS, como muestra se tiene seis (06) probetas de aceros avanzados de alta resistencia del tipo martensítico de la estructura de un automóvil, los cuales fueron soldados con diferentes entradas de calor por el proceso TIG, muestran la variación de dureza en la zona del depósito y la ZAC. Se analiza con ensayos no destructivos: la inspección visual y por líquidos penetrantes; con los cuales se determina que las probetas T-3 y T-4 están libres de discontinuidades; se realizan ensayos de dureza en el cual como resultado promedio de ensayo de dureza se tiene MB: 25, ZAC:29.83, DS: 30.5, en la escala Rockwell. El ensayo de dureza muestra una zona de ablandamiento en la transición del metal base con el inicio de la ZAC con mayor pérdida de dureza a medida que aumenta el calor de entrada, en cambio la ZAC presenta un aumento en su dureza a medida que se disminuye el calor de entrada. Se realizó el ensayo doblez de cara y raíz, en el cual la probeta T-3 y T-4 dieron buenos resultados a la prueba, determinando que presentan buena ductilidad.

Palabras clave: Acero AHSS Martensítico, intensidad de corriente, Proceso TIG, dureza.

## ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the effect of current intensity on the weldability of advanced high-strength steels of the martensitic type by the TIG process, analyzing the welded joints through destructive and non-destructive tests. These properties are analyzed given that the weld is dissimilar and its mechanical properties are different. The joints are made with gas arc welding with tungsten electrode (GTAW), also called TIG welding. These joints are welded according to the weldability parameters of table number 20. The research presents or is characterized by being an Exploratory, descriptive, correlational and explanatory research, the level of research to be used in this thesis is non-experimental - descriptive. The population is the advanced high resistance steels AHSS, as a sample there are six (06) probes of advanced high resistance steels of the martensitic type of the structure of an automobile, which were welded with different heat inputs by the TIG process, show the variation of hardness in the deposit zone and the HAZ. It is analyzed with non-destructive tests: visual inspection and penetrating liquids; with which it is determined that probes T-3 and T-4 are free of discontinuities; Hardness tests are carried out in which the average result of the hardness test is MB: 25, ZAC:29.83, DS: 30.5, on the Rockwell scale. The hardness test shows a softening zone at the transition of the base metal with the beginning of the HAZ with a greater loss of hardness as the input heat increases, however the HAZ presents an increase in hardness as it is decreased. the input heat. The face and root bending test was carried out, in which specimen T-3 and T-4 gave good results to the test, determining that they have good ductility.

Keywords: AHSS Martensitic Steel, current intensity, TIG Process, hardness.

## SIMBOLOGÍA

AHSS : Aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High strength Steels).

TIG : Tungsten inert gas

PAW : Soldadura de arco por plasma (Plasma Arc Welding)

ZAC : Zona afectada por el calor.

DP : Doble fase (Dual Phase)

MPa : Megapascales

HSS : Aceros de alta velocidad (High Speed Steel)

TRIP : Aceros de Transformación Inducida por Plasticidad (Transformation Induced Plasticity).

CP : Aceros de Fase Compleja (Complex Phase).

MS : Aceros Martensíticos (Martensitic Steel).

TWIP : Aceros de Transformación Inducida por Maclaje (aceros TWIP)

M : Aceros martensíticos

FB : Aceros ferríticos-martensíticos.

TWIN : Aceros plasticidad inducida por maclaje

Ms : Comienzo de martensita

Mf : Final de transformación de la martensita.

GTAW : Soldadura por arco de tungsteno con gas (soldadura TIG)

GMAW : Soldadura a gas y arco metálico (Gas Metal Arc Welding)

DCEN : corriente directa conectada el electrodo al polo negativo

DCEP, corriente directa conectada el electrodo al polo positivo

CA : Corriente alterna

CC : Corriente continua

ZF = Zona de fusión.

ZAC = Zona afectada por el calor. MB = Metal base.

H= Energía de soldeo, en J/mm V = voltios.

A = Amperios

v = velocidad de soldeo. Tmax = Temperatura máxima

To = Temperatura inicial de la chapa.

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

C = Calor específico del metal sólido.

Hnet = energía neta aportada.

t= Espesor de la chapa a soldar.

$\rho$  = Densidad del material (g/mm<sup>3</sup>)  $\rho C$  = 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.

h = altura

HRC : Dureza Rockwell C.

## CAPITULO I

### METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

#### 1.1. Planteamiento del Problema

Durante la evolución de la industria del acero, han aparecido diferentes calidades de acero y cada vez con mejores propiedades mecánicas los cuales han tenido diversos usos en las diferentes industrias, como en la industria de la construcción, minera, automotriz, agricultura, siderúrgica, etc.

En el mundo y con el compromiso de los países se ha estado apostando por medidas más respetuosas con el medio ambiente, apoyando y realizando esfuerzos económicos tanto a nivel de investigación para que se consigan avances tecnológicos más respetuosos con el entorno.

La industria automotriz que es un sector altamente contaminante, no ha estado ajeno a la búsqueda del cuidado del entorno y en ese sentido siempre ha estado a la búsqueda de nuevos materiales más ligeros como es el caso del acero para la fabricación de los vehículos.

La actual industria automotriz está orientada al desarrollo de vehículos con mayores niveles de seguridad, reducción de peso, con menores consumos de combustible lo que constituye una reducción de niveles de CO<sub>2</sub> y de esta manera hacerlos rentables. La forma más rentable de hacerlo es utilizando el acero avanzado de alta resistencia.

Actualmente en la industria automotriz se ha desarrollado el acero llamados aceros avanzados de alta resistencia AHSS (Advanced High strength Steels) llamados también aceros bifásicos, estos aceros ofrecen combinaciones de ductilidad y resistencia que introducen mejoras en los productos, permitiendo la construcción de vehículos más seguros, de menor peso y con un

uso más eficiente del combustible, así como otras aplicaciones, contribuyendo de esta forma a la disminución de uso de combustible y una menor contaminación al entorno. Al ser un acero relativamente nuevo con estructuras complejas, presentan un gran reto para las tecnologías de soldadura actuales por lo que se requiere un mayor conocimiento de cómo estos materiales pueden ser soldados conservando las propiedades originales y así poder cumplir el desempeño de las uniones soldadas. De otro lado la creciente utilización de los aceros avanzados de alta resistencia –AHSS (Advanced High strength Steels) en la industria automotriz requiere de recursos humanos capacitados adecuadamente para atender la recuperación y mantenimiento de las partes del vehículo por soldadura.

## **1.2. Problema General y Específicos**

### ***1.2.1. Problema General***

¿Qué efecto podrá ejercer la variable intensidad de corriente en la en la soldabilidad del acero avanzado de alta resistencia del tipo martensítico POR EL PROCESO TIG?

### ***1.2.2. Problema Especifico***

- ¿Qué efecto podrá ejercer la intensidad de corriente en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia - AHSS (advanced high strength steels) del tipo martensítico por el proceso TIG?
- ¿Qué efecto podrá ejercer la intensidad de corriente en la dureza del depósito de soldadura y la ZAC en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia - AHSS (advanced high strength steels) del tipo martensítico por el proceso TIG?

- ¿Qué efecto podrá ejercer la velocidad de soldeo en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia - AHSS (advanced high strength steels) del tipo martensítico por el proceso TIG?

### **1.3. Justificación e Importancia**

#### ***1.3.1. Justificación Tecnológica***

Dado que los aceros avanzados de alta resistencia del tipo martensítico no tienen mucha vigencia en el mercado automotriz por lo que se conoce muy poco, con el presente trabajo se dará a conocer la técnica de la soldadura de este tipo de acero.

#### ***1.3.2. justificación Social***

El conocimiento y el desarrollo de los procedimientos y métodos de soldabilidad de este acero avanzado de alta resistencia del tipo martensítico, Nos permitirá preparar cuadros de recursos humanos para atender esta necesidad, dado que a la fecha se ignora este tipo de acero. Y nos permitirá formar técnicos con conocimientos lo que facilita su labor de soldador para la construcción de soldaduras libres de imperfecciones.

#### ***1.3.3. justificación Económica***

Favorece al desarrollo económico de todas las personas involucradas en la recuperación por soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia. Ya que realizando uniones de buena calidad por el proceso TIG, se obtendrá la prolongación de la vida útil del conjunto soldado lo cual se traduce un ahorro económico.

#### ***1.3.4. justificación Ambiental***

Con la tecnología que se propone desarrollar, permitirá la reducción de desechos metálicos, lo cual contribuirá en la reducción de la contaminación del medio ambiente.

## **1.4. Objetivo General Y Específico**

### ***1.4.1. Objetivo General***

Evaluar EL efecto que produce la intensidad de corriente en la soldabilidad por el proceso TIG de los Aceros Avanzados Alta Resistencia del tipo martensíticos y su efecto en la dureza del depósito y la ZAC.

### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Determinar el efecto que produce la intensidad de corriente en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia – AHSS del tipo martensítico.
- Evaluar el efecto que produce la intensidad de corriente en la dureza del depósito de soldadura y la ZAC, en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia – AHSS del tipo martensítico por el proceso TIG.
- Evaluar el efecto que produce la velocidad de soldeo en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia – AHSS del tipo martensítico.

## **1.5. Hipótesis General y Específicas**

### ***1.5.1. Hipótesis General***

La intensidad de corriente tiene efecto en la soldabilidad de Los Aceros Avanzados Alta Resistencia AHSS del tipo martensítico por el proceso TIG, por ende, debido a sus altas propiedades mecánicas y composición microestructural compleja, son sensibles a los cambios de sus propiedades mecánicas y microestructurales cuando se llegan a soldar por el proceso TIG.

### 1.5.2. Hipótesis Específicos

- La intensidad de corriente no influye en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia - AHSS (advanced high strength steels) del tipo martensítico por el proceso TIG.
- El tipo de corriente en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia - AHSS (advanced high strength steels) del tipo martensítico por el proceso TIG influye en la calidad de la unión soldada.
- La velocidad de soldeo influye en el depósito de soldadura en la soldadura de los aceros avanzados de alta resistencia - AHSS (advanced high strength steels) del tipo martensítico por el proceso TIG.

**Tabla 1**

*Variables independientes.*

Variables independientes	Indicadores
Intensidad de corriente	Aporte de calor.
Velocidad de soldeo	Penetración
Tipo de corriente	Profundidad de soldadura.

**Tabla 2**

*Variables dependientes.*

Variables dependientes	Indicadores
Dureza	HRC
Microestructura	Tipo de microestructura

**Tabla 3**

*Interviniente o externa.*

Variable interviniente o externa	Indicadores
Temperatura ambiental	Grados celsius
Humedad ambiental	Contenido de agua.

## **1.6. Nivel o Tipo De Investigación**

### ***1.6.1. Explorativa***

Se investigará todos y cada uno de los detalles de la investigación que afectan de manera directa a la variable dependiente. Para esto se analizará cada uno de los parámetros de soldeo, generando hipótesis y reconociendo las variables de interés investigativo.

### ***1.6.2. Descriptiva***

Describe los pasos realizados en la variación de los distintos valores de las variables para tener así un respaldo documentado y determinar la influencia de estos en las propiedades mecánicas y microestructura de la junta soldada, además, se comparará entre varios factores, situaciones o formas. Se debe clasificar los modelos de comportamiento en base a criterios que nos permita verificar la hipótesis.

### ***1.6.3. Correlacional***

Este tipo de investigación tiene como finalidad determinar el grado de relación o asociación no causal existente entre dos o más variables con el objetivo de detectar si existe una influencia entre una y otro.

### ***1.6.4. Explicativa***

Se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto que permite hacer generalizaciones a realidades similares, el cual es un estudio muy útil para poder encontrar las causas del mismo.

## **1.7. Población y Muestra**

### **1.7.1. Población**

Aceros avanzados de alta resistencia.

### **1.7.2. Muestra**

Cinco (06) probetas de aceros avanzados de alta resistencia del tipo martensítico de doble fase (MS).

## **1.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

### **1.8.1. Técnicas**

Para el presente estudio se usará la técnica de la “observación”, dado que las probetas serán objeto de ensayos no destructivos el cual no destruye la pieza o estructura. Esta información será sistematizada, analizada, procesada e interpretada para la obtención pertinente de las conclusiones inherentes al tema.

### **1.8.2. Instrumentos**

Durante el desarrollo del trabajo se usarán los siguientes instrumentos: Máquina de soldar, durómetro y e equipo de ensayo de dobléz.

## **1.9. Viabilidad**

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

## CAPITULO II

### FUNDAMENTO TEORICO

#### 2.1. Antecedentes

##### 2.1.1. *Antecedentes Nacionales*

- a) Joaquin M. Piccini, (2008) en su trabajo de investigación presentado en el 11° Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales, realizado en Argentina, mencionan que los aceros Dual Phase (DP) ofrecen una atractiva combinación de conformabilidad y alta resistencia, que permiten reducir espesores, siendo ampliamente utilizados en la industria automotriz. Consisten en una matriz ferrítica conteniendo una segunda fase martensítica de alta dureza. Las propiedades mecánicas de estos aceros están íntimamente relacionadas con la fracción de martensita que poseen. En diversas aplicaciones los aceros Dual Phase deben ser soldados, por lo que el estudio de su soldabilidad es un tópico de gran interés tecnológico. El proceso de soldadura Plasma Arc Welding (PAW) es un proceso de alta densidad de energía y relativamente bajo costo, ideal para la soldadura de chapa fina. Las uniones soldadas de estos aceros presentan una eficiencia de junta entre 0,60 y 0,90 en cuanto a la resistencia a la tracción, debido al revenido de la martensita en la zona afectada por el calor (ZAC). Son escasos los estudios sistemáticos sobre la influencia del procedimiento de soldadura en la evolución microestructural y las propiedades mecánicas de aceros DP. El objetivo del presente trabajo fue analizar la influencia del procedimiento de soldadura PAW sobre la evolución microestructural y las propiedades mecánicas de uniones soldadas de un acero DP. A este fin, se soldaron probetas de chapa de acero

DP700 variando el aporte térmico. Se caracterizó la macro y microestructura y se determinaron perfiles de microdureza Vickers, se realizaron ensayos de tracción y de embutido Olsen. Se obtuvieron eficiencias de tracción de la junta entre 0,72 y 0,79 y de embutido entre 0,70 y 0,95. A medida que aumenta el aporte térmico, varía el tamaño de la zona subcrítica, sin embargo las propiedades mecánicas no se ven sensiblemente afectadas.

### **2.1.2. Antecedentes Internacionales**

- a) Lopez Cortes, (2009) en su trabajo de investigación realizado en la ciudad de México en el año 2009, plantea como objetivo, determinar las variables que afectan la soldabilidad de los Aceros Avanzados Alta Resistencia AHSS tipo martensíticos y establecer la interacción que existe entre éstas y el desempeño de la unión, así como la variación de sus propiedades mecánicas y microestructurales, durante la manufactura de componentes automotrices mediante el proceso de soldadura de puntos por resistencia (RSW). Para la realización del proyecto de investigación se utilizó un acero especificación GMW 3399M-ST-S CR 900T/700Y MS tipo martensítico de 900 MPa mínimo, de esfuerzo de tensión y 700 Mpa de esfuerzo de cedencia mínimo con un espesor de 1.5 mm, las principales variables de proceso a ser consideradas en la experimentación fueron: Presión (libras, kilogramos, bar.), corriente (amperes) y tiempo (milisegundos, ciclos), las probetas fueron soldadas por el proceso de soldadura de resistencia por puntos, a las probetas se realizaron las pruebas de soldabilidad de: a) Desprendimiento (Tear Down), b) Tensión a esfuerzo cortante (Shear tensión Test), c) Microdureza y d) Metalografía, para el procesamiento de los resultados se utilizó el diseño de 32. Las conclusiones alcanzadas determinaron que, el diámetro y la profundidad del punto de

soldadura tienen un comportamiento directamente proporcional al aumento del calor de entrada, Corriente (Amp) y el Tiempo (Ciclos).

- b) Pérez Medina, (2009), en su trabajo de investigación realizado en la ciudad de Mexico, en el año 2009, plantea como objetivo realizar, el estudio del efecto de los parámetros de procesos de soldadura GMAW y Láser CO<sub>2</sub> en la microestructura y propiedades mecánicas de los Aceros AHSS: Doble Fase (DP) y de Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP). a trata sobre la metalurgia del metal base, integrando una recopilación sobre los proceso de soldadura para llevar acabo la unión de los Aceros avanzados de Alta Resistencia tipo Doble Fase (DP) y de Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP), Este trabajo incluye una comparación con los parámetros utilizados en las soldaduras de los aceros suaves para su posible aplicación en la industria automotriz. Para el desarrollo de esta tesis se describen los resultados obtenidos en la experimentación de las soldaduras de estos aceros unidos por los procesos de soldadura por arco con gas de protección (GMAW) y Láser CO<sub>2</sub>. Para la experimentación se utilizaron 18 muestras de 244 x 70 x 1.2mm para los aceros DP600 y 18 muestras de 244 x 70 x 1.6mm para los aceros TRIP800, ambos fueron soldados por el proceso GMAW y Láser CO<sub>2</sub>, para un total de 18 soldaduras. Con los parametros seleccionados se soldaron con el proceso GMAW, a las probetas soldadas se realizaron las pruebas mecánicas y análisis microestructural, los resultados se procesaron con el diseño factorial de 2k. Con la investigación realizada se llego a la conclusión, que al usar el proceso láser CO<sub>2</sub> la microestructura resultante en los aceros TRIP fue principalmente martensita en la zona de fusión y una mezcla de ferrita, bainita y algo de martensita, en la ZAC. En los aceros Doble fase la zona de fusión presentó ferrita alotromórfica con algunas áreas de bainita, mientras que en la ZAC la bainita inferior y superior estuvo presente al igual que algunas áreas de martensita y ferrita idiomórfica, el proceso

GMAW promueve la formación de fases como bainita y ferrita tanto en la ZAC como en la zona de fusión, además de proveer zonas afectadas por el calor con una menor dureza comparada con las ZAC del proceso láser CO<sub>2</sub>.

## **2.2. Aceros Avanzados de alta Resistencia**

Los aceros avanzados de alta resistencia (aceros AHSS) son aceros con una resistencia máxima de al menos 500 MPa. Son aceros multifásicos que pueden contener ferrita, martensita, bainita y/o austenita retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas excepcionales (dadas por un endurecimiento por transformación).

### **2.2.1. Descripción General**

La principal diferencia entre los aceros convencionales (HSS) y los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) se debe a su ruta de producción y control microestructural.

Los HSS son aceros que cuentan con una única fase, la ferrita. En cambio, los AHSS son aceros que tienen una estructura formada de diferentes fases, son aceros multifásicos, según el tipo de AHSS del que se trate. Pueden contener ferrita, martensita, bainita y austenita retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas únicas. Estos aceros se caracterizan por presentar esfuerzo de cedencia mayor a 550MPa y 700 MPa en esfuerzo de ruptura o esfuerzo último. Algunos tipos de AHSS tienen una alta capacidad de endurecimiento por deformación o trabajo en frío. Esta alta capacidad de endurecimiento por deformación permite aumentar la resistencia mecánica del acero sin reducir su conformabilidad, e incluso aumentarla, lo que resulta en un balance resistencia-ductilidad superior a los aceros convencionales. Otros tipos tienen ultra alto esfuerzo de cedencia y resistencia a la tensión, y presentan un comportamiento de endurecimiento en caliente.

La buena combinación de resistencia y conformabilidad de los aceros AHSS se consigue gracias a la combinación controlada de fases estables y meta estables en una microestructura fina, la cual se ve significativamente modificada en el proceso de conformado.

Estos materiales son relativamente blandos y aumentan su resistencia al ser deformados, siendo, por lo tanto, fácilmente conformables y extremadamente resistentes una vez que han sido deformados. Además, gracias a su capacidad de ganar resistencia con la deformación, pueden ser embutidos con menor riesgo de rotura, pues las zonas más deformadas y con más tendencia a rasgarse, son las que más resistencia desarrollan (Shaw, Engl, Espina, Oren, & Kawamoto, 2002)

### ***2.2.2. Clasificación de Los Aceros AHSS***

Estos aceros se clasifican en:

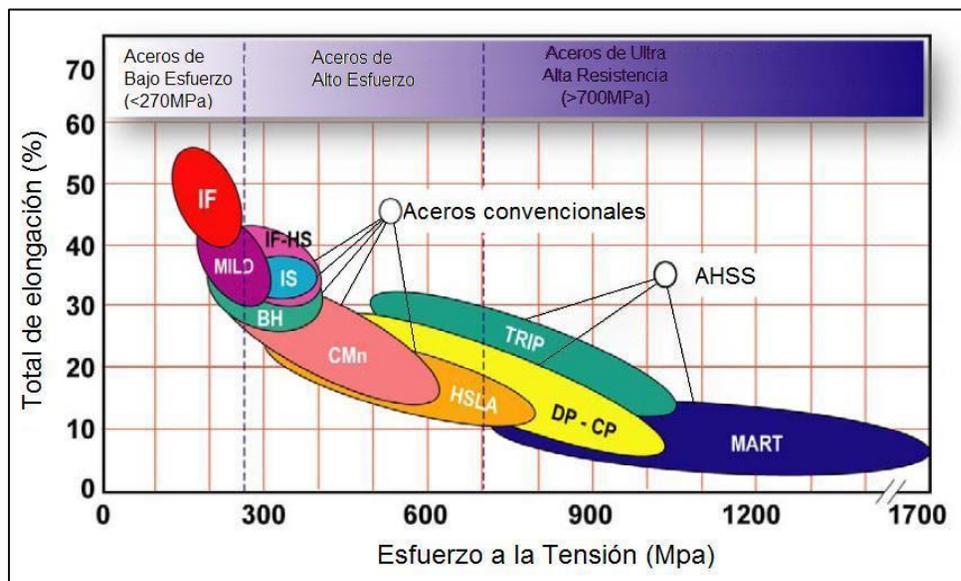
- Aceros de Fase Dual (Dual Phase, DP)
- Aceros de Transformación Inducida por Plasticidad (Transformation-Induced Plasticity, TRIP)
- Aceros de Fase Compleja (Complex Phase, CP)
- Aceros Martensíticos (Martensitic, MS)
- Aceros de Transformación Inducida por Maclaje (aceros TWIP)

Los AHSS se suelen denominar por sus siglas seguidas de su valor de resistencia a rotura (DP600, TRIP800, CP800, etc.).

En la figura 1, se clasifican estos aceros de alta resistencia en función de su conformabilidad en términos de alargamiento a rotura, de resistencia mecánica, y de resistencia a rotura.

**Figura 1**

*Clasificación de aceros AHSS en función de su conformabilidad.*



Fuente: (Dinda & Díaz, 1995)

### 2.2.3. Sistema de Designación para los Aceros AHSS

Los métodos utilizados para su identificación varían de forma considerable en todo el mundo, por esto la industria siderurgia de forma global recomendó un sistema de clasificación que define cada grado por su tipo metalúrgico, esfuerzo de cedencia, y resistencia a la tensión. Bajo esta nomenclatura, los aceros son identificados como: (Shaw, Engl, Espina, Oren, & Kawamoto, 2002)

“XX/ aaa/ bb”

Donde:

XX = Tipo de acero

aaa = Límite elástico (esfuerzo de cedencia mínimo) en MPa

bb = Límite de rotura (esfuerzo de tensión) en Mpa (

En la Tabla 4 se indica algunos tipos de acero de acuerdo a la nomenclatura indicada.

**Tabla 4**

*Ejemplos de grados de aceros y sus propiedades en base a ULSAB-AVC. YS y UTS son valores mínimos. Tot. EL (elongación total) es un valor típico para un gran rango de espesores y longitudes calibradas.*

Grado de Acero	Esfuerzo Cedencia (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Total de Elongación (%)
HSLA 350/450	350	450	23-27
DP 300/500	300	500	30-34
DP 350/600	350	600	24-30
TRIP 450/800	450	800	26-32
DP 500/800	500	800	14-20
CP 700/800	700	800	10-15
DP 700/1000	700	1000	12-17
Mart 1250/1520	1250	1520	4-6

Fuente: (Shaw, Engl, Espina, Oren, & Kawamoto, 2002)

#### **2.2.4. Propiedades Mecánicas de los Aceros AHSS**

La Tabla 5 muestra las propiedades mecánicas típicas que ilustran el amplio rango de grados de los AHSS.

**Tabla 5**

*Propiedades mecánicas típicas de los principales grados de acero AHSS.*

<b>GRADO DE ACERO</b>	<b>Resistencia a la fluencia (MPa)</b>	<b>Resistencia Máxima (MPa)</b>	<b>(%)De elongación</b>	<b>Coficiente n</b>
<i>BH 210/340</i>	<i>210</i>	<i>340</i>	<i>34-39</i>	<i>0.18</i>
<i>BH 260/370</i>	<i>260</i>	<i>370</i>	<i>29-34</i>	<i>0.13</i>
<i>DP 280/600</i>	<i>280</i>	<i>600</i>	<i>30-34</i>	<i>0.21</i>
<i>DP 300/500</i>	<i>300</i>	<i>500</i>	<i>30-34</i>	<i>0.16</i>
<i>HSLA 350/450</i>	<i>350</i>	<i>450</i>	<i>23-27</i>	<i>0.14</i>
<i>DP 350/600</i>	<i>350</i>	<i>600</i>	<i>24-30</i>	<i>0.14</i>
<i>DP 400/700</i>	<i>400</i>	<i>700</i>	<i>19-25</i>	<i>0.14</i>
<i>TRIP 450/800</i>	<i>450</i>	<i>800</i>	<i>26-32</i>	<i>0.24</i>
<i>DP 500/800</i>	<i>500</i>	<i>800</i>	<i>14-20</i>	<i>0.14</i>
<i>CP 700/800</i>	<i>700</i>	<i>800</i>	<i>10-15</i>	<i>0.13</i>
<i>DP 700/1000</i>	<i>700</i>	<i>1000</i>	<i>12-17</i>	<i>0.09</i>
<i>Mart 950/1200</i>	<i>950</i>	<i>1200</i>	<i>5-7</i>	<i>0.07</i>
<i>Mart 1250/1520</i>	<i>1250</i>	<i>1520</i>	<i>4-6</i>	<i>0.065</i>
<i>X-IP™</i>	<i>599</i>	<i>1162</i>	<i>52.8</i>	<i>0.36</i>

Fuente: (Shaw, Engl, Espina, Oren, & Kawamoto, 2002)

### **2.2.5. Aplicaciones de los Aceros AHSS**

Los aceros avanzados de alta resistencia crean nuevas oportunidades para el diseño y la fabricación de componentes críticos, logrando que puedan soportar altas cargas y, a la vez, puedan ser producidos de una forma más simple y barata. Cambiar a aceros de alta resistencia puede

generar grandes ahorros en costes de producción, ofreciendo al diseñador la libertad de hacer componentes de un modo más sencillo y con menos refuerzos.

El uso de aceros de AHSS es muy diverso y se concentra en aplicaciones basadas en requerimientos funcionales como componentes estructurales que deben poseer la capacidad de absorber elevadas energías de impacto. También se incluyen aplicaciones externas en las que la apariencia se establece como parámetro característico.

A continuación, se expone una clasificación de las diferentes aplicaciones de los aceros de última generación en los vehículos (Hall, 1991).

- **Paneles interiores**

La clave en la intensificación de esfuerzos por una sustitución de paneles interiores en aceros AHSS radica en las mejoras que ofrece en cuanto a reducción de peso y mantenimiento de la seguridad integral

- **Paneles externos**

Puertas, cofres, maleteros son elementos que pueden fabricarse con estos aceros según el proyecto ULSAB\_ULSAC (Díaz del Castillo R., 2009)

- **Carrocería**

Debido a la elevada resistencia que presentan estos aceros son empleados en componentes de la carrocería como barras de seguridad, bastidores y en general en cualquier componente que forme parte de la carrocería del vehículo. Por ejemplo, el ahorro de peso estimado en un bastidor si se utilizan aceros AHSS respecto a si se hace de acero convencional es de 13%. En general, en la

carrocería es donde se espera que estos aceros experimenten un crecimiento mayor en comparación con el aluminio, como la carrocería que se muestra en la figura 2, (Dinda & Díaz, 1995)

## Figura 2

*Carrocería para automóvil fabricada con diferentes grados de acero AHSS.*



Fuente: (Dinda & Díaz, 1995)

### 2.2.6. Clasificación De Los Aceros AHSS

#### 2.2.6.1. Aceros doble fase (DP).

##### a) Obtención de los aceros DP

Los aceros de doble fase consisten en una matriz de ferrita con una segunda fase de martensita dura en forma de islas, al aumentar el volumen de la fracción de la segunda fase dura, generalmente incrementa la resistencia del material.

Los aceros doble fase (ferrita + martensita) son producidos mediante enfriamientos controlados desde la fase austenítica (en productos rodados en caliente) o desde una fase de austenita más ferrita (para recocido continuo, rodado en frío y productos recubiertos en caliente por inmersión) para transformar parte de la austenita en ferrita, luego se realiza un enfriamiento

rápido para transformar la austenita restante a martensita. Dependiendo de la composición y del proceso de obtención, los aceros laminados en caliente requieren tener la capacidad de resistir un estirado en los bordes, entonces puede que la microestructura contenga cantidades significantes de bainita. En la figura 3 se observa el esquema de la obtención de aceros DP por enfriamiento controlado. (Hall, 1991)

### Figura 3

*Esquema de obtención de aceros DP por enfriamiento controlado [22].*



Fuente: (Dinda & Díaz, 1995)

Los aceros DP también pueden ser fabricados mediante un procesamiento termo mecánico que consiste en austenitizar completamente el acero y laminarlo en caliente en la región austenítica, seguido de enfriamiento al aire en la región bifásica ( $\alpha+\delta$ ), para finalmente templear en agua.

La temperatura de temple seleccionada influye en el nivel de resistencia alcanzado por el producto final. A temperaturas más elevadas, mayor la cantidad de austenita que durante el temple transforma en martensita. Se añaden al acero Mn, Cr y Mo para incrementar la templabilidad del material. Así el proceso de enfriamiento y la templabilidad determinan la fracción volumétrica de las lagunas de austenita que transforman a martensita.

## b) Microestructura de aceros DP

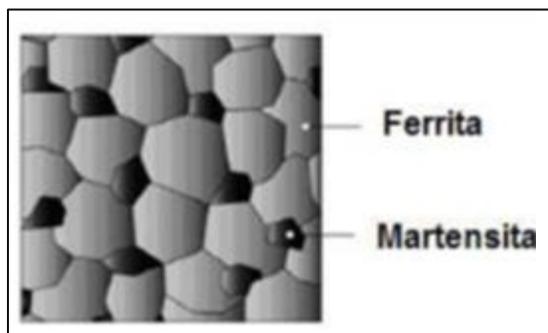
La microestructura de los aceros de doble fase consiste esencialmente en una matriz ferrítica con cantidades variables de martensita, de acuerdo al grado. Estos aceros son producidos de manera general a partir de aceros hipoeutectoides (según el diagrama de fases fierro-carbono tienen un contenido de carbono inferior al correspondiente a la composición eutectoide 0.77%, están formados por una mezcla de ferrita y perlita), mediante un tratamiento térmico que consiste en un recocido o austenitización parcial a temperaturas ubicadas en la región intercrítica (entre A3 y A1) del diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C, que descompone la estructura ferrítico-perlítica inicial en una microestructura ferrítico( $\alpha$ )-austenítica( $\gamma$ ), al transformar la perlita(ferrita+Fe<sub>3</sub>C) en austenita, y seguido por un temple promueve la transformación de austenita a martensita, generando un material de estructura bifásica con contenidos variables de ferrita y martensita. Ver figura 4 (Hall, 1991)

La figura 4 muestra un esquema de la microestructura de los aceros de doble fase, la cual contiene ferrita más islas de martensita. Donde la fase suave de ferrita es una fase continua, da a estos aceros excelente ductilidad. Cuando estos aceros se deforman, el esfuerzo se concentra en la baja resistencia de la ferrita alrededor de las islas de martensita, creando un único endurecimiento por deformación, al igual que otros tipos de aceros avanzados de alta resistencia, los aceros doble fase también pueden sufrir endurecimiento por calentamiento.

En los aceros de doble fase, el carbono permite la formación de martensita en rangos de enfriamiento que incrementan la dureza del acero. El manganeso, cromo, molibdeno, vanadio y níquel adheridos individualmente o en combinación, dan una mayor resistencia y soldabilidad.

**Figura 4**

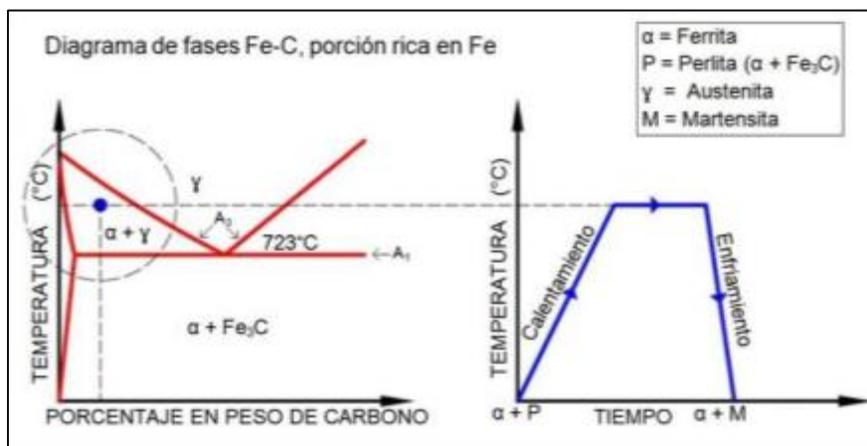
*Esquema de la microestructura de los aceros DP.*



Fuente: (Semantic Scholar, 2022)

**Figura 5**

*Representación esquemática de un ciclo de tratamiento térmico para producir un acero DP.*



Fuente: (Semantic Scholar, 2022)

### c) Composición Química de Aceros Doble Fase 600 Y Propiedades Mecánicas

La composición química nominal de los aceros doble fase 600 se muestra en la tabla 2, esta puede tener variaciones de acuerdo al tipo de proceso mediante el cual se obtuvieron las fases, como se mencionó anteriormente Mn, Cr, Mo, V y Ni se añaden al acero para incrementar la templeabilidad del material. Así, el proceso de enfriamiento y la templeabilidad determinan la fracción volumétrica de las lagunas de austenita que transforman a martensita.

El carbono consolida la martensita como soluto endurecedor en la ferrita, al igual que el silicio y el fósforo, pero manteniendo también la buena resistencia y su capacidad de conformado. (Hall, 1991).

**Tabla 6**

*Composición química de aceros doble fase 600*

	C	Mn	Si	P	S	N	Al	Ti	Nb	V	B	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn
%	.115	1.55	.186	.026	.005	.0032	.035	.002	.003	.002	.0003	.012	.347	.026	.110	.003

Fuente: (Semantic Scholar, 2022)

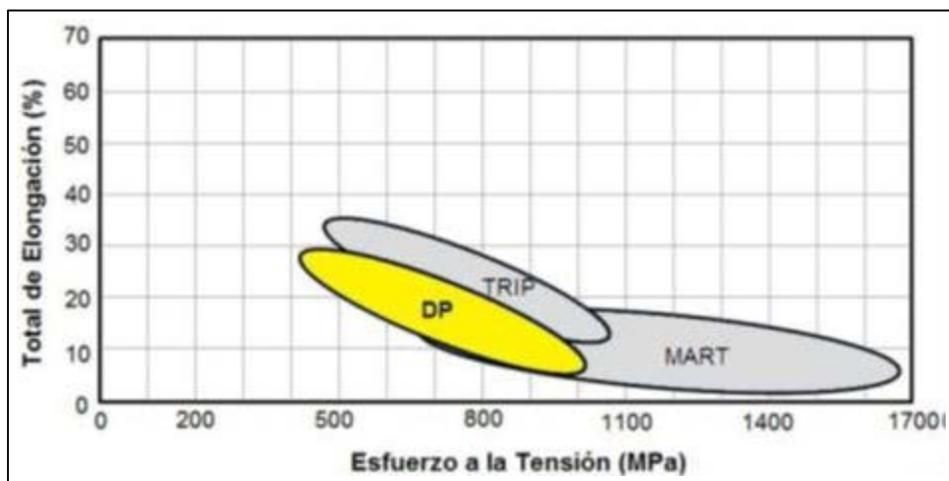
La resistencia de los aceros depende principalmente de la cantidad y dureza de la martensita en la estructura, la cual puede variar de 10 a 40% en peso, dentro de la matriz de ferrita. La dureza de la martensita está directamente relacionada con su contenido de carbono, la dureza de la martensita aumenta a medida que el contenido de carbono aumenta.

Otra característica relevante del comportamiento mecánico de los aceros DP es que no exhiben el fenómeno de punto de cedencia o cedencia discontinua que causa la aparición de bandas de Lüders, lo que evita problemas de apariencia superficial.

Las altas tasas de endurecimiento en el trabajo, además de una excelente elongación, dan a los aceros doble fase fuerzas máximas de tensión más altas que las de los aceros convencionales con fuerzas de rendimiento parecidas. Al ser comparadas con aceros de alta resistencia con aleaciones menores y con una fuerza de rendimiento similar, los aceros doble fase muestran tasas iniciales más altas de endurecimiento en el trabajo, fuerza máxima de tensión y una menor tasa de fuerza de rendimiento a la fuerza máxima a la tensión. Ver figura 6 y 7.

### Figura 6

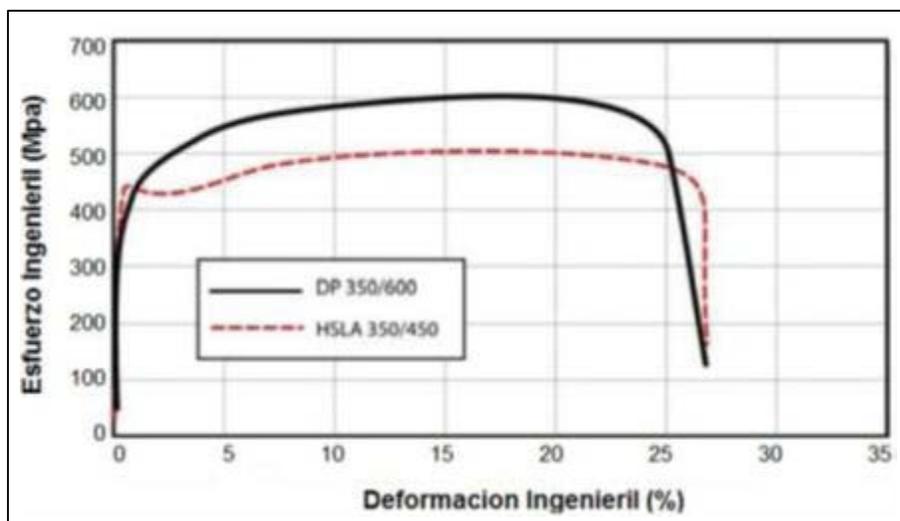
El esquema muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros doble fase y su porcentaje de elongación.



Fuente: (Semantic Scholar, 2022)

### Figura 7

Comparación de la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  de un DP con un HSLA con el límite elástico similar (350Mpa). El acero DP presenta un trabajo de endurecimiento inicial más elevado, una tensión máxima más elevada y un radio YS/TS más pequeño que el HSLA.



Fuente: (Semantic Scholar, 2022)

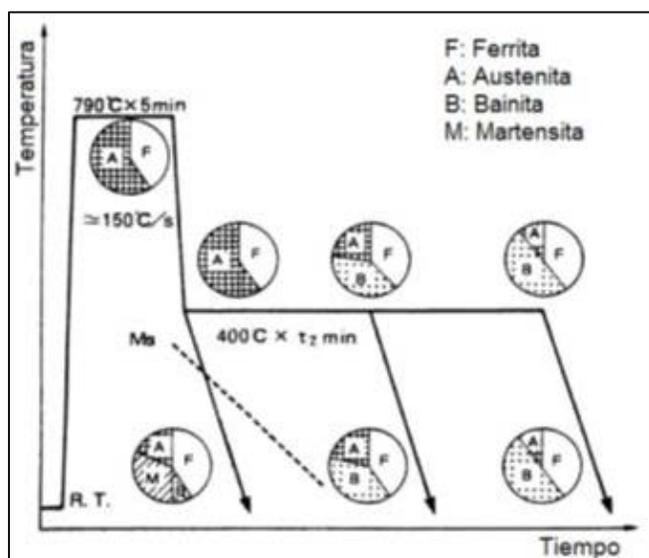
### 2.2.6.2. Aceros TRIP.

#### a) Obtención de los aceros TRIP

El ciclo térmico aplicado para fabricarlos es similar al del usado en los aceros DP. La lámina es calentada rápidamente en la región intercrítica (ver figura 8) para formar una mezcla de austenita y ferrita. La mayor diferencia es la introducción de un mantenimiento isotérmico en la región bainítica, (o un enfriamiento lento) para generar bainita y retener austenita en la estructura final. Esto se logra al deprimir la temperatura  $M_s$  abajo del cero al enriquecer en carbono la austenita no transformada. El enriquecimiento en carbono mediante solamente la formación de ferrita es insuficiente. Por lo tanto, un mayor enriquecimiento en carbono se alcanza mediante la formación de bainita. Si y Al se añaden no solo para incrementar el endurecimiento por solución sólida sino principalmente para prevenir la precipitación de carburos durante la formación de bainita. De esta manera el carbono rechazado desde la ferrita enriquece la austenita, la cual queda retenida en la microestructura final. (Oliver, Jones y Fourlaris, 2006)

#### Figura 8

*Esquema que muestra la obtención de los aceros TRIP [22].*



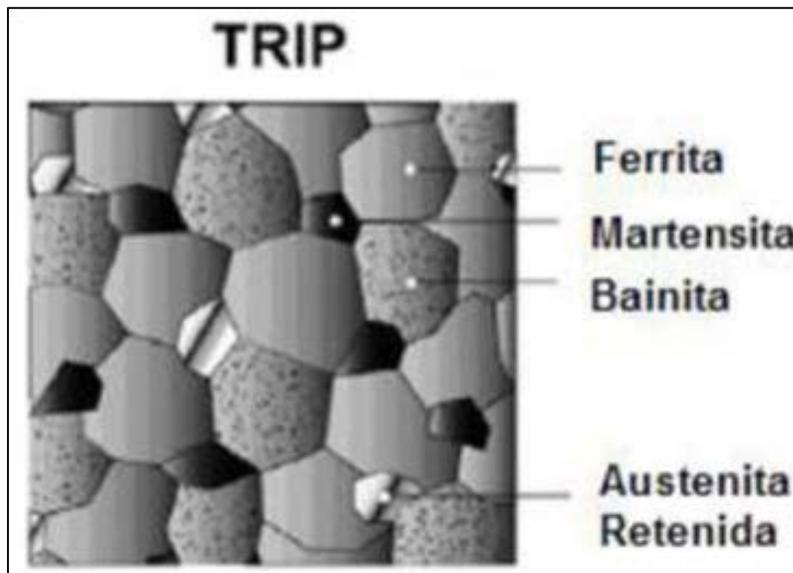
Fuente: (Semantic Scholar, 2022)

### b) Microestructura de aceros TRIP

Su microestructura (figura 9), consiste principalmente de tres fases: ferrita, bainita y austenita retenida, aunque también es común la presencia de martensita. Cuando la energía de activación necesaria es inducida durante la deformación, la austenita retenida se transforma a martensita mejorando significativamente el endurecimiento por trabajado del material. (Oliver, Jones y Fourlaris, 2006)

#### Figura 9

*Microestructura típica de un acero TRIP [10].*



Fuente: (Oliver, Jones, & Forlaris, 2006).

### c) Composición química de un acero TRIP y propiedades mecánicas

El silicio se usa como elemento desoxidante junto con el manganeso con el objetivo de evitar que aparezcan en el acero poros y defectos internos, mejora la resistencia a la oxidación, aumenta la templabilidad en los aceros y aumenta la resistencia de los aceros de baja aleación. Además, eleva el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la fatiga de los aceros sin reducir su tenacidad.

El manganeso se añade para neutralizar la influencia del azufre y del oxígeno, que siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante el proceso de fabricación.

El manganeso actúa también como desoxidante y evita, en parte que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a la formación de porosidades perjudiciales en el material. Aumenta la templabilidad del acero siendo su empleo muy económico.

El aluminio es un elemento desoxidante. Es el elemento más eficaz para controlar el crecimiento de grano antes del enfriamiento. El titanio, circonio y el vanadio son también efectivos inhibidores del crecimiento de grano sin embargo para grados estructurales que son tratados térmicamente (enfriamiento y templado) estos elementos pueden tener efectos adversos en la dureza porque sus carburos son muy estables y difíciles de disolver en la austenita antes del enfriamiento.

La composición química nominal de un acero TRIP800 se muestra en la tabla 7. Los aceros TRIP usualmente contienen mayor cantidad de carbono que los DP, con el fin de tener suficiente contenido de carbono para estabilizar la austenita retenida a temperatura ambiente.

Los elevados contenidos de silicio y/o aluminio, sirven para acelerar la formación de ferrita/ bainita. Estos elementos ayudan en el mantenimiento del carbono suficiente para mantener la austenita retenida, a fin de promover su microestructura multifase. Como se mencionó anteriormente el Si y Al se añaden no solo para incrementar el endurecimiento por solución sólida sino principalmente para prevenir la precipitación de carburos durante la formación bainítica. (Oliver, Jones, & Forlaris, 2006)

**Tabla 7**

*Composición química de aceros TRIP 800 [26].*

	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr.	Mo	V	Ti	Sn	Al	Cu	B
%	0.232	1.653	1.55	0.004	0.010	0.036	0.033	0.018	0.006	0.004	0.006	0.041	0.033	0.002

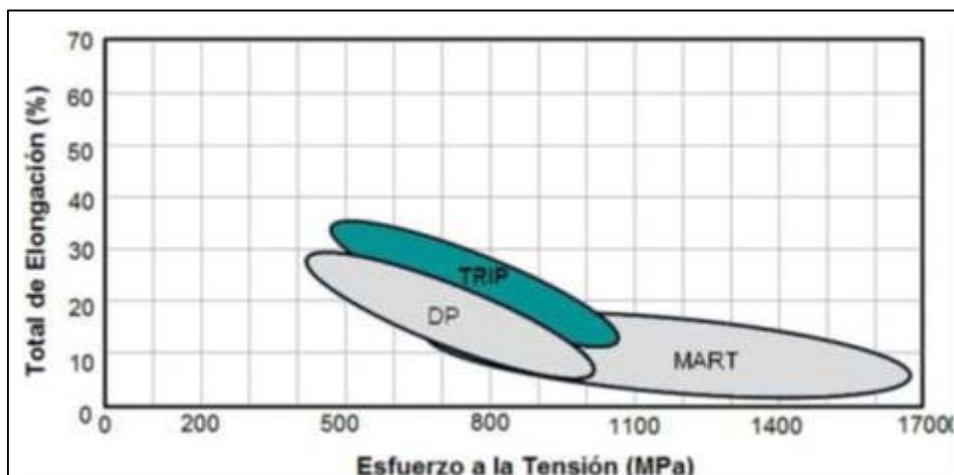
Mediante el ajuste de contenido en carbono se consigue el nivel de deformación a partir del cual la austenita retenida empieza a transformar en martensita. A bajos contenidos en carbono, la austenita retenida comienza la transformación casi cuando empieza la deformación del material, incrementando el endurecimiento y la formabilidad durante el proceso de estampación.

A elevados contenidos de carbono, la austenita retenida es más estable y transforma a niveles de deformación más allá de los producidos durante el conformado. A estos niveles la austenita retenida persiste en la parte final, transformando a martensita durante un proceso posterior, como podría ser una rotura. Se ha demostrado que los aceros TRIP ofrecen una ductilidad superior y un mayor grado de endurecimiento por trabajado que los grados de acero DP con el mismo nivel de resistencia mecánica. Ver figura 10.

Sin embargo, la producción de aceros TRIP conlleva un costo adicional debido a que el procesamiento es más complicado y por la adición de aleantes al compararse con los aceros DP. (Oliver, Jones, & Forlaris, 2006)

### Figura 10

Esquema muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros TRIP y su porcentaje de elongación.

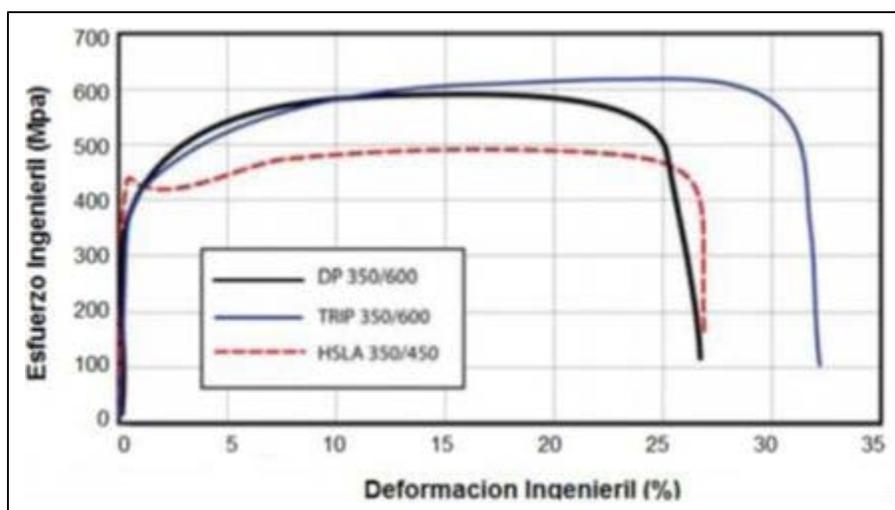


Fuente: (Oliver, Jones, & Forlaris, 2006).

En la figura 11 se observa el comportamiento  $\zeta$ - $\varepsilon$  de HSLA, DP y TRIP de un límite elástico similar. El TRIP tiene un comportamiento de endurecimiento inicial menor que el DP, pero el endurecimiento perdura a altos niveles de deformación cuando ya decrece en el DP.

### Figura 11

Comparación de TRIP, DP y HSLA mediante curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  ingenieril [10].



Fuente: (Oliver, Jones, & Forlaris, 2006).

Las tasas de endurecimiento en el trabajo de los aceros TRIP son sustancialmente superiores a las de los aceros de alta resistencia convencionales, lo cual brinda ventajas únicas en el formado por estiramiento y en el estampado por embutido. Los niveles más altos de esfuerzo en los aceros TRIP, proporcionan una ligera ventaja sobre los aceros doble fase en aquellas aplicaciones más severas de formado por estiramiento.

Los aceros TRIP pueden ser usados para proporcionar excelentes propiedades de conformado y resistencia a piezas, así como para brindar excelentes propiedades de resistencia a la rotura y de absorción de impacto, (Oliver, Jones y Fourlaris, 2006).

### **2.2.6.3. Aceros martensíticos (M)**

#### **a) Obtención de los aceros martensíticos**

Para producir los aceros martensíticos, la austenita que existe durante el laminado en caliente o recocido es transformada casi totalmente a martensita durante el temple (enfriado rápidamente) desde una temperatura en fase austenítica hasta temperatura ambiente, la transformación provoca una estructura martensítica dura en la cual el carbono, originalmente en solución en austenita, se encuentra en forma de solución sólida.

La transformación martensítica es una transformación independiente del tiempo y solo dependiente del valor absoluto de las temperaturas, lo que se define como transformación atérmica. La formación de martensita en la mayoría de los aceros va desde 300°C hasta la temperatura ambiente. Inicia a una temperatura de formación de martensita o temperatura  $M_s$  (Martensite start) y termina a una temperatura final de la formación de martensita o temperatura  $M_f$  (Martensite finish), ocurre en forma gradual con el enfriamiento. El contenido de carbono en la martensita es dependiente de la temperatura de enfriamiento. A medida que aumenta la temperatura final de

enfriamiento, el contenido de carbono en la martensita disminuye. La austenita no transformada después de la temperatura  $M_f$  se le conoce como austenita retenida o residual. Dados los deslizamientos que realiza la red durante la transformación se produce una alta densidad de dislocaciones y en ocasiones micro fisuras. (Miura, Takagi, Hira, Furukimi, & Tanimura, 1998)

### **b) Microestructura de los aceros martensíticos**

Los aceros martensíticos son caracterizados por una matriz martensítica con pequeñas cantidades de ferrita o bainita. La martensita corresponde a una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. La transformación martensítica ocurre, a diferencia de la transformación perlítica, en forma a difusional, en un proceso de deslizamiento de carácter altamente cristalográfico, que lleva a una microestructura lenticular o en listones. Ver figura 12.

#### **Figura 12**

*Esquema de la microestructura de los aceros martensíticos.*



Fuente: (Miura, Takagi, Hira, Furukimi, & Tanimura, 1998)

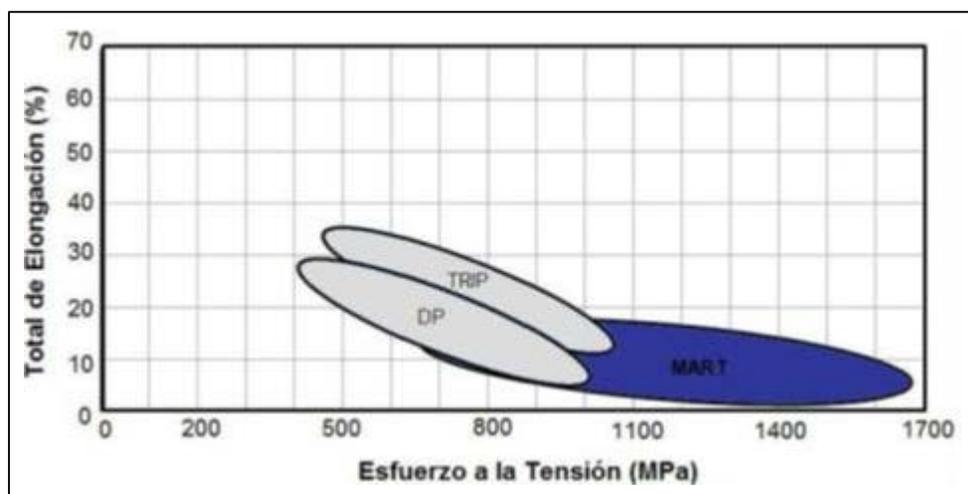
### **c) Composición química de un acero martensítico y propiedades mecánicas**

La composición química de los aceros martensíticos 700/900 se muestra en la tabla 7 y 8. Dentro del grupo de los aceros multifase, los aceros martensíticos muestran niveles de alto esfuerzo a la tensión, arriba de 1700MPa como esfuerzo último. Estos aceros son tratados térmicamente por

relevado de esfuerzos para proveer ductilidad y adecuada formabilidad con alta resistencia. Ver figura 13. (Miura, Takagi, Hira, Furukimi, & Tanimura, 1998)

### Figura 13

Esquema que muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros martensíticos y su porcentaje de elongación.



Fuente: (Miura, Takagi, Hira, Furukimi, & Tanimura, 1998).

El carbono es agregado a los aceros martensíticos para incrementar templabilidad y fortalecer la martensita; manganeso, silicio, cromo, molibdeno, boro, vanadio y níquel son también usados en varias combinaciones para incrementar la dureza. (Miura, Tagaku, Hira y Furukimi, 1998)

### Tabla 8

Composición química del acero martensítico.

	C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	W
%	0.19	0.004	0.49	.0004	0.24	0.03	.018	0.04	0.019	0.004	0.002	0.046	0.002

Fuente: (Miura, Takagi, Hira, Furukimi, & Tanimura, 1998).

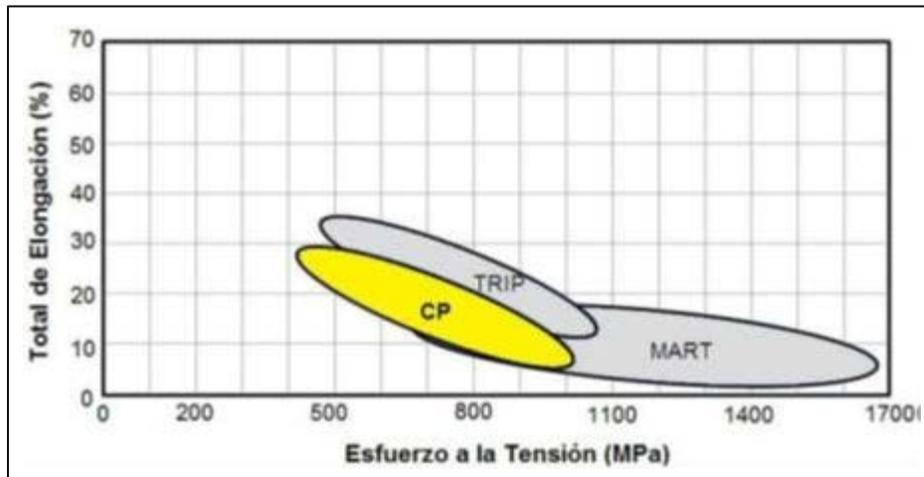
#### 2.2.6.4. Acero de fase compleja (CP)

Oliver, Jones y Fournalaris, (2006), mencionan que la microestructura de los aceros fase compleja (CP) está compuesta de pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida y perlita contenida en una matriz de ferrita/bainita.

Se crea un refinamiento de grano muy fino para retardar la recristalización o precipitación de elementos microaleantes como Ti. En comparación con los aceros DP, estos aceros muestran significativamente alto esfuerzo de cedencia y esfuerzos a la tensión de 800 MPa o más. Están caracterizados por alta energía de absorción y alta capacidad de deformación. Ver figura 13.

#### Figura 14

*Rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros de fase compleja y su porcentaje de elongación.*



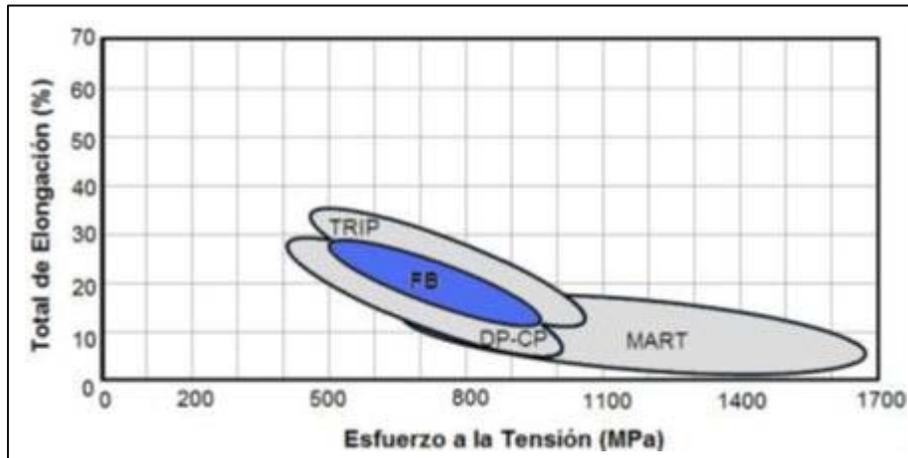
Fuente: (Miura, Takagi, Hira, Furukimi, & Tanimura, 1998)

#### 2.2.6.5. Aceros ferríticos-bainíticos (FB)

Estos aceros contienen una estructura de ferrita fina y bainita. El esfuerzo se obtiene por refinamiento de grano y por la bainita presente, este tipo de acero está disponible como producto laminado en caliente; tienen buena soldabilidad, buen rendimiento al impacto y resistencia a la fatiga. Ver figura 15

**Figura 15**

*Rangos de esfuerzo a la tensión y cedencia en aceros de FB.*



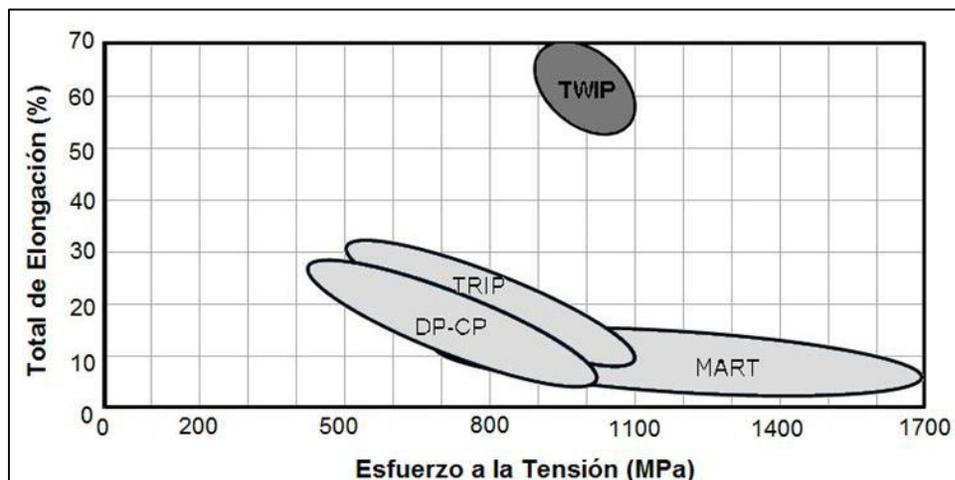
Fuente: (Miura, Takagi, Hira, Furukimi, & Tanimura, 1998)

#### **2.2.6.6. Aceros plasticidad inducida por maclaje (TWIN)**

Estos aceros tienen altos porcentajes de manganeso (17-24%) lo cual causa que sean completamente austeníticos a temperatura ambiente. Esta característica es el principal modo de plasticidad inducida por maclaje, generadas durante la deformación. Las maclas causan un incremento instantáneo del rango de endurecimiento (valor  $n$ ), así es como la microestructura llega a ser muy fina. El resultado del maclaje se manifiesta dándole resistencia al acero. Los aceros TWIP combinan una extrema resistencia con una alta formabilidad. La resistencia a la tensión es más alta que 1000MPa. Ver figura 16.

**Figura 16**

*Esquema de los rangos de esfuerzo a la tensión y cedencia en aceros TWIP.*



### **2.2.7. Conformabilidad de los Aceros Avanzados de Alta Resistencia**

El conformado de los AHSS es actualmente la mayor problemática que presentan estos aceros. Los nuevos AHSS poseen unas características mecánicas diferentes a las convencionales que se traducen en un desconocimiento por parte de algunos ingenieros a la hora de trabajar con ellos.

La principal diferencia en cuanto a conformabilidad entre los AHSS, y los aceros de alta resistencia convencionales, como los aceros microaleados o HSLA, es que los primeros poseen una mayor capacidad de endurecimiento por deformación o trabajo en frío. Esta alta capacidad de endurecimiento por deformación permite aumentar la resistencia mecánica del acero sin reducir su conformabilidad, e incluso aumentarla, al resistir mejor la estricción localizada durante su conformado. La buena combinación de resistencia y conformabilidad de los AHSS, se consigue a la combinación controlada de fases estables y meta estables en una microestructura fina, la cual se ve significativamente modificada en el proceso de conformado.

Los aceros AHSS son relativamente blandos y aumentan su resistencia al ser deformados, siendo, por lo tanto, fácilmente conformables y extremadamente resistentes una vez que han sido deformados (del orden de 4 a 5 veces más que un acero convencional). Además, gracias a su capacidad de ganar resistencia con la deformación, pueden ser embutidos con menor riesgo de rotura, pues las zonas más deformadas y con más tendencia a rasgarse, son las que más resistencia desarrollan.

Como contraste, y debido a su elevada resistencia mecánica, aparecen problemas en la implementación de estos aceros, como:

- La rotura de herramientas a causa de los elevados requerimientos de tonelaje necesarios para la formación de piezas, a partir de acero con resistencias del doble o triple de aquella de los aceros convencionales de alta resistencia.
- Desgaste de la herramienta: Los insertos endurecidos y los filos de las cuchillas de corte pueden desgastarse en el transcurso de una sola corrida de producción, a causa de la dureza de los AHSS, la cual casi es igual a aquella del material con el que está hecho el mismo troquel
- Problemas de calidad en las dimensiones de las piezas que surgen a causa de la recuperación elástica (springback) asociado con la alta resistencia, y con el aumento de la sensibilidad en el proceso por la variabilidad en las propiedades del material a niveles superiores de resistencia.
- La ausencia de datos metalúrgicos detallados del acero para dar soporte en las simulaciones del proceso de formado, y así asegurar la continuidad en el uso del mismo material a través de todo el proceso de desarrollo y pruebas, lo que ayudaría a disminuir los errores al predecir el efecto de la recuperación elástica (springback).

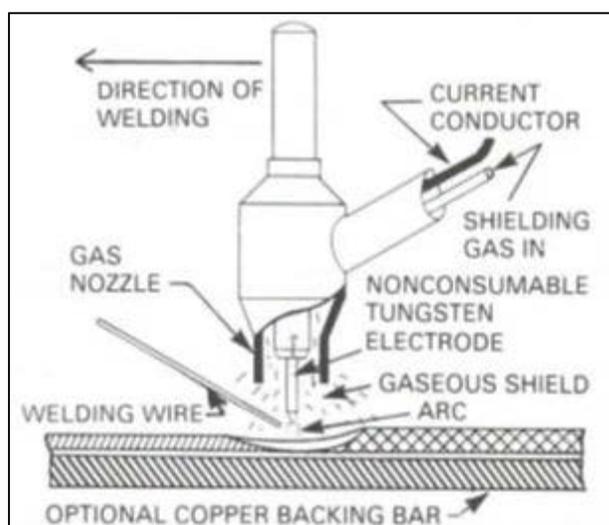
## 2.3. Soldadura Por GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

### 2.3.1. Fundamentos del Proceso

El proceso GTAW se basa en el uso de un electrodo de tungsteno (o una aleación de tungsteno) no consumible sostenido en una antorcha (o soplete). Se alimenta un gas de protección para proteger el electrodo, la pileta líquida y el metal de soldadura durante la solidificación de la contaminación atmosférica. El arco eléctrico se produce por el paso de la corriente a través del gas de protección ionizado, que conduce la electricidad. El arco se establece entre la punta del electrodo y la superficie de trabajo. El calor generado funde el metal base, tal como se observa en la figura 18. Una vez establecido el arco y el charco de soldadura, el soplete se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente las superficies de empalme. Si se usa alambre de aporte, se alimenta por el borde delantero del charco de soldadura para llenar la unión. (Alonso, 2012, pág. 39)

### Figura 17

*Esquema del proceso TIG.*



Fuente: (Soldeo TIG, 2021)

Todos los sistemas de soldadura GTAW tienen en común cuatro componentes básicos.

1. Soplete o antorcha
2. -Electrodo
3. Fuente de poder
4. Sistema de alimentación del gas de protección.

### **2.3.2. *Ventajas y Limitaciones***

Según Society (2012), las ventajas de este proceso son:

- Se obtienen soldaduras de alta calidad, cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos, ya que el gas protector impide el contacto entre la atmósfera y el baño de fusión.
- Sirve para soldar casi todo tipo de metales como aluminio, magnesio, acero inoxidable, bronce, plata, cobre, níquel y aleaciones, hierro fundido, aceros de bajo carbono, aceros aleados e incluso uniones de metales disímiles.
- Se requiere poca o ninguna limpieza posterior.
- No se produce escoria que podría quedarse atrapada en la soldadura.
- No hay metal de aporte que atraviese el arco, de modo que no se producen salpicaduras.
- Proceso poco sensible a la presencia de fisuras, porosidades y salpicaduras.
- La soldadura es posible en todas las posiciones.
- El cordón obtenido es de buen acabado superficial, que puede mejorarse con sencillas operaciones de acabado, lo que incide favorablemente en los costes de producción.
- Puede emplearse con o sin material de aporte.

- Muy baja emisión de humos.

Limitaciones del proceso son:

- ✓ Las tasas de deposición son más bajas que con GMAW.
- ✓ El soldador requiere un poco más de destreza y coordinación que con los otros procesos de soldadura.
- ✓ Para espesores mayores de 10mm (3/8") resulta más costoso que los procesos con electrodo consumible
- ✓ Es difícil proteger la zona de soldadura en lugares donde hay corrientes de aire

Entre los problemas potenciales del proceso están:

- ✓ Puede haber inclusiones de tungsteno si se permite que el electrodo haga contacto con la parte líquida.
- ✓ Una inadecuada posición del metal de aporte podrá producir contaminación dl mismo.
- ✓ Requiere buena calidad en el metal base y en el aporte.
- ✓ Puede haber contaminación o porosidad causada por fuga del refrigerante en el caso de antorchas refrigeradas por agua.
- ✓ Puede haber golpe, o desviación del arco, al igual que en los otros procesos por arco

### ***2.3.3. Aplicaciones del Proceso de Soldadura GTAW***

El proceso TIG se puede utilizar para el soldeo de todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones.

Puesto que el proceso posee las virtudes necesarias para conseguir soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas defectos y buen acabado superficial, es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentación, generación de energía, nuclear y aeroespacial.

Como su tasa de deposición es baja, no resulta económico para soldar materiales con espesores mayores de 10 mm.

En estos casos la soldadura de arco de tungsteno con gas (GTAW), se utiliza para efectuar la pasada de raíz, empleándose otros procesos de mayor productividad para el resto de las pasadas de relleno. También se puede utilizar para realizar soldaduras por puntos y por costuras. (Society, 2012)

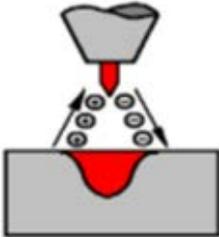
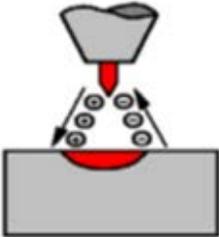
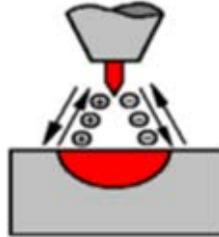
#### **2.3.4. Variables del Proceso**

##### **a) Corriente del arco**

Es una de las más importantes consideraciones durante el proceso de soldadura, ya que está relacionada con la penetración, velocidad de soldadura, grado de deposición y calidad de la junta. Existen 3 tipos a considerar:

corriente directa conectada al electrodo negativo (DCEN), corriente directa conectada al electrodo positivo (DCEP) y corriente alterna. En la Tabla 9, podemos observar el efecto en la unión soldada con los 3 tipos de corriente. (Society, 2012)

**Tabla 9***Características de tipos de corriente para soldadura GTAW*

Tipo de corriente	Corriente continua	Corriente continua	Corriente alterna
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspectos de la Penetración			
Acción decapante	No	Si	Si, una vez durante el semiciclo positivo
Balace calórico aproximado	70% en la pieza. 30% en la punta del electrodo.	30% en la pieza. 70% en la punta del electrodo.	50% en la pieza. 50% en la punta del electrodo
Penetración	Profunda y Estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del electrodo	Excelente. Ej. 400A; 3,2mm	Pobre Ej. 30A; 3,2mm	Buena Ej. 225A; 3,2mm

Fuente: (O. Brien)

**b) Voltaje del arco**

El voltaje medido entre el electrodo de tungsteno y el trabajo se conoce comúnmente como el voltaje de arco. Este voltaje es una variable muy dependiente de:

- ✓ La corriente del arco.
- ✓ La forma de la punta del electrodo de tungsteno.
- ✓ La distancia entre el electrodo de tungsteno y el trabajo.
- ✓ El tipo de gas protector.

El voltaje de arco cambia cuando cambian las otras variables y sólo se utiliza para describir los procedimientos de soldadura porque es fácil de medir. Las demás variables como el gas

protector, el electrodo y la corriente se determinan previamente. El voltaje del arco puede servir para controlar la longitud del arco una variable crítica que es difícil de vigilar. La longitud del arco es importante en este proceso porque afecta la anchura del charco de soldadura; la anchura del arco es proporcional a la longitud del arco. Por tanto, en casi todas las aplicaciones con excepción de aquellas en las que se suelda lámina la longitud del arco recomendada es la más corta posible. (Society, 2012)

### **c) Velocidad de recorrido**

La velocidad de recorrido afecta tanto la anchura como la penetración de una soldadura por arco de tungsteno y gas, aunque el efecto sobre la anchura es más pronunciado que aquel sobre la penetración. La velocidad de recorrido es importante por su efecto sobre el costo. En algunas aplicaciones, la velocidad de recorrido se define como un objetivo, y las demás variables se seleccionan de modo que se logre la configuración de soldadura deseada a esa velocidad. En otros casos, la velocidad podría ser una variable dependiente, elegida de modo que se obtenga una soldadura con la calidad y uniformidad deseada en las mejores condiciones posibles con la combinación de las demás variables. Independientemente de los objetivos, en la soldadura mecanizada casi siempre se fija la velocidad de recorrido y se modifican otras variables como la corriente o el voltaje para mantener el control de la soldadura. (Society, 2012)

#### ***2.3.5. Selección del Tipo de Corriente***

El proceso de soldadura de arco de tungsteno con gas GTAW puede utilizarse tanto con corriente continua como con corriente alterna. La elección de la clase de corriente y polaridad se hará en función del material a soldar. Con el fin de realizar esta elección correctamente, se va a destacar algunos aspectos diferenciales de ambas alternativas. En la figura 20, se han resumido los

efectos de la polaridad cuando se suelda con corriente continua y los efectos del soldeo con corriente alterna. (Society, 2012)

### 2.3.5.1. Arco con corriente continua.

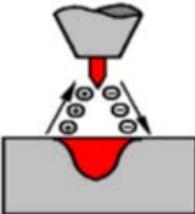
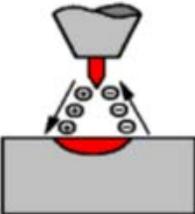
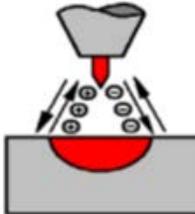
La polaridad recomendada en corriente continua (CC) es la directa, ya que si se suelda con polaridad inversa se tienen que utilizar intensidades tan bajas para que no se sobrecaliente el electrodo que resulta impracticable el soldar. (Society, 2012)

### 2.3.5.2. Arco con corriente alterna.

La corriente alterna (CA) aúna, aunque reducidas, las ventajas de las dos polaridades (Ver Tabla 10), por lo que suele emplearse en el soldeo de aleaciones ligeras, tales como las de aluminio y magnesio. (Society, 2012)

**Tabla 10**

*Características del soldeo de acuerdo con la corriente seleccionada.*

Tipo de corriente	Corriente continua	Corriente continua	Corriente alterna
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspectos de la Penetración			
Acción decapante	No	Si	Si, una vez durante el semiciclo positivo
Balace calórico aproximado	70% en la pieza. 30% en la punta del electrodo.	30% en la pieza. 70% en la punta del electrodo.	50% en la pieza. 50% en la punta del electrodo
Penetración	Profunda y Estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del electrodo	Excelente. Ej. 400A; 3,2mm	Pobre Ej. 30A; 3,2mm	Buena Ej. 225A; 3,2mm

Fuente: (O. Brien)

### **2.3.6. Equipamiento**

#### **a) Soplete**

Los sopletes de GTAW sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura y conducen el gas de protector a la zona de soldadura. La elección de un soplete se basa en a la corriente máxima de soldadura que pueden transportar sin recalentarse. La mayoría de los sopletes permiten manejar electrodos de distintos tamaños para un intervalo dado de boquillas.

En función de la corriente máxima de trabajo los sopletes podrán ser refrigerados con agua o con gas, estos últimos eliminan el calor por medio del gas de protección. Los sopletes refrigerados por gas están limitados a una corriente máxima de soldadura de 200 Amperes. En los sopletes enfriados por agua pueden llegar a utilizarse corrientes entre 300 y 500 Amperes.

Casi todos los sopletes para aplicaciones manuales tienen un ángulo de cabeza (el ángulo entre la posición del soplete y el mango) de 120°. También hay sopletes con cabeza de ángulo ajustable, cabeza a 90°, o cabeza en línea recta. Los sopletes manuales contienen interruptores en el mango que le permiten manejar la corriente y el gas de protección.

Los accesorios que utiliza el soplete son los mandriles y las boquillas.

Los mandriles generalmente son de cobre y el tamaño debe adecuarse al electrodo. Es importante que cuando se ajusta el electrodo por medio de la tapa del soplete haya un buen contacto entre el mandril y el electrodo. Esto permite una buena transferencia de la corriente sin sobrecalentamiento.

Las boquillas son las que dirigen el gas de protección a la zona de soldadura. Para ello en el soplete hay difusores de modo que el régimen de salida del gas sea con flujo laminar. Estos

difusores se conocen como difusores de gas y se diseñan para insertarse alrededor del electrodo o mandril, producen un flujo más largo y uniforme de gas de protección y permiten soldar con la boquilla a 25mm o más de la superficie de trabajo, lo que permite llegar a sectores de acceso limitado.

Las boquillas se fabrican en distintos materiales resistentes al calor y con formas, diámetros y longitudes variables. Se debe aclarar que hay un equilibrio delicado entre el diámetro de la boquilla y el flujo de gas si el flujo de gas es excesivo, para un diámetro dado, se producirá turbulencia y la protección dejará de ser efectiva. Cuando el amperaje es alto se requiere un flujo de gas elevado y por ende un diámetro de boquilla grande. La elección del tamaño de la boquilla depende de: (Oerlikon, 2008)

- Tamaño del electrodo
- Tipo de unión a soldar
- Área de soldadura que debe protegerse

#### **b) Electrodo no consumibles**

Los electrodos que se emplean son de tungsteno y aleaciones de tungsteno. Tienen un punto de fusión muy elevado de 3400°C y un punto de evaporación de 5900°C, pudiendo mantener su dureza a altas temperaturas. Prácticamente no se consumen.

El electrodo no debe tocar el baño fundido.

Hay diferentes clases de electrodos, hay de tungsteno puro (los menos costosos), tungsteno con 1 a 2% de torio (de larga vida, se emplean para aceros) o tungsteno aleado con circonio (menor contaminación, mejor calidad, se emplea para aluminio).(Society, 2009)

### **2.3.7. Metales de Aportación**

#### **a) Varillas**

El metal de aportación en el soldeo TIG no es siempre necesario cuando se sueldan piezas delgadas (de menos de 3 mm de espesor) utilizando una preparación de bordes recta o con bordes levantados. Cuando es necesario emplear material de aportación, éste puede alimentarse manual o automáticamente. Con la finalidad de obtener uniones sin defectos, es muy importante que el metal de aportación se mantenga libre de contaminaciones ya sea en forma de humedad, polvo o suciedad. Debe por tanto mantenerse en su paquete hasta el momento de ser utilizado. Durante el soldeo es importante que la parte caliente de la varilla esté siempre lo suficientemente cerca del baño de fusión como para que lo cubra el gas de protección. Puesto que el TIG es un proceso que no produce escorias y que se realiza en una atmósfera inerte que no provoca reacciones en el baño, el material de aportación, cuando se utilice, deberá tener básicamente una composición química similar a la del material de base. Normalmente, se presentan en forma de varillas de distintos diámetros: 1,1; 1,6; 2; 2,4; 3,2; 4 y 4,8 mm, con una longitud de 900 mm. (Society, 2009)

### **2.3.8. Gases de Protección**

El soplete dirige el gas hacia el arco y la pileta líquida con el fin de proteger el electrodo y el metal fundido de la contaminación atmosférica.

También suele utilizarse gas purgante de respaldo para proteger el lado de debajo de la soldadura y las superficies del metal base adyacente contra la oxidación durante la soldadura. El argón y el helio o la mezcla de ambos, son los gases inertes más utilizados en soldadura. El caudal de gas depende del tamaño de la boquilla, en general se recomienda 7 a 16 l/min para el argón y 14-24 l/min para el helio. (Society, 2009)

### **a) Argón**

El Ar es un gas monoatómico inerte con peso molecular 40. Se obtienen de la atmósfera por separación del aire licuado. Forma de ondas para tensión y corriente en soldadura con corriente alterna. Para soldadura se refina hasta 99,95%, esto es aceptable para la mayor parte de los metales excepto los reactivos y refractarios para los cuales se requiere una pureza mínima de 99,997%. El Ar se utiliza más que el He por las siguientes ventajas:

- ✓ Acción de arco más uniforme y silencioso
- ✓ Menor penetración
- ✓ acción de limpieza al soldar materiales como Aluminio y el magnesio
- ✓ menor costo y mayor disponibilidad
- ✓ Buena protección con menores caudales
- ✓ Mayor resistencia a ráfagas transversales
- ✓ Más fácil iniciación del arco.

La menor penetración del Ar resulta especialmente útil para soldar materiales delgados, y para la soldadura vertical y sobre cabeza.

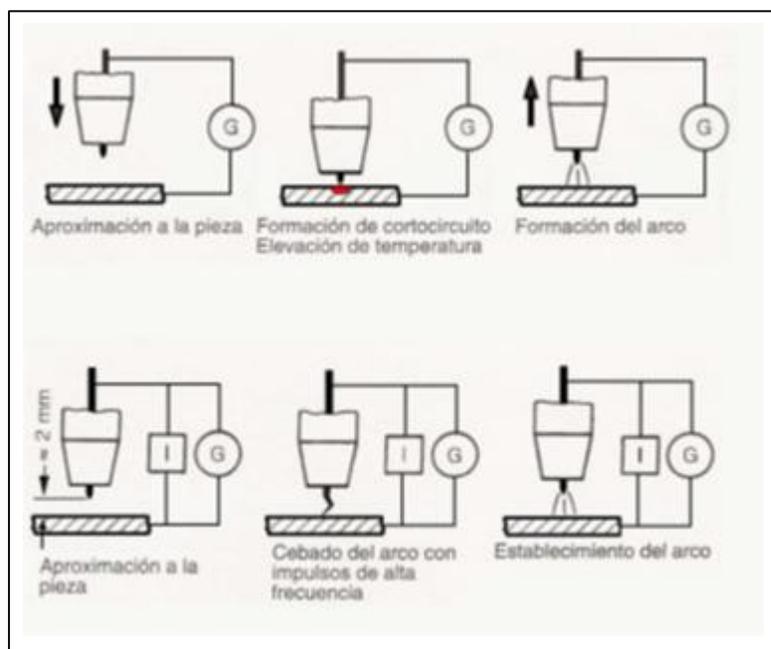
#### **2.3.9. Cebado del Arco**

El método más sencillo de cebado de arco (cebado por raspado) es raspando el electrodo, muy cuidadosamente, contra el metal base. Sin embargo, el riesgo de inclusiones de wolframio en el metal base es alto, para evitar esto el arco puede ser cebado en una placa adicional de cobre, conocida como pieza de arranque. Otra desventaja del cebado por raspado es la facilidad con que puede dañarse el electrodo. Una vez cebado el arco, retirar el electrodo hasta que quede a unos 3 mm de la pieza, (ver figura 21). Para evitar los inconvenientes del cebado por raspado se utiliza

una corriente de alta frecuencia y elevada tensión. Este método es el utilizado en corriente alterna y algunas veces con corriente continua. Por tanto, cuando se utiliza corriente alterna no es necesario tocar con el electrodo sobre la pieza para establecer el arco, sino poner bajo tensión el circuito de soldeo y sujetar el porta electrodos, de forma que el electrodo quede aproximadamente horizontal y a unos 50 mm. De la pieza. A continuación, mediante un giro de muñeca, aproximar el extremo del electrodo a la pieza, hasta que quede a unos 2 ó 3 mm. De la misma. En este punto, la corriente de alta frecuencia vence la resistencia del aire y se establece el arco. El movimiento de aproximación del electrodo debe realizarse rápidamente, para conseguir que llegue el máximo caudal de gas de protección a la zona de soldeo (ver figura 18).

### Figura 18

*Cebado del arco por raspado (G = fuente de alimentación).*



Fuente: (O. Brien)

Para extinguir el arco, tanto en corriente alterna como en corriente continua, basta con retirar el electrodo hasta la posición horizontal mediante un rápido movimiento de muñeca. Este movimiento debe realizarse rápidamente a fin de evitar deterioros en la superficie de la soldadura.

El inconveniente de las Corrientes de alta frecuencia es la distorsión que producen en las comunicaciones.

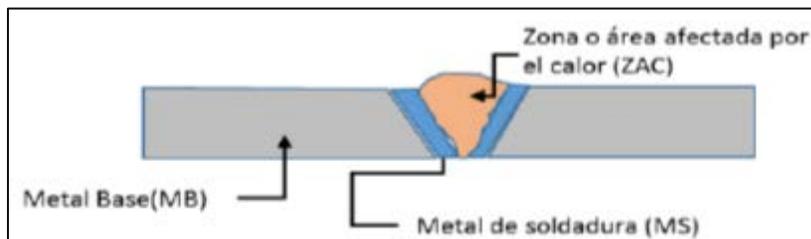
#### 2.4. Zonas Metalúrgicas de la Soldadura

En la soldadura por fusión se pueden distinguir 3 regiones claras en la unión soldada, tal como se muestra en la figura 19: (Fosca, 2007).

- Metal de Soldadura,
- Zona o área Afectada por el Calor
- Metal Base.

#### Figura 19

*Zonas de la unión soldada.*



Fuente: (O. Brien)

**A. Metal Base (MB):** Es la región donde no ocurre cambio microestructural.

**B. Metal de Soldadura o Zona de Fusión (ZF):** Es la zona donde se alcanza la fusión completa.

Además, el metal de soldadura es el resultado de un proceso de dilución.

**C. Zona o área afectada por el calor (ZAC):** Es la Zona donde su estructura original y propiedades mecánicas son modificadas mediante un ciclo térmico.

#### 2.5. Ciclo Térmico en la Unión Soldada

El metal adyacente a una soldadura está expuesto a ciclos térmicos rápidos, produciéndose en esta región diferentes y complejos cambios metalúrgicos. Al respecto, existen datos acumulados

considerables respecto al efecto del calor de aporte de la soldadura por arco eléctrico sobre la distribución de temperaturas en las proximidades del metal soldado; por ello consideraremos aquí con algún detalle el proceso de soldadura por arco eléctrico. (Fosca, 2007)

### 2.5.1. Factores que Afectan en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco

Las distribuciones de las temperaturas en la soldadura (SMAW) está asociado por los siguientes factores: (Fosca, 2007)

#### A. Aporte de Calor Neto

Durante el proceso de soldeo se libera calor, expresado mediante la siguiente fórmula:

$$H_{net} \left( \frac{joules}{mm} \right) = \frac{V (vol) \times I (amp)}{v \left( \frac{mm}{seg} \right)} \times f \quad Ec. 1$$

**Donde:**

$H_{net}$  = Aporte de Calor Neto (Joules/mm)

$V$  = Voltios (V)

$f$  = Eficiencia de la transferencia de Calor (%). En la tabla 11, se muestra la eficiencia térmica de los diferentes procesos de soldadura.

**Tabla 11**

*Eficiencia térmica de los diferentes procesos de soldadura.*

Proceso	Eficiencia
Oxiacetilénico	35%
GTAW	20-50%
GMAW	70-85%
SMAW	70-80%
FCAW	65-85%
SAW	90-99%

Fuente:

$v$  = Velocidad de avance en la soldadura (mm/seg)

$I$  = Intensidad de corriente (Amperios)

### **B. Temperatura de precalentamiento**

Consiste en calentar el material base antes y durante el proceso.

### **C. Geometría de la soldadura**

Comprende el espesor, la forma y las dimensiones de la soldadura y el ángulo empleado entre las juntas a unir.

### **D. Conductividad Térmica**

Consiste en la capacidad de la sustancia para transmitir el calor de sus moléculas a otras adyacentes que están en contacto.

#### **2.5.2. Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor**

El cálculo de la ZAC, es muy importante, pues determina la zona que ha sido influenciada por el calor y donde se producen los cambios microestructurales y por ende los cambios de propiedades mecánicas. Este ancho se calcula con la ecuación 2 (Fosca, 2007)

$$Y = \frac{\left[ \frac{1}{T_{max} - T_0} - \frac{1}{T_{fusion} - T_0} \right] H_{net}}{4.13 \rho C t} \quad Ec. 2$$

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. ( $\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

$H_{net}$  = 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  $\text{mm}$

### ***2.5.3. Fórmula de la Velocidad de Enfriamiento para Chapas Gruesas y Delgadas***

La energía térmica aplicada a la zona soldada es distribuida por conducción en la soldadura. Durante el enfriamiento la disminución de la temperatura se produce por una combinación de pérdida de calor al ambiente, transferencia de calor al metal base y al metal de soldadura. De esta forma, la velocidad de enfriamiento que tiene lugar en la soldadura es una función de la velocidad de disipación de energía.

Una de las aplicaciones prácticas de la ecuación de la velocidad de enfriamiento es el cálculo de la temperatura de precalentamiento. Si la placa es relativamente gruesa, la velocidad de enfriamiento de la junta soldada medida sobre la línea central puede ser aproximada por medio de la Ec. 3 (Fosca, 2007)

$$V_e = \pi r^2 = \frac{2\pi K(T_c - T_0)^2}{H_{net}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$T_0$  : Temperatura de precalentamiento utilizado ( $^{\circ}\text{C}$ )

$K$  : Conductividad Térmica del material ( $\text{J}/\text{mm s}^{\circ}\text{C}$ )

$T_c$  : Temperatura a la que se calcula la velocidad de enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}$ )

$H_{net}$  : Calor aportado neto en el proceso ( $\text{J}/\text{mm}$ ).

$V_e$  : Velocidad de Enfriamiento durante el proceso ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )

Para chapas delgadas la velocidad de enfriamiento se usa la ecuación 3:

$$v_e = \frac{-2\pi k p C (h)^2}{H_{net}^2} * (T_c - T_0)^3$$

Donde:

$V_e$ : Velocidad de Enfriamiento durante el proceso ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )

$K$ : Conductividad Térmica del material ( $\text{J}/\text{mm s}^{\circ}\text{C}$ )

$T_c$ : Temperatura a la que se calcula la velocidad de enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$ : Temperatura de precalentamiento utilizado ( $^{\circ}\text{C}$ )

$H_{net}$ : Calor aportado neto en el proceso ( $\text{J}/\text{mm}$ )

$h$ : Espesor del material ensayado ( $\text{mm}$ )

$p$ : Densidad del metal base ensayado ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )

$C$ : Calor específico del material ensayado ( $\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$ ).

## 2.6. Microconstituyentes de los Aceros al Carbono

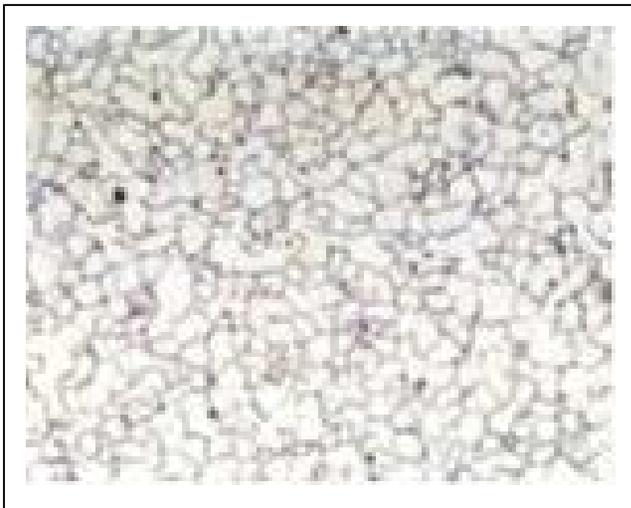
En los aceros al carbono se pueden presentar, dependiendo de la temperatura y su composición química, microconstituyentes como ferrita, austenita, cementita, perlita y martensita. A continuación se presentarán algunas características y propiedades de los constituyentes antes mencionados. (Sifuentes, 2011)

### 2.6.1. Ferrita ( $\alpha$ )

La ferrita es hierro casi puro y es el constituyente más blando y dúctil del diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C. Es una solución sólida intersticial de carbono en hierro alfa cúbica centrada en el cuerpo (CCCu) y a temperatura ambiente disuelve 0,008 % de carbono intersticialmente. Este microconstituyente se muestra en la figura 20.

#### Figura 20

*Microestructura del acero con 100% de Ferrita X100.*



Fuente: (Sifuentes, 2011).

La ferrita presenta una dureza de 90 Brinell, una resistencia máxima a la tracción de 270 MPa y una elongación de 40%. La ferrita es estable hasta aproximadamente 910°C, a mayores

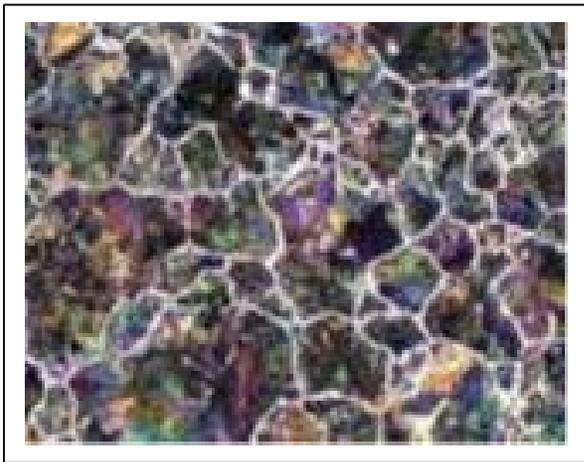
temperaturas se transforma en austenita. Cuando el acero tiene menos de 0,8%C, la ferrita está presente en la microestructura como una fase libre. A mayores contenidos de carbono, la ferrita se encuentra formando parte de un constituyente llamado “Perlita”, que son colonias (agrupaciones) de láminas de ferrita y cementita.

### 2.6.2. Cementita ( $Fe_3C$ )

Es el microconstituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, presentan una alta temperatura de fusión. Alcanza una dureza de alrededor de 800 HB, tiene una reducida resistencia a la tracción (35 MPa), una ductilidad nula ( $\% \epsilon = 0$ ) y alta resistencia a la compresión. Su estructura cristalina es ortorrómbica. Es magnética a temperatura ambiente, perdiendo su magnetismo a 218°C. Este microconstituyente se muestra en la figura 21. (Sifuentes, 2011)

#### Figura 21

*Microestructura del acero 1%C, red blanca de cementita.*



Fuente: (Sifuentes, 2011)

El cementita es una fase que aparece libre a partir de 0.8% de carbono, en forma de red, rodeando a las colonias de perlita.

### 2.6.3. *Perlita (P)*

La Perlita no es una fase, sino un agregado laminar de ferrita y cementita. Está constituida por láminas de ferrita (88%) y cementita (12%) y se forma a temperatura constante a partir del enfriamiento de la austenita a 723°C. Su elongación promedio es de 20 % aproximadamente.

Es un microconstituyente eutectoide, la microestructura de un acero que contiene el 0,8 %C es 100% perlita. Tiene una dureza de 200 HB a 250 HB, una resistencia a la tracción que varía entre 600 MPa y 850 MPa. Ambas dependen de la distancia entre las láminas de cementita. Esta microestructura se muestra en la figura 22.

#### **Figura 22**

*Microestructura del acero con 100% Perlita x400.*



Fuente: (Sifuentes, 2011)

La velocidad de enfriamiento desde la temperatura de austenización determina la distancia media entre láminas de la perlita. A enfriamientos más lentos, la separación entre láminas es mayor, del orden de 400 nm, a este tipo de constitución se le llama “Perlita gruesa”. “Perlita media” se obtiene mediante enfriamientos menos lentos, con una separación entre láminas de unos 350 nm.

“Perlita fina” se obtiene con enfriamientos más rápidos, con una separación entre láminas del orden de los 250 nm. En la tabla 2, se muestran la resistencia a la tracción y la dureza de la perlita gruesa y la perlita fina.

**Tabla 12**

*Propiedades mecánicas de la perlita.*

Estructura	Resistencia a la tracción (Kg/mm <sup>2</sup> )	Dureza Brinell (HB)
Perlita gruesa	60	200
Perlita fina	85	250

Fuente: (Sifuentes, 2011)

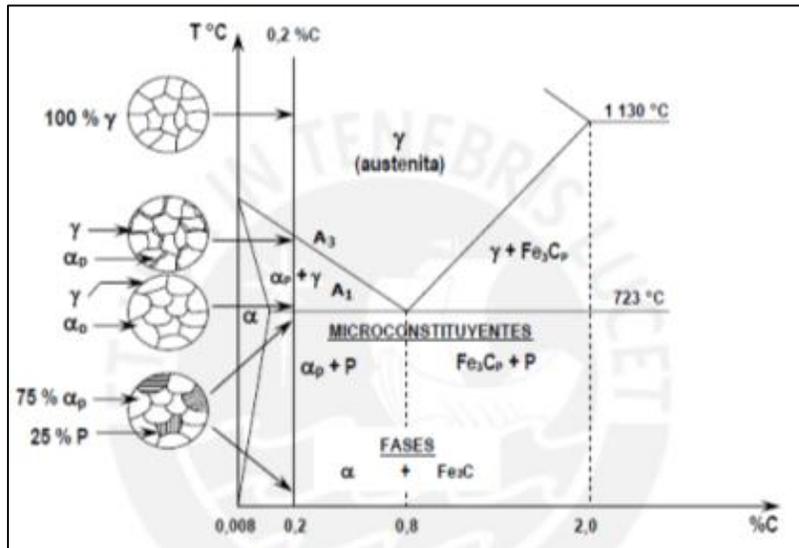
#### **2.6.4. Austenita ( $\gamma$ )**

Es una solución sólida intersticial de carbono en hierro cúbico centrado en las caras (CCCa). Es un constituyente de composición química variable (%C < 2,0). La austenita se encuentra en estado de equilibrio en los aceros a temperaturas superiores a A1 (>723°C).

La austenita tiene una resistencia a la tracción que varía entre 800 MPa y 1050 MPa, una dureza promedio de 300 HB y una elongación de 30% a 60%. Una característica de la austenita es que no es magnética. Es el constituyente más denso de los aceros. En la figura 23 se aprecia las microestructuras de un acero de bajo carbono a diferentes temperaturas.

**Figura 23**

*Microestructura de un acero de 0.2% de carbono enfriado lentamente.*



Fuente: (Sifuentes, 2011)

### 2.6.5. Bainita

Este microconstituyente del acero se obtiene por transformación isotérmica de la austenita. Mientras más baja su temperatura de formación, las partículas de carburos son más finas. La bainita superior, que tiene forma como de plumas de ave, se forma a temperaturas entre 500°C y 450°C. La bainita inferior, con una morfología acicular compuesta por agregados finos de carburos y ferrita, se forma a temperaturas entre 400°C y 250°C. Esta estructura bainítica provee al acero de elevados valores de dureza y de tenacidad.

### 2.6.6. Martensita

Este microconstituyente se obtiene de la austenita, al aumentar la velocidad de enfriamiento. Es una solución sólida sobresaturada de carbono de estructura tetragonal.

Es muy frágil, tiene una dureza de 50 a 68 Rockwell C, una resistencia a la tracción de 1650 MPa a 1450 MPa y un alargamiento del 0.5% al 2.5%. Presenta un aspecto acicular, como se aprecia en la figura 24.

### **Figura 24**

*Microestructura de la martensita X400.*



Fuente: (Sifuentes, 2011)

Las propiedades mecánicas de los aceros en estado de equilibrio dependen de las fases presentes en su microestructura. La ferrita es blanda, de baja resistencia mecánica y fácilmente deformable; el cementita es dura y muy frágil; y la perlita combina las propiedades de la ferrita con el cementita, es decir tiene buena resistencia mecánica y dureza, y deformabilidad aceptable.

### **2.7. Tratamientos Térmicos de los Aceros al Carbono**

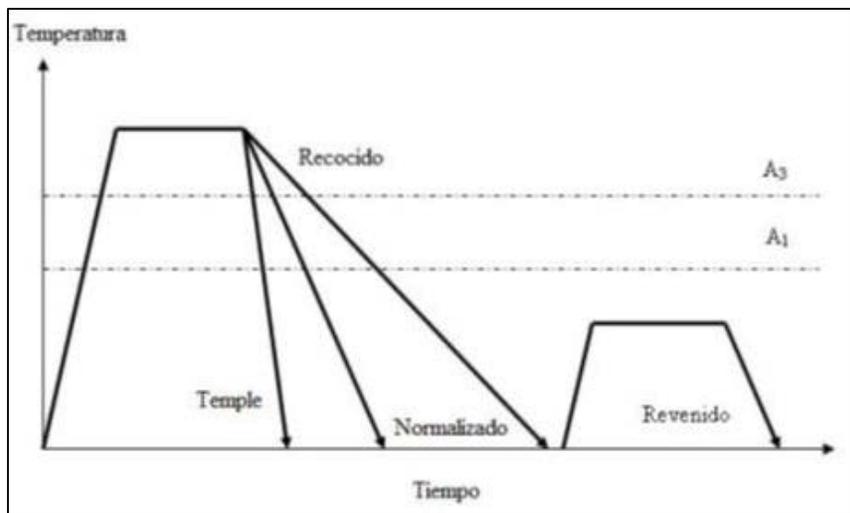
Tratamiento térmico es el conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento a que son sometidos los aceros bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo, atmósfera y velocidad de variación de la temperatura, con el objetivo de alterar sus propiedades o conferirles características determinadas. Los tratamientos térmicos modifican en mayor o menor escala, la estructura, resultando en una alteración de las distintas propiedades del material. Tiene

fundamental importancia el ciclo térmico impuesto (Figura 25). El mismo consta de las siguientes etapas:

- Calentamiento hasta una cierta temperatura T. Importa aquí la velocidad con que se efectúa.
- Tiempo de permanencia a la temperatura T.
- Enfriamiento. Esta es la etapa más importante ya que la velocidad del mismo determina la microestructura resultante.

### Figura 25

*Curvas temperatura – tiempo representativas de los tratamientos térmicos más importantes en aceros al carbono.*



Fuente: (SENA)

Los principales tratamientos son:

- **Recocido:** Calentamiento y mantenimiento a temperatura por encima de la crítica A3 y luego enfriamiento a una velocidad lenta para propósitos tales como: reducir dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajado en frío, producir una microestructura deseada u obtener propiedades mecánicas, físicas u otras deseadas.

- **Normalizado:** Calentamiento a temperatura superior a la crítica A3 y luego enfriado en aire a una temperatura sustancialmente por debajo del rango de transformación.
- **Temple:** Endurecimiento por austenización y posterior enfriamiento como para que algo o toda la austenita se transforme en martensita.
- **Revenido:** Recalentamiento de una aleación templada o normalizada a una temperatura por debajo del rango de transformación y posterior enfriamiento.

## 2.8. Diagramas TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación)

Los diagramas TTT son también conocidos como diagramas de transformación isotérmica. El tiempo se presenta logarítmicamente en el eje horizontal y la temperatura en el eje vertical. Esta curva se interpreta partiendo del tiempo cero ( $t_0$ =tiempo donde inicia la transformación en la región de Austenita) y continúa hacia abajo y a la derecha a lo largo de la trayectoria que muestra cómo se enfría el metal en función del tiempo.

La Figura 28 presenta un ejemplo del diagrama TTT para un acero donde:

$P_s$  = Representa el momento en el cual se produce Perlita gruesa.

$P_f$  = Representa el momento en el cual se produce Perlita fina.

$M_s$  = Representa el momento en el cual se produce Martensita gruesa.

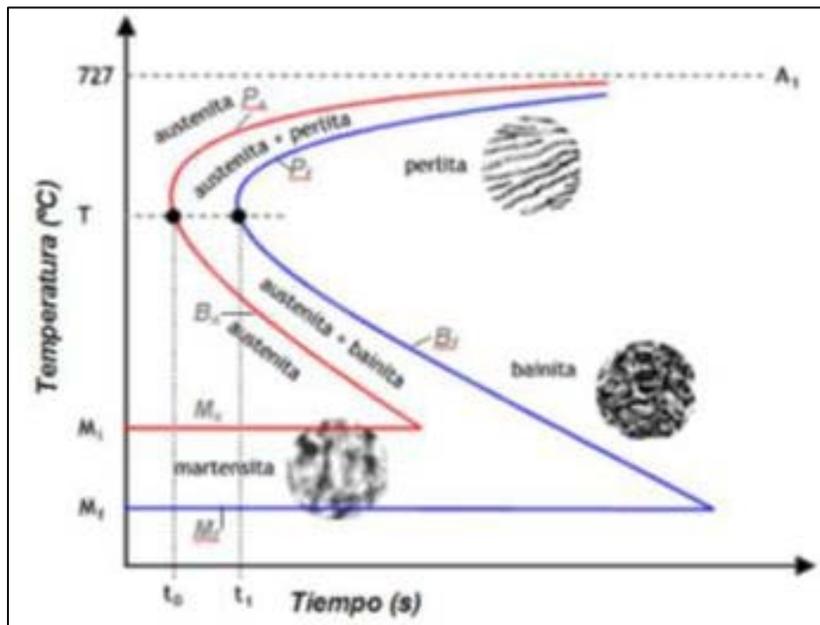
$M_f$  = Representa el momento en el cual se produce Martensita fina.

$B_s$  = Momento de inicio de la transformación a la Bainita.

$B_f$  = Momento de la finalización de la transformación Bainita.

**Figura 26**

Ejemplo de diagrama TTT para un acero



Fuente: Liman Tylor. Metals Handbook. p. 420

## 2.9. Curvas de la “S”

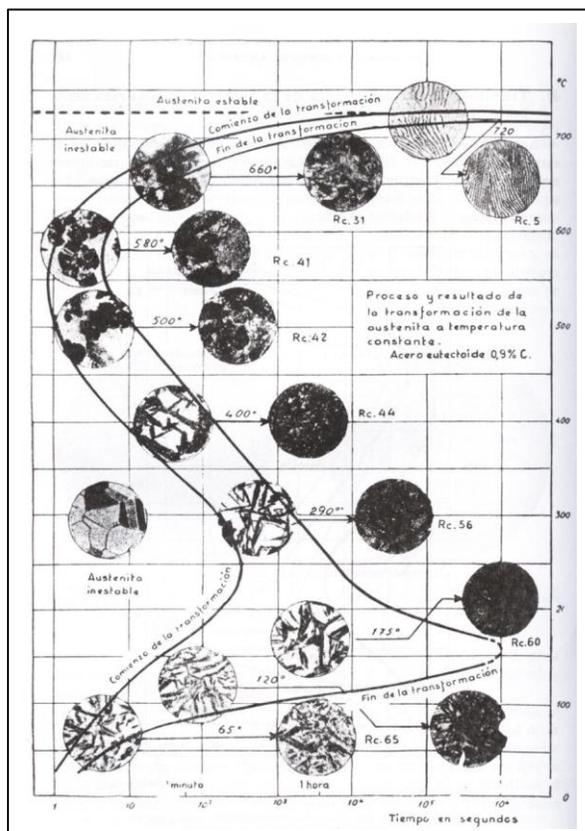
Un diagrama TTT (temperatura, tiempo, transformación) o curva S (figura 29) resume las posibles transformaciones de la austenita para cada acero, imprescindibles tanto para el diseño de tratamientos térmicos como para la interpretación de las microestructuras resultantes después de los mismos.

Su construcción experimental se realiza mediante un determinado número de muestras de acero que, previamente austenizadas, se enfrían en baños de sales a diferentes temperaturas y tiempos determinados. La microestructura obtenida en cada una de las muestras se analiza y representa, obteniéndose así el diagrama TTT para ese acero.

Es curva es conocida también con el nombre de curva de transformación isotérmica.

**Figura 27**

Curvas de la "S".



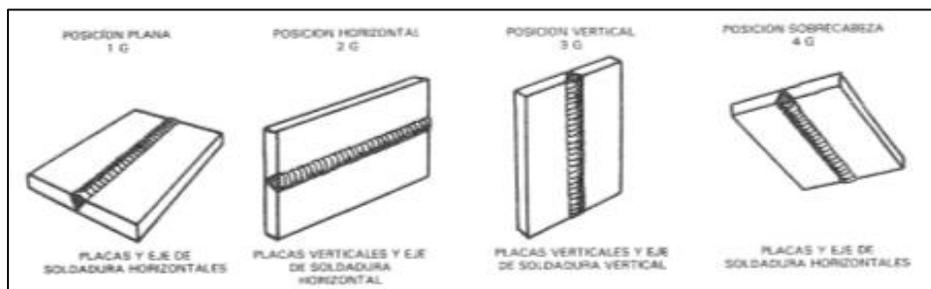
Fuente: Fuente: Liman Tylor. Metals Handbook. p. 422

## 2.10. Posiciones de Soldadura

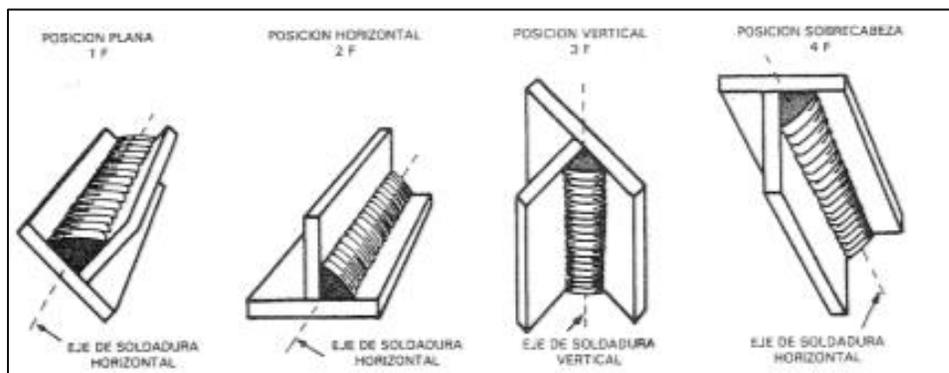
De acuerdo a ANSI/AWS A 3.0-85. En la figuras 28, 29 y 30, se observa las posiciones de soldadura.

**Figura 28**

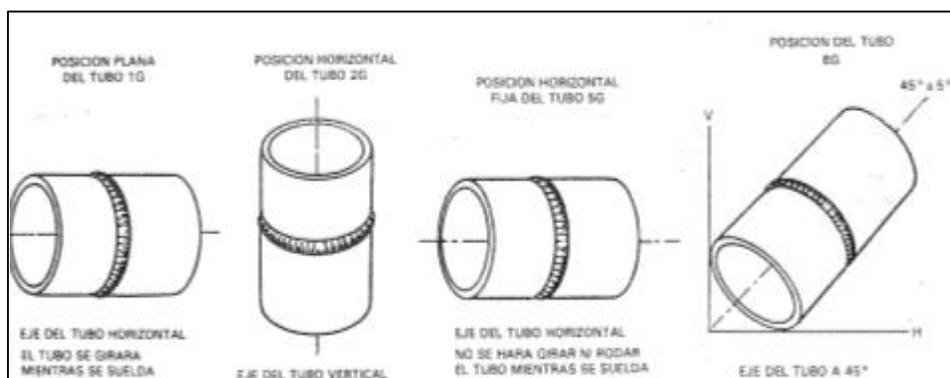
Posiciones para soldadura de ranura (placas)



Fuente: (Masabanda Santos &amp; yauripoma Guacho, 2009)

**Figura 29***Posiciones para soldadura de filete.*

Fuente: (Masabanda Santos &amp; yauripoma Guacho, 2009)

**Figura 30***Posiciones para soldadura de tubos*

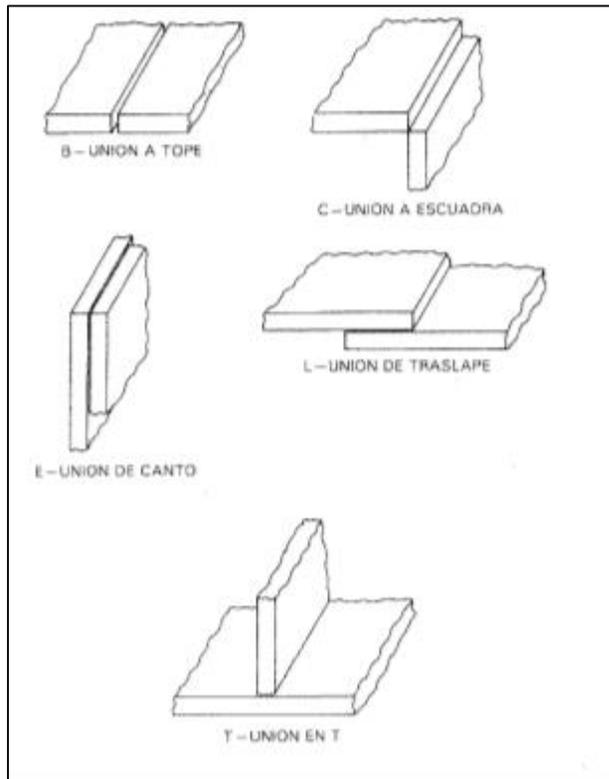
Fuente: (Masabanda Santos &amp; yauripoma Guacho, 2009)

## 2.11. Uniones Básicas de Soldadura

Cuando las piezas de acero son llevadas a la forma de junta, ellas pueden asumir una de las cinco configuraciones presentadas en la Figura 31. 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 31**

*Uniones básicas de soldadura.*



Fuente: (Masabanda Santos & yauripoma Guacho, 2009)

## **2.12. Control de Calidad de las Soldaduras**

Hay numerosos ensayos usados para determinar las varias propiedades mecánicas y químicas de los metales. Los métodos de ensayo son generalmente agrupados en dos clases, destructivos y no destructivos.

### **2.12.1. Ensayos Destructivos**

Exigen la destrucción de la pieza soldada, para examinar su estructura interna del metal base y metal aportado, en otros casos en probetas tomadas de la soldadura para determinar las propiedades mecánicas de la junta o de sus diferentes partes.

### **a) Ensayos mecánicos.**

Son utilizados principalmente para el control de los materiales de base y de los metales de aportación; mediante estos ensayos se determina los valores de resistencia a la tracción, del límite, elástico y el alargamiento de los metales.

Los ensayos mecánicos más usados, son:

- ✓ Ensayos de tensión.
- ✓ Ensayos de dureza en la soldadura o en sus proximidades.
- ✓ Ensayos volumétricos (de doblado o doblez)
- ✓ Ensayos de resistencia (energía de rotura por choque, de una probeta entallada).

- **Ensayo de dureza**

La dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación permanente (plástica) en su superficie, o sea la resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado.

En las uniones soldadas se determina la dureza, en la mayoría de los casos en la zona afectada por el calor (ZAC), para evitar riesgos de fisuraciones generadas por las altas temperaturas que se dan y por los enfriamientos rápidos que puedan ocurrir; es por esto que se realizan los ensayos de dureza en la zona más frágil o crítica con el fin de poder programar los correspondientes controles como, por ejemplo, el precalentamiento de las piezas.

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

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

El estándar ASTM E 18-03 define la dureza Rockwell como un método de ensayo por

indentación por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza un indentador cónico-esferoidal de diamante (penetrador de diamante), o una bola de acero endurecido (acero o carburo de tungsteno), bajo condiciones específicas contra la superficie del material a ser ensayado, en dos operaciones, y se mide la profundidad permanente de la impresión bajo condiciones específicas de carga.

El estándar ASTM E18-03 (Métodos de prueba estándar para la dureza de Rockwell de materiales metálicos) define el número de dureza Rockwell como un número derivado del incremento neto en la profundidad del indentador cuando la fuerza en el indentador es incrementada desde una fuerza previa (preliminar específica) hasta una fuerza total (específica) y luego retornada al valor de fuerza previa. En la tabla 13, se observa las diferentes escalas de dureza Rockwell.

**Tabla 13**

*Escalas de dureza Rockwell*

Símbolo de la escala	Penetrador	Carga total (kg)	Aplicaciones
A	Diamante	60	Aceros tratados y sin tratar. Materiales muy duros. Chapas duras y delgadas.
B	Esfera de 1/16 pulgada	100	Aceros recocidos y normalizados.
C	Diamante	150	Aceros tratados térmicamente.
D	Diamante	100	Aceros cementados.
E	Esfera de 1/8 pulgada	100	Metales blandos y antifricción.
F	Esfera de 1/16 pulgada	60	Bronce recocido.
G	Esfera de 1/16 pulgada	150	Bronce fosforoso y otros materiales.
H	Esfera de 1/8 pulgada	60	Metales blandos con poca homogeneidad, fundiciones con base hierro.
K	Esfera de 1/8 pulgada	150	Aplicaciones análogas al tipo anterior.

### Ventajas:

- No es necesaria la preparación de la probeta (corte, pulido, incrustación).
- Permite una lectura directa del valor de dureza, sin necesidad de evaluación óptica (medición de las diagonales como en los métodos ópticos).
- Es un procedimiento rápido (ciclo de ensayo corto) y barato (las máquinas de ensayo de dureza son comparativamente baratas porque no tienen que estar equipadas con ópticas complejas como las máquinas para los procedimientos ópticos Brinell, Vickers y Knoop).
- Es un ensayo no destructivo, la pieza puede ser reutilizada.

### Desventajas

- No siempre es el método más preciso del ensayo de dureza, ya que incluso un pequeño error en la medición de la diferencia de profundidad provoca un gran error en el valor de dureza obtenido.
- El lugar del ensayo debe estar libre de cualquier contaminación (por ejemplo, cascarilla, cuerpos extraños o aceite) para obtener un resultado significativo del ensayo.
- El indentador puede tener efectos no conocidos sobre el resultado del ensayo, por ejemplo, si está desgastado y el cono ya no cumple los requisitos de la norma (especificaciones de la norma: Para minimizar los efectos, utilice únicamente indentadores certificados y calibrados).
- Si aumenta la dureza, los materiales son difíciles de diferenciar.

Para determinar la dureza Rockwell se utilizan dos tipos de indentadores: el cónico-esferoidal de diamante y el de bola (acero o carbono de tungsteno) de varios diámetros

Entre el número de Rockwell y la profundidad de la impronta  $h$  existe la siguiente dependencia:

*Para el cono de diamante:*

$$HR = 100 - \frac{h}{0.002}$$

*Para las bolas de:*

$$HR = 130 - \frac{h}{0.002}$$

Donde:

*h = Profundidad de la impronta (penetración del indentador)*

### **b) Ensayos volumétricos**

Este grupo de ensayos es diseñado para ayudar en la determinación de la sanidad de un metal, o si está libre de imperfecciones. Los ensayos volumétricos son usados rutinariamente para la calificación de procedimientos de soldadura y de soldadores. Después de que una chapa de ensayo haya sido soldada, las probetas son removidas y sometidas al ensayo volumétrico para determinar si el metal de soldadura contiene alguna imperfección o defecto.

Hay tres tipos generales de ensayos destructivos volumétricos:

- Ensayo de dobléz
- Ensayo nick-breck
- Ensayo de desgarre de filete.

### *Ensayo de doblado*

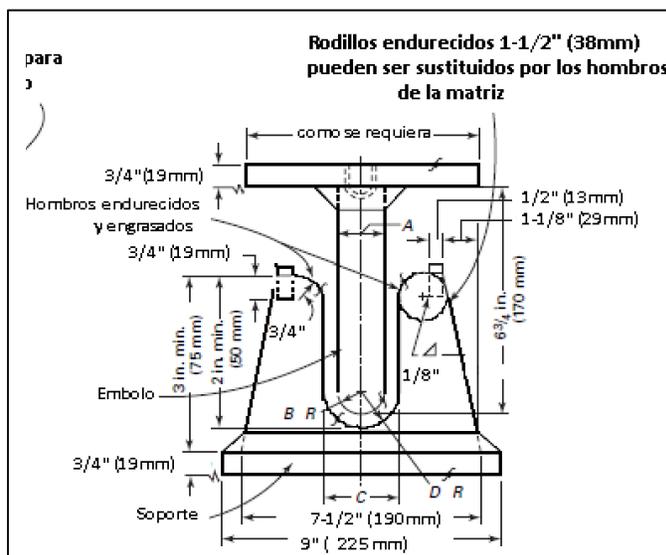
La finalidad de este ensayo es determinar la ductilidad y la calidad del material de la soldadura, se realiza mediante el doblado de la probeta en forma de u, para luego examinar la zona doblada, se utiliza este ensayo para calificar procedimiento, habilidad de soldadores y operadores de máquinas de soldar: Los ensayos de doblado pueden ser: Doble transversal de lado

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

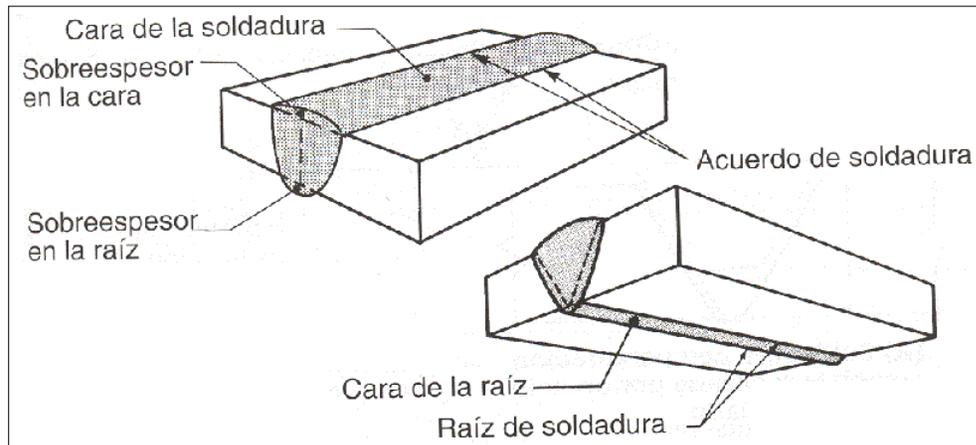
En las figuras 32 y 33, se puede observar el dispositivo para de ensayo de doblado y el doblado de cara y raíz.

### **Figura 32**

*Dispositivo (matriz) para doblado de probetas*



Fuente: ASME Sección IX 2015

**Figura 33***Soldadura en cara y raíz.*

Fuente: ASME Sección IX 2015

La probeta debe ser colocada en el dispositivo estático de la guía, con la soldadura en el centro. Las probetas para doblez de cara deben ser colocadas con la cara de la soldadura directamente hacia la abertura. Las probetas para doblez de raíz, deben ser colocadas con la raíz de la soldadura dirigida hacia la abertura.

El macho debe forzar la probeta dentro de la matriz hasta que la probeta sienta y se forme una U. La soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC), deben estar centradas y ubicadas completamente dentro de la parte doblada de la probeta después del ensayo. Cuando se utilice la guía de enrollado, la probeta debe estar sujeta firmemente en uno de sus extremos, de tal manera que no se deslice durante la operación de doblez. Después del ensayo, la soldadura y la zona afectada por el calor deben estar completamente en la parte doblada de la probeta. Las probetas ensayadas deben quitarse de guía cuando el rodillo se ha retirado y ha sido movido 180° del punto de arranque.

Para cualquiera de estos ensayos de doblado, las probetas deben ser preparadas cuidadosamente para prevenir cualquier imprecisión en el ensayo.

### ***2.12.2. Ensayos no Destructivos***

Son aquellos que no destruyen la pieza o estructura y están orientados a la detección de discontinuidades que vayan a limitar las condiciones de servicio, sirven para determinar la calidad de los materiales. La selección del tipo de ensayo será en función de tipo y origen de la discontinuidad, proceso de manufactura, accesibilidad, nivel de sensibilidad requerido.

Los métodos de END más utilizados para detección de fallas en soldadura son: (Destructivos, A. d. 2009).

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

#### **2.12.2.1. Inspección visual.**

Es el ensayo de mayor aplicación y donde el equipo principal es el ojo humano, es de fácil y rápida aplicación, no requiere equipo especial solo debe poseerse buena visión. En la inspección de soldadura se pueden utilizar galga como instrumento de ayuda, se puede realizar antes durante y después de la soldadura (CESOL 2013, Tema 4.8.1)

Es una técnica que se caracteriza por:

- Facilitar la corrección de defectos que se producen durante el proceso de fabricación, evitando de esta forma su rechazo en las siguientes etapas.
- Siempre debe realizarse, aun si se va a realizar otros ensayos posteriores.
- Identificar materiales que no estén óptimos para el trabajo que se vaya a realizar o incumplan su especificación.
- Reduce la necesidad de ensayos no destructivos posteriormente.

### **Etapas del ensayo**

#### **Inspección previa al soldeo**

- Verificar que los metales base y de aportación cumplen con lo designado en los planos y especificaciones de construcción.
- Medir los materiales para verificar que las longitudes, diámetros anchos y espesores cumplen con los requisitos
- Inspeccionar las superficies para detectar posibles defectos que interfieran en la operación de soldadura.
- Verificar las secciones punteadas para soldadura comprobando que se cumplen las especificaciones relativas a preparación de bordes, dimensiones y acabados superficiales.
- Revisar las especificaciones de los procesos, procedimientos y consumibles

#### Inspección durante el soldeo

- Comprobar el cumplimiento del WPS (parámetros de soldadura).
- Examinar la raíz de soldadura.
- Examinar las capas de soldadura

### Inspección después del soldeo

- Fijar el ajuste dimensional de las soldaduras.
- Establecer la conformidad en el tamaño y en el contorno de los cordones.
- Estipular la aceptabilidad de la apariencia, referida a rugosidad, salpicaduras y limpieza.
- Determinar la presencia de defectos superficiales, como faltas de relleno, mordeduras, solapes, fisuras

19.- J. D. Arias Maldonado y A. E. Guanuchi Chavez, Implementacion de un programa para calificación de inspectores de soldadura, Quito, 2011.

#### **2.12.2.2. Líquidos penetrantes (PT).**

Este tipo de END se utiliza para detectar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales inspeccionados, es uno de los métodos de ensayos no destructivos más ampliamente utilizados para la detección de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. Es casi seguro que el método de END superficial más comúnmente utilizado en la actualidad, ya que se puede aplicar a casi cualquier material magnético o no magnético, los líquidos penetrantes proporcionan a la industria una amplia gama de sensibilidades y técnicas que lo hacen especialmente adaptable a una amplia gama de tamaños y formas.

Es extremadamente útil para los exámenes que se realizan en lugares remotos de campo, ya que es extremadamente portátil. El método es también muy apropiado en un entorno de producción donde muchas piezas pequeñas se pueden procesar en un período de tiempo relativamente corto. En la figura 34 se muestra un kit básico de líquidos penetrantes.

**Figura 34**

*Kit básico de líquidos penetrantes.*



Fuente: Elaboración propia

#### a) Ventajas y Desventajas de los Líquidos Penetrantes.

- **Ventajas de los líquidos penetrantes:**

- ✓ Son utilizados en una gran variedad de materiales.
- ✓ Su empleo es relativamente fácil.
- ✓ Bajo costo respecto a los demás.
- ✓ La geometría de las piezas no representa un problema.
- ✓ Portátiles.
- ✓ Permiten cubrir un área muy grande en poco tiempo.
- ✓ Capacitación en poco tiempo.

- **Desventajas de los líquidos penetrantes:**

- ✓ Limitaciones graves en materiales porosos.
- ✓ Sólo sirve para defectos superficiales.
- ✓ La superficie de trabajo debe estar suficientemente limpia.

- ✓ Acceso directo a la superficie a inspeccionar.
- ✓ Por si mismas no proporcionan un registro permanente.
- ✓ El área de trabajo debe tener una buena ventilación.
- ✓ Depende de factores humanos.
- ✓ Compatibilidad química entre los líquidos y el material.

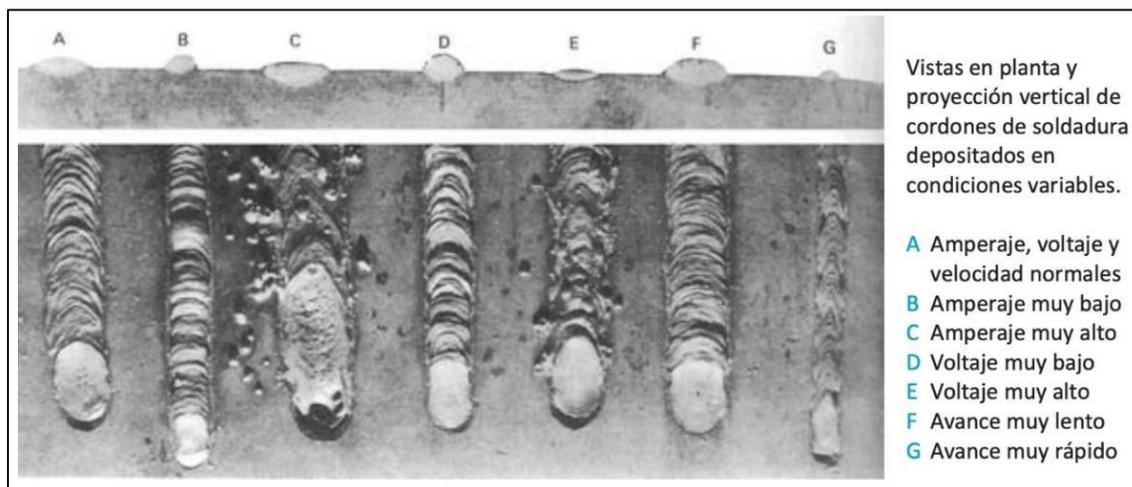
### **2.13. Discontinuidades de la Soldadura**

La discontinuidad es definida por la AWS [36]: como interrupción en la estructura típica de un material tal como una falta de homogeneidad en sus características mecánicas, metalúrgicas o físicas.

El problema general en soldadura es principalmente es que, al estar sometido a varios procesos anteriores o posteriores, diferentes estados físicos de los metales, este al ser sometido a un proceso independientemente de soldadura, por medio de un soldador, este al tener diferentes técnicas para soldar, generan varias discontinuidades, ya sea calificado o no, el principal problema es que siempre por cualquier proceso va a tener discontinuidades presentes, ya sea al inicio del cordón o al finalizarlo.

Dependiendo de esto las discontinuidades podrán ser permisibles o no, de acuerdo con el tipo, tamaño, distribución de estos y las normas a utilizar generan criterios de aceptación y rechazo.

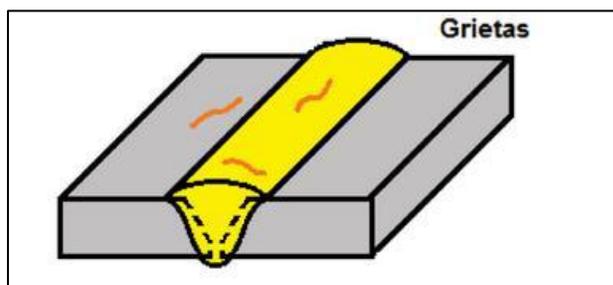
En la figura 35 se apreciar los tipos de discontinuidades de la soldadura más comunes.

**Figura 35***Tipos de discontinuidades*

Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

**a) Agrietamientos (Grietas)**

Una discontinuidad presente en soldadura son las grietas, este tiene diferentes orígenes, pero su definición es sencilla, es la separación entre el material base y el de aporte, o solo en este último caso, en el de aporte, se la puede visualizar unos ejemplos en la figura 36.

**Figura 36***Grietas.*

Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

Los orígenes de las grietas radican en las principales razones:

- Tensiones residuales: Ocasionadas por un calentamiento no uniforme y esto genera un cambio en la microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC). por lo que se producen grietas.
- Gran diferencia de espesores: El espesor genera grietas si las diferencias entre estas son significativas, estas producen un agrietamiento en el sector que se encuentre soldando.
- Absorción de gases ajenos: Por la presencia de otros agentes que se pueden presentar en la soldadura, estos elementos tales como nitrógeno e hidrógeno producen fragilidad en la junta y agrietamientos.

#### **b) Falta de penetración**

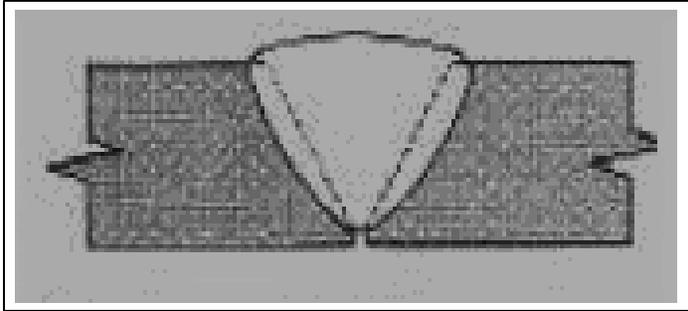
Este problema igual que las grietas son peligrosas en las uniones soldadas y es ocasionado a que el metal de aporte no funde las esquinas de la raíz, esta discontinuidad suele ser externo o interno, esta discontinuidad se muestra en la figura 37.

La falta de penetración es una discontinuidad que no es aceptable en los estándares y se necesita reparación del cordón. Las causas suelen estar atadas a los siguientes parámetros:

- Electrodo muy grueso
- Corriente de soldadura insuficiente para el proceso
- Excesiva velocidad de pasada
- Penetración incorrecta

#### **Figura 37**

*Falta de penetración.*



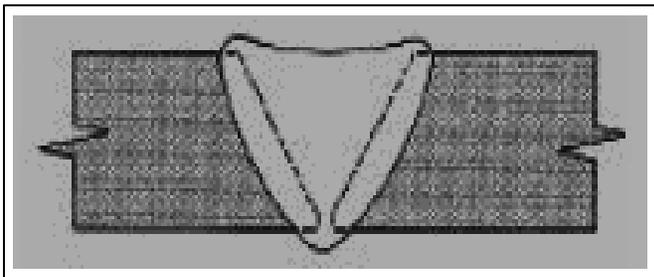
Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

### c) Concavidades

A estas discontinuidades (ver figura 38), se las suele llamar falta de relleno, es una disminución de refuerzo externo, debido al poco depósito de material en el relleno del cordón. Estas suelen generarse de maneras externas e internas.

#### Figura 38

*Concavidades.*

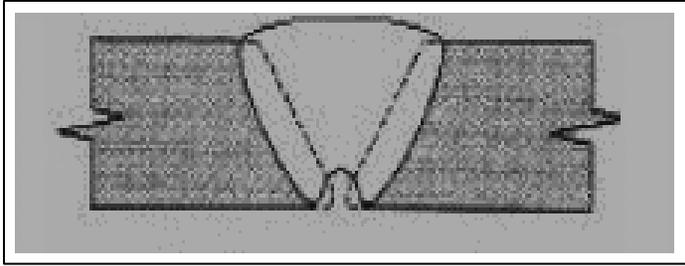


Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

**Concavidad interna:** Discontinuidad originada debido a la primera pasada del material de aporte, se da por el enfriamiento lo que disminuye el espesor en el material base, en la figura 39 se aprecia esta discontinuidad.

#### Figura 39

*Concavidad interna.*



Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

#### d) Socavadura

Las socavadura (ver figura 40), se dan por sobre montas o por ranuras fundidas que se sitúan en el metal base, y no han sido llenadas por el metal apartado. Frecuentemente se ocasionan por arco incorrecto o un arco húmedo.

#### Figura 40

*Socavaduras.*



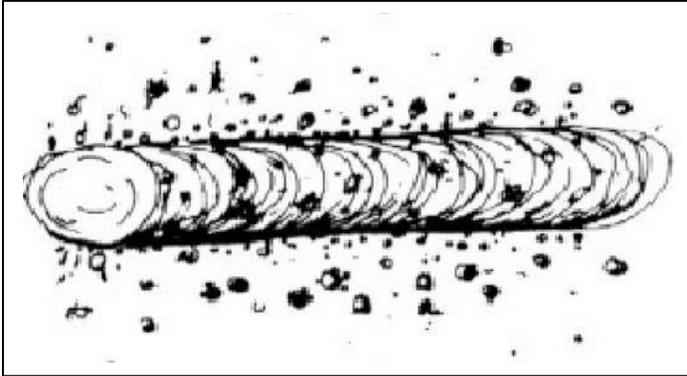
Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

#### e) Salpicadura

Estas son discontinuidades en forma de esferas de metal fundido, se deposita de forma aleatoria sobre el cordón y son provocadas por humedad en el electrodo, o por la incorrecta velocidad de llenado del metal de aporte, tal como se observa en la figura 41.

#### Figura 41

*Salpicadura*



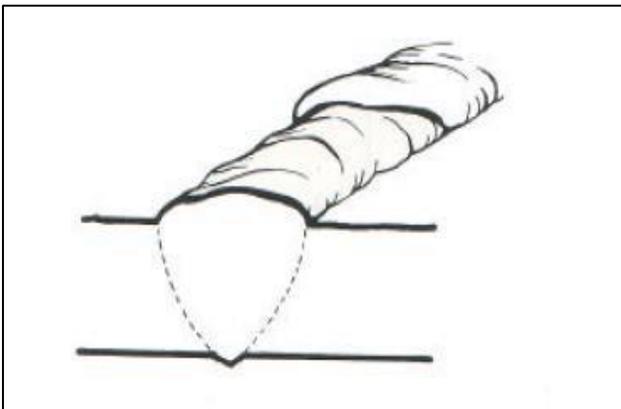
Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

#### f) Falta de continuidad del cordón

Se da por interrumpir el cordón continuo, se da por fallas de fusión transversales, o en ocasiones solo generan surcos y deben ser analizados a fondo para su respectiva aprobación.

#### Figura 42

*Falta de continuidad del cordón.*



Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

#### g) Fisuras

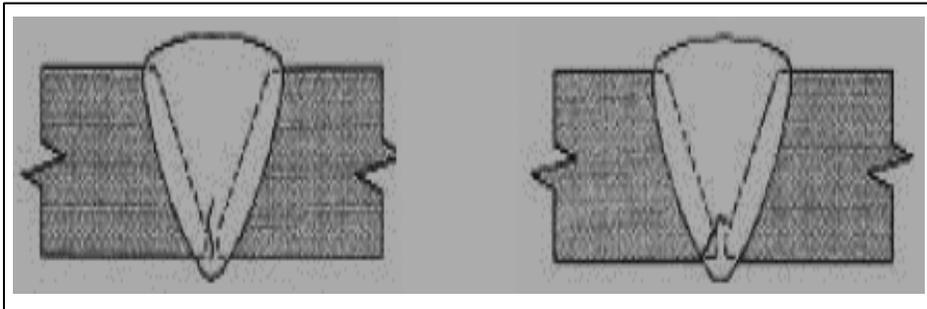
Respecto a las fisuras se clasifican en longitudinales, transversales, calientes y frías, cada una comparten orígenes similares debido movimientos bruscos durante el proceso o después de este, donde se producen las fisuras en el centro del cordón.

- **Fisura longitudinal**

Se dan por enfriamientos bruscos, son bastantes raras, pero se encuentran especialmente en aceros como el AISI 321 y aceros bonificados, en la figura 43 se aprecia esta discontinuidad a fondo.

### Figura 43

*Fisura longitudinal.*



Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

- **Fisura transversal**

Se dan frecuentemente en aceros duros y por la mezcla de elementos externos al enfriarse, y esta discontinuidad puede expandirse hasta el metal base.

#### **h) Fisuras en caliente**

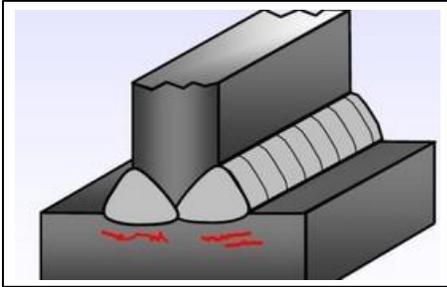
Se da este nombre porque se originan cuando se está solidificando la junta, por lo que suele estar ligada a las impurezas del material base y a elementos como (azufre y fósforo). Se producen en varios metales ferrosos y no ferrosos.

#### **i) Fisuras en frío**

Estas son ocasionadas al estar enfriándose la junta, agentes externos como el hidrógeno tienen contacto con el cordón produciendo estas fisuras (ver figura 44)

### Figura 44

*Fisuras.*



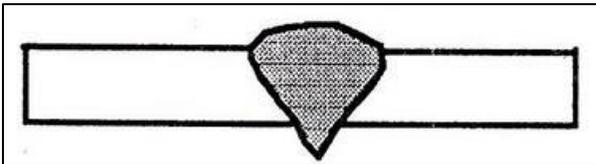
Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

### **j) Descuelgues**

Se presentan en los cordones soldados (ver figura 45), originados principalmente por un exceso de fusión del baño de soldadura.

### **Figura 45**

*Descuelgues.*



Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013).

### **k) Porosidades**

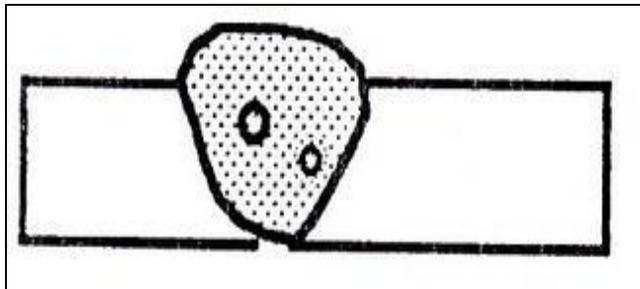
Los poros suelen ser provocadas por las reacciones químicas presentes en el baño de fusión y que dan lugar a la formación de gases.

Esta discontinuidad esta originada por un enfriamiento rápido del cordón, y los gases quedan atrapados sin poder salir, provocando que las burbujas queden solidificadas con el tiempo.

En la figura 46, se observa esta discontinuidad.

### **Figura 46**

*Porosidades.*



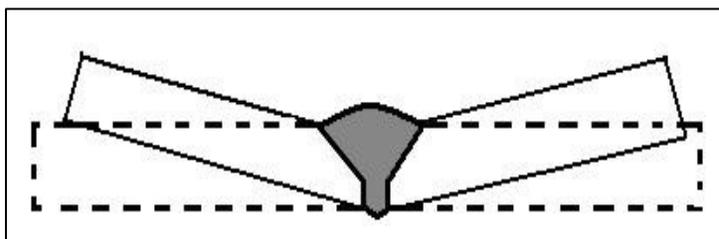
Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013). *Metalurgia de la soldadura*. La Habana: Editorial Universitaria, 2013.

### l) Deformaciones y alabeos

Esta discontinuidad tiene su origen en la presencia de tensiones residuales, que son dados por el aporte de calor durante la ejecución de la soldadura para mantener fluido el baño de fusión, definiéndola es una deformación parcial o total de la junta, que se vuelve un problema al momento de soldar, se pierde la simetría en la distribución del material de aporte, provocando que el ancho del bisel sea disminuido abruptamente. En la figura 47, se observa esta discontinuidad.

### Figura 47

*Deformaciones.*



Fuente: O. H. Rodríguez Pérez, (2013). *Metalurgia de la soldadura*. La Habana: Editorial Universitaria, 2013.

## CAPITULO III

### METODO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Maquinaria y Equipos

##### a) Fuente de poder

Para la soldadura de las probetas, se utilizó la fuente de poder que se muestra en la figura 48.

**Figura 48**

*Fuente de poder*



Nota: Elaboración propia

Las características de la fuente de poder se detallan en la tabla 14:

**Tabla 14**

*Características de la fuente de poder.*

Características	
Marca	Crown
Modelo	CT 33123
Voltaje de entrada nominal	220 V.
Frecuencia nominal	50/60 Hz
Capacidad nominal de entrada (TIG/SMAW)	7 KVA / 8.2 KVA
Voltaje de salida nominal (TIG/SMAW)	10.8 – 18.0 V/ 20.6 – 26.4 V
Voltaje sin carga	95 V
Diámetro de aguja de tungsteno (TIG)	0.5 – 3.2 mm
Min. Espesor de material base (TIG)	0.5 mm
Ciclo de trabajo nominal (TIG/SMAW)	150 A 100%/110 A al 100%
Peso	7.2 kg

Fuente: <https://ferretec.pe/products/maquina-de-soldar-inversora-crown-250amp-tig>

## b) Durómetro

El durómetro utilizado, es un equipo que mide la dureza de los materiales, existiendo varios procedimientos para efectuar esta medición. Métodos de dureza que mide son: Rockwell, Brinell y Vickers

En la figura 49 se observa el equipo. Para el cálculo de la dureza se utilizó la escala Brinell.

### Figura 49

*Durómetro.*



Nota: Elaboración propia

Las características de este equipo son:

- Escalas: HRB, HRC
- Precarga: 10 kgf
- Cargas de ensayo: 60 kgf, 100kgf, 150 kgf..
- Ciclo de ensayo: Manual
- Muestra: Altura máxima: 175 mm

Distancia al centro: 165 mm (desde el centro del penetrador)

- Acceso a muestra: Superficies exteriores.

Superficies cilíndricas a partir de  $\text{Ø}3\text{mm}$

**c) Equipo de ensayo de doblez.**

Este equipo pertenece al taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. En la figura 50 se puede observar el equipo de ensayo de doblez, cuya presión de trabajo es de 20 toneladas.

**Figura 50**

*Equipo de doblez.*



Nota: Elaboración propia

**3.2. Material de Ensayo**

El material base utilizado en la presente investigación fue acero avanzado de alta resistencia (AHSS - Advanced High strength Steels) del tipo martensítico, denominado Mart 1250/1520, obtenidas del sistema de suspensión de un automóvil (ver figura 51). Las características mecánicas y la composición química del acero se muestran en las tablas 16 y 17 respectivamente.

**Tabla 15***Características mecánicas del acero Mart 1250/1520.*

Grado de acero	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Elongación (%)
Mart 1250/1520	1250	1520	4-6

Fuente: [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB\\_UMICH/5184/1/IIMM-M-2013-0493.pdf](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/5184/1/IIMM-M-2013-0493.pdf)**Tabla 16***Composición química del acero Mart 1250/1520*

Elemento	C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	W
%	0.19	0.004	0.49	0.004	0.24	0.03	0.018	0.04	0.019	0.004	0.002	0.046	0.002

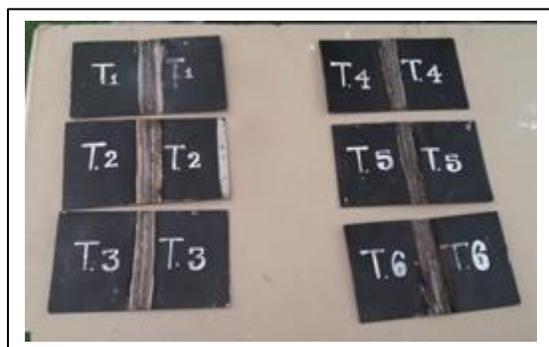
Fuente: [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB\\_UMICH/5184/1/IIMM-M-2013-0493.pdf](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/5184/1/IIMM-M-2013-0493.pdf)

### 3.2.1. Características y Codificación de las Probetas para Investigación

Las probetas tienen las siguientes medidas:

- Ancho: 150 mm
- Longitud : 200 mm
- Espesor : 2.00 mm

Para un mejor estudio, las probetas se codificaron de la forma como se muestra en la figura 51.

**Figura 51***Probetas codificadas.*

Nota: Elaboración propia

### 3.3. Consumibles

#### 3.3.1. Material de Aporte ER70S-6

Para la soldadura de las probetas, se usó la varilla ER70S-6, cuyo depósito es un acero al carbono con mediano contenido de manganeso y silicio, presenta buena soldabilidad proporcionando un charco limpio con buena visibilidad, su depósito es libre de poros y fisuras, ideal para soldar desde el pase de raíz en toda posición. Sus propiedades mecánicas se muestran en la tabla 17, y su composición química del depósito en la tabla 18.

**Tabla 17**

*Propiedades mecánicas.*

Tratamiento térmico	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Elongación en 2" (%)	Energía absorbida ISO-V(J)
Sin tratamiento	500-600	➤ 420	> 22	> 80

Fuente: (Soldexa, 2021)

**Tabla 18**

*Análisis químico del metal depositado (valores típicos) (%).*

C	Mn	Si	P	S
0.06-0.12	1.40-11.60	0.8-1.15	Max. 0.025	Max. 0.025

Fuente: (Soldexa, 2021)

En el anexo 1, se muestra la ficha técnica.

Aplicaciones:

Para la soldabilidad de:

✓ Aceros estructurales: St 33, St 37-2 a St 52-3, St 50-2\*, St 60-2\*, DIN 17 100.

- ✓ Acero de calderería: HI, HII, 17Mn4, 19 Mn5\*, DIN 17155, St 37.0 a St 52.0, DIN 1628/1630; St 35.8,
- ✓ St 45.8, DIN 17175; St 55\*, St 55.4\*, DIN 1629, StE 210.7 a StE 360.7, DIN 17172
- ✓ Aceros de la serie API X 42, X 46, API-STANDARD.
- ✓ Aceros de grano fino: StE 255 a StE 355, DIN 17102, WstE 255 a WstE 355, TstE 255 a TstE 355

### **3.3.2. Argón**

Para la unión por soldadura de las probetas, se utilizó 100% argón empleando un caudal de 12 litros/min en la soldadura de todos de los cordones de soldadura.

El argón es el más abundante de los gases raros del aire (0,9% en vol.). Es incoloro, inodoro y sin sabor. Es un gas no tóxico, no inflamable, un 30% más pesado que el aire. Es inerte, tiene una perfecta estabilidad física y química, a cualquier temperatura y presión. Excelente conductor de electricidad. A presión atmosférica y temperatura inferior a  $-186^{\circ}\text{C}$  es un líquido incoloro, más pesado que el agua.

Fuente: MANUAL GASES ok ([indura.com.ar](http://indura.com.ar))

### **3.4. Ejecución de la Soldadura de las Probetas**

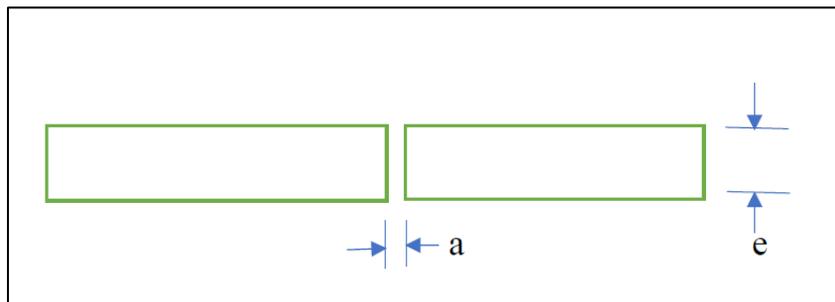
Para la experimentación se utilizaron seis (06) probetas de acero Mart 1250/1520 con dimensiones de 150 x 200 X 2.00 mm.

#### **a) Preparación de las juntas**

Las probetas se soldaron con una junta a tope con bordes rectos, tal como se aprecia en la figura 52, sus características se observan en la tabla 19

**Figura 52**

*Junta a tope con bordes rectos.*



Nota: Elaboración propia

**Tabla 19**

*Detalle de la junta a tope con bordes rectos.*

Símbolo	Descripción	Probeta de experimentación
a	Abertura o luz de la raíz	1.0 mm
e	Espesor nominal del material base o de la probeta.	2.0 mm

### **b) Limpieza de las probetas**

Previo a la soldadura, las probetas deben estar exentas de todo elemento contaminante, tales como grasa, pintura, etc. Para el presente trabajo, las probetas se limpiaron utilizando un disolvente .

### **c) Procedimiento de soldadura**

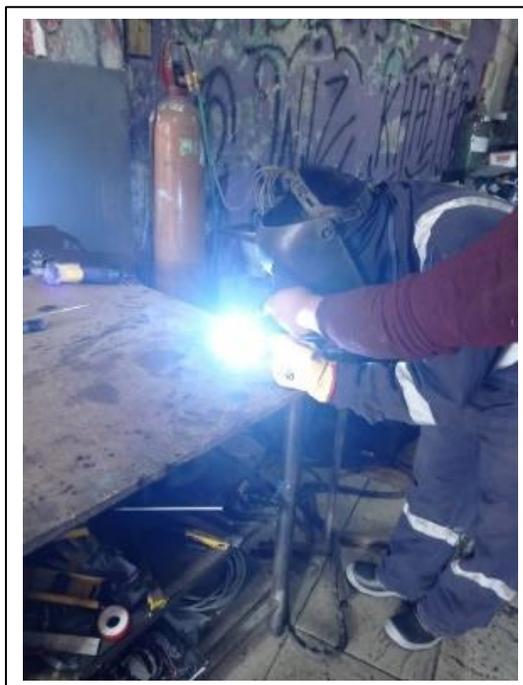
Se soldaron seis (06) probetas, con los parámetros que se muestran en la tabla 20.

**Tabla 20***Parámetros de soldabilidad.*

Probeta	Numero de pasada	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Electrodo			Gas de protección		
				Tipo	Diámetro (pulg)	Material de aporte	Tipo	Caudal (lt/min)	Veloc. De soldeo (mm/s)
T-1	Un pase	30	13	EWTh-1	3/32"	ER70S-6	Argón	12	3
T-2	Un pase	40	13	EWTh-1	3/32"	ER70S-6	Argón	12	3
T-3	Un pase	50	13	EWTh-1	3/32"	ER70S-6	Argón	12	3
T-4	Un pase	60	14	EWTh-1	3/32"	ER70S-6	Argón	12	3
T-5	Un pase	70	14	EWTh-1	3/32"	ER70S-6	Argón	12	3
T-6	Un pase	80	14	EWTh-1	3/32"	ER70S-6	Argón	12	3

Nota: Elaboración propia

En la figura 53, se visualiza el soldeo de una de las probetas.

**Figura 53***Soldadura de las probetas*

Nota: Elaboración propia

### 3.5. Cálculo del Calor Aportado

Se calculó haciendo uso de la ecuación 1.

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

Reemplazando los valores de la tabla 22 en la ecuación 1, se obtiene los resultados siguientes:

- Probeta T-1:

$$H_{net} = \frac{30 \times 13}{3.0} \times 0.35 = 45.5 \text{ J/mm}$$

- Probeta T-2:

$$H_{net} = \frac{40 \times 13}{3.0} \times 0.35 = 60.6 \frac{J}{mm}$$

- Probeta T-3:

$$H_{net} = \frac{50 \times 13}{3.0} \times 0.35 = 75.8 \text{ J/mm}$$

- Probeta T-4:

$$H_{net} = \frac{60 \times 14}{3.0} \times 0.35 = 98.0 \text{ J/mm}$$

- Probeta T-5:

$$H_{net} = \frac{70 \times 14}{3.0} \times 0.35 = 114.33 \text{ J/mm}$$

- Probeta T-6:

$$H_{net} = \frac{80 \times 14}{3.0} \times 0.35 = 130.6 \text{ J/mm}$$

### 3.6. Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor

Para saber la influencia del calor aportado en la microestructura del metal base, se calcula el ancho de la zona afectada por medio de la ecuación 2. Para las condiciones del trabajo experimental se tomaron los siguientes valores:

- ✓  $T_0 = 15^\circ\text{C}$
- ✓  $T_{\text{fusión}} = 1400^\circ\text{C}$
- ✓  $\rho = 0.0785 \text{ gr/mm}^3$
- ✓  $C = 0.023 \text{ J/gr-}^\circ\text{C}$
- ✓  $\rho.C = 0.001747 \text{ j/mm}^3\text{-}^\circ\text{C}$ . (Fosca. C. 2007)
- ✓  $t$  (espesor) = 2.0 mm
- ✓  $T_{\text{max}} = 723^\circ\text{C}$ .
- ✓  $K$  = Conductividad térmica del acero (0.052 J/mm-seg- $^\circ\text{C}$ )

- Probeta T-1:

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 15} \right) - \left( \frac{1}{1400 - 15} \right) \right] \times \left[ \frac{45.5}{4,13 \times 0.001747 \times 2.0} \right] = 2.8 \text{ mm}$$

- Probeta T-2:

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 15} \right) - \left( \frac{1}{1400 - 15} \right) \right] \times \left[ \frac{60.6}{4,13 \times 0.001747 \times 2.0} \right] = 2.9 \text{ mm}$$

- Probeta T-3:

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 15} \right) - \left( \frac{1}{1400 - 15} \right) \right] \times \left[ \frac{75.8}{4,13 \times 0.001747 \times 2.0} \right] = 3.62 \text{ mm}$$

- Probeta T-4:

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 15} \right) - \left( \frac{1}{1400 - 15} \right) \right] \times \left[ \frac{98.0}{4,13 \times 0.001747 \times 2.0} \right] = 4.68 \text{ mm}$$

- Probeta T-5:

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 15} \right) - \left( \frac{1}{1400 - 15} \right) \right] \times \left[ \frac{114.33}{4,13 \times 0.001747 \times 2.0} \right] = 5.47 \text{ mm}$$

- Probeta T-6

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 15} \right) - \left( \frac{1}{1400 - 15} \right) \right] \times \left[ \frac{130.6}{4,13 \times 0.001747 \times 2.0} \right] = 6.24 \text{ mm}$$

### 3.7. Control de Calidad de las probetas

#### 3.7.1. Inspección Visual de los Cupones

El ensayo de inspección visual permite la detección de discontinuidades que afectan a la superficie del depósito.

En la tabla 21 se detallan los resultados del examen visual.

**Tabla 21***Examen visual.*

N° de Probeta	Defecto	Causa
T-1	Falta de penetración	Intensidad de corriente baja.
T-2	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja, alta velocidad de soldeo
T-3	Deposito Correcto	Intensidad de corriente aceptable, velocidad de soldeo y ángulo de soldeo ideales.
T-4	Deposito aceptable	Intensidad de corriente aceptable, velocidad de soldeo y ángulo de soldeo ideales.
T-5	Socavaduras	Intensidad de corriente muy alta
T-6	Socavaduras	Intensidad de corriente muy alta.

Nota: Elaboración propia

**3.7.2. Inspección con Tintes Penetrantes**

En la figura 54, se observa el kit de tintes penetrantes, utilizado para la prueba. Las características de los tintes son:

Marca : Ambro-sol, Presentación: 400 ml, Origen : Italia.

**Figura 54***Kit de tintes penetrantes.*

Nota: Elaboración propia

Para la realización de esta prueba se siguió el siguiente procedimiento:

### *1. Limpieza de la superficie*

Generalmente la zona de la soldadura esta contaminada por impurezas, tales como grasa, polvo, escoria.

Se realizo la limpieza de forma mecánica y química de la superficie o el área a inspeccionar. La limpieza mecánica se realizó con una escobilla de acero inoxidable y la limpieza química con un paño humedecido con el disolvente thinner. Posterior mente se limpió la zona para mantener seco. En la figura 55, se muestra la limpieza de las probetas.

### **Figura 55**

*Limpieza de las probetas.*



Nota: Elaboración propia

### *2. Aplicación del tinte penetrante.*

Una vez verificado que el cordón de soldadura este limpio, se procede a la aplicación del tinte penetrante. Para tal efecto se mantuvo una distancia de 30 cm entre la superficie y la boquilla del envase del penetrante. El rociado del tinte se realizó en forma paralela y uniforme a lo largo de la zona a inspeccionar. En la figura 56 se observa el rociado del penetrante sobre las probetas.

**Figura 56**

*Recubrimiento de las probetas con el penetrante.*



Nota: Elaboración propia

*3. Remoción del exceso de tinte penetrante.*

Se dejó actuar al líquido penetrante durante 10 minutos, posterior a este lapso de tiempo, se retira con un paño limpio y humedecido con alcohol el exceso del líquido penetrante que no ha penetrado en las discontinuidades.

*4. Aplicación del tinte revelador.*

En la figura 57, se observa la aplicación uniforme de una capa fina sobre el área a inspeccionar; manteniendo una distancia aproximada entre unos 20 cm a 30 cm, entre el envase del revelador y el cordón de soldadura a prueba. Se deja actuar durante 15 minutos para que se revelen las discontinuidades en el área inspeccionada.

**Figura 57**

*Aplicación del revelador.*



Nota: Elaboración propia

*5. Visualización del tinte revelador.*

El tinte revelador debe permanecer sobre la superficie de la muestra durante 15 minutos para permitir la extracción del penetrante hacia fuera de cualquier tipo de discontinuidad superficial.

*6. Limpieza de la probeta.*

La operación final de este proceso, es realizar una limpieza general de las probetas de aceros avanzados de alta resistencia del tipo martensítico.

*7. Inspección e interpretación.*

Los resultados se muestran en la tabla 22

**Tabla 22**

*Visualización del examen por tintes penetrantes.*

Probeta	Observaciones	Defectos
T-1	Presenta discontinuidad.	Falta de fusión
T-2	Presenta discontinuidad.	Falta de fusión
T-3	No presenta discontinuidad	Ninguna
T-4	No presenta discontinuidad.	Ninguna
T-5	Presenta discontinuidad	Socavadura
T-6	Presenta discontinuidad	Socavadura

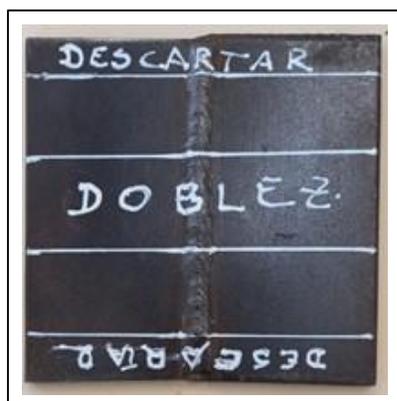
Nota: Elaboración propia

### 3.7.3. *Ensayo de Doblado Guiado de Cara y Raíz*

Previo a la prueba de doblez, se prepara la probeta para la prueba, estas fueron cortadas por plasma y los cordones deben estar nivelados con la superficie de la probeta, estas superficies deben estar lisas y cualquier raya que hubiera debe ser ligera y estar transversal a la dobladura. En la figura 58, se muestra la distribución de los especímenes para la prueba de doblez.

#### **Figura 58**

*Selección de la probeta para la prueba de doblez.*



Nota: Elaboración propia

En la prueba de doblado, la probeta se apoya sobre dos puntos normalmente ubicados en sus extremos, mientras que un tercer apoyo (llamado punzón) ejerce la fuerza hacia arriba para provocar el doblado en la parte central de la probeta hasta doblar un ángulo de 180°. Las probetas

para doblado de cara deben ser colocados con la cara de la soldadura directamente hacia la garganta y las probetas para doblado de raíz deben ser colocados con la raíz hacia la garganta. Esta operación se observa en la figura 59

### Figura 59

*Aplicación de carga en la parte central de la probeta.*



Nota: Elaboración propia

En la tabla 23 se detallan los resultados de la prueba de doblez (cara y raíz):

### Tabla 23

*Ensayo de doblez*

Probeta	Doblado		Discontinuidad o defecto.
	Cara	Raíz	
T-1	X		Presenta
T-1		X	Presenta
T-2	X		No presenta
T-2		X	Presenta
T-3	X		No presenta
T-3		X	No presenta
T-4	X		No presenta
T-4		X	No presenta
T-5	X		Presenta
T-5		X	Presenta
T-6	X		Presenta
T-6		X	Presenta

Nota: Elaboración propia

### 3.7.4. Ensayo de Dureza

En la tabla 24, se detallan las mediciones de altura hechas por el indentador.

**Tabla 24**

*Altura de la penetración del indentador.*

Probeta	MB	ZAC	DS	ZAC	MB
T-1	0.21	0.200	0.185	0.200	0.21
T-2	0.21	0.201	0.185	0.201	0.21
T-3	0.21	0.201	0.185	0.200	0.21
T-4	0.21	0.200	0.185	0.200	0.21
T-5	0.21	0.200	0.185	0.201	0.21
T-6	0.21	0.200	0.185	0.200	0.21

Nota: Elaboración propia

MB: Metal Base; ZAC: Zona afectada por el calor; DS: Deposito de soldadura.

Los valores mostrados en la tabla 23 se reemplazan en la ecuación 3.6, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 25.

**Tabla 25**

*Valores calculados de Dureza (Rockwell C).*

Probeta	MB	ZAC	DS	ZAC	MB
T-1	25.0	30.00	37.5	30.0	25.0
T-2	25.0	29.5	30.5	29.50	25.0
T-3	25.0	29.50	30.5	30.00	25.0
T-4	25.0	30.00	30.5	30.00	25.0
T-5	25.0	30.00	30.5	29.50	25.0
T-6	25.0	30.00	30.5	30.00	25.0

Nota: Elaboración propia

En la tabla 26 se muestra las durezas promedio de las probetas mencionadas.

**Tabla 26**

*Durezas promedio.*

MB	ZAC	DS	ZAC	MB
25.00	29.83	30.5	29.83	25.00

Nota: Elaboración propia

### 3.8. Resultados y Análisis

#### 3.8.1. Inspección Visual de los Cupones

**Tabla 27**

*Resultados de la inspección visual.*

N° de Probeta	Defecto	Causa
T-1	Fusión incompleta	Intensidad de corriente baja.
T-2	Penetración incompleta	Intensidad de corriente baja, alta velocidad de soldeo
T-3	Deposito Correcto	Intensidad de corriente aceptable, velocidad de soldeo y ángulo de soldeo ideales.
T-4	Deposito aceptable	Intensidad de corriente aceptable, velocidad de soldeo y ángulo de soldeo ideales.
T-5	Socavaduras	Intensidad de corriente muy alta.
T-6	Socavaduras	Intensidad de corriente muy alta.

Nota: Elaboración propia

La causa de la probeta T-1, fue que fallo la penetración del arco, porque no se ha producido la fusión entre los bordes de la probeta ya que la intensidad de corriente es baja; respecto a la probeta T-2, la causa principal fue porque la cara de la raíz de la ranura no alcanzó la temperatura de fusión en toda su profundidad ya que la intensidad de corriente es baja y la velocidad de soldeo es alta; las probetas T-3 y T-4, no presentaron ninguna discontinuidad por lo que sus depósitos son aceptables esto debido a que la intensidad de corriente es aceptable, la velocidad y ángulo de soldeo son los ideales, mientras la probeta T-5 y T-6 presenta Socavaduras, esto se debió a que el soldador aplicó una técnica inadecuada e intensidad de corriente muy alta a lo requerida.

### 3.8.2. Inspección con Tintes Penetrantes

**Tabla 28**

*Resultados del ensayo por tintes penetrantes*

Probeta	Observaciones	Defectos
T-1	Presenta discontinuidad.	Fusión incompleta
T-2	Presenta discontinuidad.	Penetración incompleta
T-3	No presenta discontinuidad	Ninguna
T-4	No presenta discontinuidad.	Ninguna
T-5	Presenta discontinuidad	Socavadura
T-6	Presenta discontinuidad	Socavadura

Nota: Elaboración propia

Por medio de este ensayo se puede determinar la presencia de grietas, fisuras, poros. En las probetas T-1 y T2, se observó la presencia de poros, producto de la mala ejecución del cordón de soldadura, fusión y penetración incompleta. En las probetas T-3, T-4, no se observaron ninguna discontinuidad. En la probeta T-5 Y T-6 se observó Socavaduras, por lo que se desechó estas probetas.

### 3.8.3. Ensayo de Doblado Guiado de Cara y Raíz

**Tabla 29**

*Resultados del ensayo de doblado.*

Probeta	Doblado		Calificación	
	Cara	Raíz	Cumple	No cumple
T-1	X			X
T-1		X		X
T-2	X			X
T-2		X		X
T-3	X		X	
T-3		X	X	
T-4	X		X	
T-4		X	X	
T-5	X			X
T-5		X		X
T-6	X			X
T-6		X		X

Nota: Elaboración propia

Las probetas T-1 y T-2, no superaron la prueba de dobléz, dado que estas inicialmente no tenían la fusión completa de las probetas a soldar. Las probetas T-3 y T-4, si dieron buenos resultados a la prueba, determinándose que presentan buena ductilidad. Las probetas T-5 y T-6 no superaron la prueba de dobléz.

#### **3.8.4. Ensayo de Dureza**

La dureza del acero se determinó con el promedio de las lecturas registradas de cada muestra, los resultados se muestran en la tabla 19.

**Tabla 30**

*Resultados promedio del ensayo de dureza.*

MB	ZAC	DS	ZAC	MB
25.00	29.83	30.5	29.83	25.00

Nota: Elaboración propia

Los resultados de dureza obtenida en los aceros, mostraron una mayor dureza en la zona del depósito, esto se debe al rápido enfriamiento de esa zona, lo cual genera un porcentaje mayor de fase martensítica, lo cual incrementa la dureza y por ende la resistencia del material. La martensita se forma por la deformación de la red cristalina de la austenita sin producir alguna difusión de átomos, debido a que la austenita – durante la soldadura\_ se calienta y enfría rápidamente por lo que no existe tiempo para que se produzca alguna difusión.

## CONCLUSIONES

**Primera.** La intensidad de corriente tiene efecto en la soldabilidad de los aceros AHSS del tipo martensítico por el proceso TIG, por el cual son susceptibles al cambio de su microestructura, lo que conlleva también al cambio de propiedades mecánicas, este cambio se produce por la intensidad de corriente. Debido a las rápidas velocidades de enfriamiento (CR) típicas de la soldadura, es normal ver microestructuras de martensita y/o bainita en el metal de soldadura y en la zona afectada por el calor (ZAC), esto implica un aumento de la dureza de la zona afectada por el calor y del depósito.

**Segundo.** El tipo de corriente influye en la calidad del depósito, con corriente continua directa DCEN se consiguen mejores calidades de depósito.

**Tercero.** La intensidad de corriente influye en el depósito de soldadura y la zona afectada por el calor ZAC, por ende, con intensidades de corriente de 50 A Y 60 A se ha conseguido depósitos sin defectos.

**Tercero.** La velocidad de soldeo, también influye en el depósito de soldadura, se ha determinado que con una velocidad de 3 mm/s, se ha conseguido depósitos sin discontinuidades.

## RECOMENDACIONES

**Primero.** Se recomienda seguir investigando la soldabilidad de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), por presentar características físicas únicas por lo que algunos desafíos para los procesos de soldadura y unión.

**Segundo.** Los AHSS se diferencian de los aceros dulces por su composición química y microestructura, y es importante tener en cuenta que sus microestructuras cambiarán con las operaciones de soldadura, por lo que se recomienda, por lo que es importante un estudio más profundo de la soldabilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- A.Garcia, A. J. (2010). Estudio tribologico de aceros austeniticos tipo hadfield, influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste. *Metalurgia*, 46, 47-52. Obtenido de [https://www.academia.edu/11560942/Estudio\\_tribol%C3%B3gico\\_de\\_aceros\\_austen%C3%ADticos\\_tipo\\_Hadfield\\_influencia\\_del\\_manganeso\\_en\\_su\\_respuesta\\_frente\\_al\\_desgaste](https://www.academia.edu/11560942/Estudio_tribol%C3%B3gico_de_aceros_austen%C3%ADticos_tipo_Hadfield_influencia_del_manganeso_en_su_respuesta_frente_al_desgaste)
- Alonso, C. (2012). *Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto*. . Cano Pina Ceysa.
- American Welding Society RI. (26 de Agosto de 2009). *Manual de Soldadura*. Obtenido de pdfcoffee.com: <https://pdfcoffee.com/manual-de-soldadura-vol-1-aws-pdf-free.html>
- ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys*. <https://tajhizkala.ir/doc/ASM/ASM%20Handbook%20Vol%201.pdf>.
- ASTM International. (16 de Agosto de 2017). *Métodos de prueba estándar para dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell de materiales metálicos*. Obtenido de [www.astm.org](https://www.astm.org/e0018-03.html): <https://www.astm.org/e0018-03.html>
- BF Mexico. (14 de 02 de 2022). *Cedulacion de parmetros para soldadura*. Obtenido de <https://bfmx.com/soldadura/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/>
- Bravo Calvo, E. F. (27 de Enero de 2022). *Imperfecciones En Soldadura Y Tipos De Discontinuidades Introducción*. Obtenido de [www.academia.edu](https://www.academia.edu/33510097/Imperfecciones_En_Soldadura_Y_Tipos_De_Discontinuidades_Introducci%C3%93n): [https://www.academia.edu/33510097/Imperfecciones\\_En\\_Soldadura\\_Y\\_Tipos\\_De\\_Discontinuidades\\_Introducci%C3%93n](https://www.academia.edu/33510097/Imperfecciones_En_Soldadura_Y_Tipos_De_Discontinuidades_Introducci%C3%93n)
- Chambi Paucar, H. G. (2014). Análisis De La Recuperación Del Pestillo De Compuerta De Cucharón De Pala Mecánica 3800-4100 Por Proceso De Soldadura Smaw. *Tesis Pregrado*. Universidadnacionaldesanagustín De Arequipa, Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2645/IMchpahg.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Contreras, R. F. (2018). “ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD ENTRE MATERIALES DISÍMILES A6061-T6/ACERO DP900 GALVANIZADO, UNIDOS POR EL PROCESO CMT”. “ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD ENTRE MATERIALES DISÍMILES A6061-T6/ACERO DP900 GALVANIZADO, UNIDOS POR EL PROCESO CMT”. CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES, Mexico.
- Delgado, L. C. (2018). Obtenido de [repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9003/IMabdelc](http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9003/IMabdelc).
- Destructivos, A. D. (2009). *Ensayos no destructivos- Líquidos penetrantes*. Madrid.

- Díaz del Castillo R., F. (2009). *NUEVOS ACEROS PARA LA INDUSTRIA ACEROS PARA LA INDUSTRIA ACEROS PARA LA INDUSTRIA ACEROS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ AUTOMOTRIZ AUTOMOTRIZ AUTOMOTRIZ*. Obtenido de [www.academia.edu](http://www.academia.edu): <https://www.academia.edu/36448122>
- Dinda, S., & Díaz, R. (1995). *The partnership for a new generation of vehicles (PNGV)*. Proc. IBEC 95, Advanced Technologies and Processes, IBEC, Ltd., 5.
- Echevarria, R. (2002). *Defectologia*. Universidad Nacional de Comahue, Santiago de Chile, Chile.
- Ecuador Documents. (2020). *Introducción A La Metalurgia De La Soldadura*. Obtenido de [fdocuments.ec](http://fdocuments.ec): <https://fdocuments.ec/document/introduccion-a-la-metalurgia-de-la-soldadura-56645fa627950.html?page=17>
- Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía. (2011). Ensayos Destructivos Metalúrgicos. *Revista digital para profesionales de la enseñanza.*, 1-14. Obtenido de <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8427.pdf>
- Felix Contreras, R. (s.f.). Estudio de la soldabilidad entre materiales disimiles 6061-T6/Acero DP900 galvanizado, unidos por el proceso CMT. *Estudio de la soldabilidad entre materiales disimiles 6061-T6/Acero DP900 galvanizado, unidos por el proceso CMT*. Corporacion Mexicana de investigacion de materiales, Mexico.
- Fosca, C. (2007). *Introducción a la metalurgia de la soldadura*. Lima: <https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadura-Carlos-Fosca-pdf>.
- Gould, J. E., Lehman, L. E., & Holmes, S. (1996). 'A design of experiments evaluation of factors affecting the resistance spot weldability of high-strength steels'. Proc. Sheet Metal Welding Conference VII, AWS Detroit Section.
- Hall, v. A. (1991). *Macroscopic aspects of Lüders band deformation in mild steel*.
- Higuera, O. F., Tristancho, J. L., & Florez, L. C. (2007). Fundamentos teóricos de los aceros auténicos al manganeso (aceros hadfield). *Scientia Et Technica*, 13(34), 231-236. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84934039.pdf>
- Ingemecánica. (12 de Octubre de 2022). *Medición de la Dureza de los Materiales*. Obtenido de [ingemecanica.com](http://ingemecanica.com): [https://ingemecanica.com/tutoriales/tabla\\_dureza.html](https://ingemecanica.com/tutoriales/tabla_dureza.html)
- Jeffus, L. (1 de Julio de 2009 ). *Soldadura. Principios y aplicaciones*. Obtenido de [books.google.com.pe](http://books.google.com.pe): [https://books.google.com.pe/books/about/Soldadura\\_Principios\\_y\\_aplicaciones.html?id=rHynAxzh0iEC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Soldadura_Principios_y_aplicaciones.html?id=rHynAxzh0iEC&redir_esc=y)
- Joaquin M. Piccini, H. G. (2008). *Efecto del procedimiento de soldadura plasma sobre las propiedades mecanicas de un acero DP700*. Argentina.

- José Balbino león\*, C. R. (2011). *Soldadura de un acero API 5l por medio del proceso de soldadura GMAW-pulsado*. Caracas.
- Labrador, B. (15 de 02 de 2022). *STARGAS*. Obtenido de <https://www.stargas.com.ve/blog/proceso-de-soldadura-por-arco-electrico-con-electrodo-revestido-smaw/>
- Lincoln Electric. (2013). *Soldeo manual con electrodos revestidos*. Lincoln Electric. Obtenido de [https://www.academia.edu/7303830/Manual\\_Lincol\\_Electrodos](https://www.academia.edu/7303830/Manual_Lincol_Electrodos)
- Lopez Cortes, V. H. (2009). *SOLDABILIDAD DE ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA AHSS TIPO MARTENSITICOS MEDIANTE SOLDADURA DE PUNTOS POR RESISTENCIA RSW EN COMPONENTES AUTOMOTRICES*. CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES, Mexico.
- Luna Tejada, R. A. (Peru). Evaluacion del procedimiento de soldadura de la union disimil entre aceros API 5L X70 PSL1 Y ASTM A707 L5F65. *Evaluacion del procedimiento de soldadura de la union disimil entre aceros API 5L X70 PSL1 Y ASTM A707 L5F65*. Pontificia Universidad Catolica del Peru, Lima.
- Marcos, C. A. (2015). *Manual de prácticas de soldadura*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Masabanda Santos, S. J., & yauripoma Guacho, M. R. (2009). *Elaboración de un manual para prácticas de la materia teoría de procesos de soldadura*. Escuela Politécnica Nacional, Quito. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1492/1/CD-2174.pdf>
- Miura, K., Takagi, S., Hira, T., Furukimi, O., & Tanimura, S. (23 de Febrero de 1998). High Strain Rate Deformation of High Strength Sheet Steels for Automotive Parts. *International Congress & Exposition, 107(5)*, pág. 9. doi:<https://doi.org/10.4271/980952>
- O. Brien, R. L. (s.f.). *Manual de soldadura*. American: Welding Society.
- Oerlikon. (2008). *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos*. Lima: Exsa. Obtenido de <https://www.soldaceros.com.pe/wp-content/uploads/2015/09/Manual-de-Soldadura-OERLIKON.pdf>
- Oliver, S., Jones, T. B., & Forlaris, G. (2006). Dual phase versus TRIP strip steels: Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing. *Materials Characterization, 58(4)*, págs. 390-400. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/223416956\\_Dual\\_phase\\_versus\\_TRIP\\_strip\\_steels\\_Microstructural\\_changes\\_as\\_a\\_consequence\\_of\\_quasi-static\\_and\\_dynamic\\_tensile\\_testing](https://www.researchgate.net/publication/223416956_Dual_phase_versus_TRIP_strip_steels_Microstructural_changes_as_a_consequence_of_quasi-static_and_dynamic_tensile_testing)
- OSCAR FABIÁN HIGUERA, J. L. (2007). FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS ACEROS AUTENÍTICOS AL MANGANESO. *Scientia et Technica, 231-236*.
- Pérez Cargua, M. A., & Pullas Rea, L. M. (2009). Influencia De La Utilización De Insertos De Varilla Corrugada Sobre Las Soldaduras De Perfil Estructural. *Tesis de posgrado*.

- Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba. Obtenido de <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf>
- Perez Medina, G. Y. (2009). *ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA (AHSS): DOBLE FASE (DP) Y DE PLASTICIDAD INDUCIDA POR TRANSFORMACIÓN (TRIP)*. CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES, Mexico.
- Radeva, V. (2014). *Ciencia De Los Materiales Manual De Prácticas. Ciencia De Los Materiales Manual De Prácticas*. Instituto Tecnológico De Santo Domingo, Santo Domingo. Obtenido de [https://www.academia.edu/27978069/CIENCIA\\_DE\\_LOS\\_MATERIALES\\_MANUAL\\_DE\\_PR%C3%81CTICAS](https://www.academia.edu/27978069/CIENCIA_DE_LOS_MATERIALES_MANUAL_DE_PR%C3%81CTICAS)
- RICAURTE OSPINA LOPEZ, H. A. (2007). *SOLDABILIDAD EN ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DISIMILES. SOLDABILIDAD EN ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DISIMILES*. Universidad Tecnológica de Pereira., Pereira, Colombia.
- Seferian, D. (1984). *Las soldaduras*. Bilbao: Ed. URMO.
- Semantic Scholar. (2022). *Macroscopic aspects of Lüders band deformation in mild steel*. Obtenido de [www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org): <https://www.semanticscholar.org/paper/Macroscopic-aspects-of-L%C3%BCders-band-deformation-in-Ananthan-Hall/53acc51fe664602d5e312e365e15b50120f0cd2c>
- SENA. (s.f.). *Tratamientos termicos, Maquinas-Herramientas y Troquelaría*. Creative Commons. Obtenido de [https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/3346/trat\\_termicos\\_modulo\\_basico\\_metalmec.pdf;sequence=1](https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/3346/trat_termicos_modulo_basico_metalmec.pdf;sequence=1)
- Shaw, J., Engl, B., Espina, C., Oren, E. C., & Kawamoto, Y. (2002). ULSAB-Advanced Vehicle Concepts – Materials. *Journal of materials and manufacturing*, 111(5), 21-29. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/44718619>
- Sifuentes, P. (2011). *Introduccion a la Ingenieria de Materiales*. Lima.
- SlidePlayer. (2014). *Tecnologías de unión*. Obtenido de <http://slideplayer.es/>: <http://slideplayer.es/slide/26599/>
- Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. México: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.
- Soldeo TIG. (2021). *SOLDADURA BAJO ATMÓSFERA INERTE Y ELECTRODO DE TUNGSTENO (TIG)*. Weld-des-tech. Obtenido de <https://weld-des-tech.com/onewebmedia/tig.pdf>
- Soldexa. (2011). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos*. Oerlikon. Obtenido de <https://es.slideshare.net/RonPincu/manual-soldadura-soldexa-15139801>

Soldexa. (2021). *Catálogo de Consumibles*. Lima: Nazca Electroodos Soldexa. Obtenido de [https://www.syhrep.com/wp-content/uploads/2021/06/Catalogo\\_Soldexa\\_NAZCA\\_sp\\_pe\\_rev0\\_v4.pdf](https://www.syhrep.com/wp-content/uploads/2021/06/Catalogo_Soldexa_NAZCA_sp_pe_rev0_v4.pdf)

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