



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE JUNTAS SOLDADAS DE ACERO ASTM A572 TRATADAS TERMICAMENTE”

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

CAMPOS TERÁN JUAN CARLOS
juan.campos@epn.edu.ec

JARAMILLO FLORES LUIS EDUARDO
luis.jaramillo01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO M.Sc.
homero.barragan@epn.edu.ec

COLABORADOR: ING. VELASTEGUI BALDA GABRIEL EDMUNDO
gabriel.velastegui@epn.edu.ec

Quito, Enero 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **CAMPOS TERAN JUAN CARLOS** y **JARAMILLO FLORES LUIS EDUARDO**, bajo mi supervisión.

Ing. Homero Barragán, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Gabriel Velasteguí, M.Sc.

COLABORADOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Campos Terán Juan Carlos** y **Jaramillo Flores Luis Eduardo**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Campos Terán Juan Carlos

Jaramillo Flores Luis Eduardo

DEDICATORIA

A Dios.

A mis queridos viejitos Jorge y Sonia.

A mis hermanos, Geovanny, Karina y mi sobrina Allison.

A mis amigos y familiares.

A mi novia Fernanda.

Carlos Campos

Dedico este trabajo de titulación a todos mis amigos y familia quienes han sido un apoyo incondicional en todos los aspectos posibles durante todo el proceso de la realización del presente proyecto.

Luis Jaramillo

AGRADECIMIENTO

La vida es un camino lleno de obstáculos los cuales se los debe superar paso a paso y es allí donde se aprende a temprar más el alma y fortalecer nuestras debilidades.

Agradecer a Dios y a la virgen del Quinche.

En este difícil y duro camino quiero agradecer de manera especial a mis queridos viejos Jorge Campos y Sonia Terán.

A mis hermanos Geovanny y Karina quienes supieron brindarme su apoyo y comprensión en cada momento que lo necesité.

A las personas que ayudaron a que se realice este proyecto desde su inicio, al Ing. Homero Barragán e Ing. Gabriel Velasteguí quienes fueron parte imprescindible para que este proyecto culmine de la mejor manera; Agradecer también por su paciencia, comprensión y guía que nos brindaron durante dicho proyecto.

A las personas que laboran en los diferentes Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica, quienes nos supieron ayudar en las diferentes etapas del proyecto.

Carlos Campos

Agradezco a toda mi familia por darme las fuerzas y el apoyo necesarios para poder culminar este proyecto.

A todos mis amigos de la Universidad por alentarme durante todo el proceso de realización del presente proyecto.

Al Ing. Homero Barragán por su guía durante la realización del proyecto.

Al Ing. Gabriel Velasteguí por ayudarnos transmitiéndonos su conocimiento para la correcta realización del proyecto.

Un agradecimiento especial a mis mejores amigos Liz, Llive (P1), Víctor (P2) por apoyarme y no dejarme rendir jamás durante toda la carrera en la universidad por haber formado parte de mis mejores momentos en la facultad por demostrarme lo que significa la verdadera amistad.

A mis amigos del colegio por estar siempre ahí apoyándome y dándome fuerzas para seguir adelante.

Luis Jaramillo

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
INDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	12
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	13
1. MARCO TEÓRICO.....	14
1.1. La soldabilidad.....	14
1.1.1. Tipos de soldabilidad.....	14
1.1.2. Soldabilidad en los aceros estructurales.....	14
1.1.3. Determinación de la soldabilidad en los aceros.....	15
1.2. Clasificación de los materiales según la norma ASME sección IX.....	16
1.2.1. Número P.....	16
1.2.2. Número de grupo.....	18
1.3. Generalidades del acero estructural.....	18
1.3.1. Aplicaciones.....	19
1.3.2. Acero estructural ASTM A-572 Gr 50.....	19
1.3.3. Composición química.....	20
1.4. Tratamientos térmicos.....	21
1.4.1. Efecto de los tratamientos térmicos en los aceros.....	22
1.4.2. Generalidades de los tratamientos térmicos Recocido, Temple y Revenido.....	23
1.4.3. Tratamientos térmicos post-soldadura.....	26
2. METODOLOGÍA.....	28
2.1. Especificación del proceso de soldadura.....	28
2.2. Preparación de las probetas.....	28
2.2.1. Realización de los cordones.....	30
2.2.2. Equipo de soldadura utilizado.....	32
2.3. Ultrasonido.....	32
2.3.1. Realización del ensayo.....	32
2.3.2. Equipo Utilizado.....	33
2.4. Tratamiento térmico post-soldadura.....	33

2.4.1.	Recocido (Probeta T1)	33
2.4.1.2.	Curva de Tratamiento de Térmico	34
2.4.2.	Revenido (Probeta T2)	35
2.4.2.1.	Parámetros	35
2.4.2.2.	Curva de Tratamiento Térmico	35
2.5.	Ensayos destructivos	36
2.5.1.	Preparación de las probetas	36
2.5.2.	Ensayo de Tracción	36
2.5.2.1.	Ensayo de Tracción para metal base	36
2.5.2.1.1.	Obtención de probetas y realización del ensayo	37
2.5.2.2.	Ensayo de tracción para probetas soldadas	37
2.5.2.2.1.	Criterios de aceptación	38
2.5.2.2.2.	Realización del ensayo	38
2.5.3.	Ensayo de Doblado Lateral	40
2.5.3.1.	Criterios de aceptación	40
2.5.3.2.	Realización del ensayo	41
2.5.3.3.	Equipo utilizado	42
2.5.4.	Ensayo Charpy	43
2.5.4.1.	Criterios de aceptación	43
2.5.4.2.	Realización del ensayo	44
2.5.4.3.	Equipo Utilizado	45
2.5.5.	Ensayo de Dureza	45
2.5.5.1.	Realización del ensayo	46
2.5.5.2.	Equipo Utilizado	47
2.6.	Ensayo de Metalografía y Macrografía	47
2.6.1.	Obtención de probetas y realización del ensayo	48
2.6.2.	Equipo Utilizado	48
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
3.1.	Resultados para el metal base	50
3.1.1.	Ensayo de tracción	50
3.1.2.	Ensayo de dureza	51
3.1.3.	Ensayo metalográfico	51
3.2.	Resultados para las probetas soldadas	52
3.2.1.	Ensayo de Tracción	52
3.2.2.	Ensayo de Doblado	54
3.2.2.1.	Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST) ...	54
3.2.2.2.	Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2)	55

3.2.3.	Ensayo Charpy	57
3.2.3.1.	Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST) ...	57
3.2.3.2.	Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2).....	58
3.2.4.	Ensayo de Dureza	59
3.2.4.1.	Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST) ...	59
3.2.4.2.	Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2).....	60
3.2.5.	Ensayo de Metalografía	61
3.2.5.1.	Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST) ...	61
3.2.5.2.	Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2).....	62
3.2.6.	Ensayo micrográfico	64
3.2.6.1.	Resultados del ensayo micrográfico para probeta sin tratamiento térmico (ST)	65
3.2.6.2.	Resultados del ensayo micrográfico para probeta con tratamiento térmico (T1, T2)	65
3.3.	Discusión.....	66
3.3.1.	Discusión para el metal base	66
3.3.1.1.	Comportamiento mecánico del metal base	66
3.3.1.2.	Comportamiento metalúrgico para el metal base	67
3.3.2.	Discusión para las soldaduras	68
3.3.2.1.	Ensayo no destructivo	68
4.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	73
4.1	Conclusiones.....	73
4.2	Trabajos futuros	74
	Referencias Bibliográficas	75
	Anexos	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Soldabilidad del acero en función del carbono equivalente	16
Tabla 1.2. Números P de soldadura ASME.....	16
Tabla 1.3. Números P de soldadura ASME	17
Tabla 1.4. Números P de soldadura ASME	18
Tabla 1.5. Número de grupo para soldadura según la norma ASME	18
Tabla 2.1. Especificaciones de la máquina de soldadura.....	32
Tabla 2.2. Especificaciones del Equipo de Ultrasonido	33
Tabla 2.3. Normas Aplicadas en cada Ensayo	36
Tabla 2.4. Especificaciones de la máquina para ensayos de doblado	42
Tabla 2.5. Especificaciones de la máquina para ensayo Charpy	45
Tabla 2.6. Especificaciones de la máquina para ensayo de dureza	47
Tabla 2.7. Especificaciones del equipo para ensayo de macrografía.....	48
Tabla 2.8. Especificaciones del equipo para el ensayo de micrografía.	49
Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción para el material base.....	50
Tabla 3.2. Resultados del ensayo de dureza del material base.	51
Tabla 3.3. Resultados del ensayo de metalografía para el material base.....	51
Tabla 3.4. Resultados obtenidos en el ensayo de tracción de las probetas soldadas. .	52
Tabla 3.5. Especificación del Tipo de Fractura.	53
Tabla 3.6. Resultados del ensayo de doblado para probetas sin tratamiento térmico. .	55
Tabla 3.7. Resultados del ensayo de doblado para probetas con tratamiento térmico.	56
Tabla 3.8. Resultados y calificación del ensayo Charpy para la probeta sin tratamiento térmico.	57
Tabla 3.9. Resultados y calificación del ensayo Charpy para probetas tratadas térmicamente (T2).	58
Tabla 3.10. Resultados y calificación del ensayo Charpy para probetas tratadas térmicamente (T1).	59
Tabla 3.11. Resultados del ensayo de dureza para probetas sin tratamiento térmico. .	59
Tabla 3.12. Resultados del ensayo de dureza para probetas con tratamiento térmico (T1).....	60
Tabla 3.13. Resultados del ensayo de dureza para probetas con tratamiento térmico (T2).....	60
Tabla 3.14. Resultados del ensayo micrográfico para probetas sin tratamiento térmico (ST).	61
Tabla 3.15. Resultados del ensayo micrográfico para probetas con tratamiento térmico (T1).....	62
Tabla 3.16. Resultados del ensayo micrográfico para probetas con tratamiento térmico (T2).....	63
Tabla 3.17. Comparación de los resultados del ensayo de tracción con referencia a la especificación.	67
Tabla 3.18. Porcentaje de reducción área transversal en las probetas del ensayo de tracción.	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Efecto del carbono en la soldabilidad del acero.....	15
Figura 1.2. Número P y Grupo de Materiales Base.....	20
Figura 1.3. Requerimientos de Composición Química.....	20
Figura 1.4. Contenido de Aleante.....	20
Figura 1.5. Requerimientos de Límite de Fluencia y Esfuerzo ultimo a la Tracción	21
Figura 1.6. Diagrama Hierro-Carbono	23
Figura 1.7. Ciclo térmico utilizado en un tratamiento térmico de recocido	24
Figura 1.8. Ciclo térmico en un tratamiento térmico de temple.....	25
Figura 1.9. Ciclo térmico utilizado en un tratamiento térmico de temple y revenido	26
Figura 2.1. Dimensiones de las probetas.....	29
Figura 2.2. Dimensiones del bisel	29
Figura 2.3. Placas con junta de restricción completa	30
Figura 2.4. Tabla de requerimientos de precalentamiento para espesores mayores a 38 [mm].....	31
Figura 2.5. Realización del proceso de soldadura.....	31
Figura 2.7. Tabla UCS-56-1 Requerimientos de tratamientos térmicos post-soldadura para aceros de bajo carbono P-No.1	34
Figura 2.8. Curva de Tratamiento Térmico de Recocido	35
Figura 2.6. Curva del Tratamiento Térmico de Revenido	36
Figura 2.9. Dimensiones para la probeta de tracción.....	37
Figura 2.10. Probeta maquinada para el ensayo de tracción del material base.....	37
Figura 2.11. Dimensiones mínimas de la probeta para el ensayo de tracción de las probetas soldadas.....	38
Figura 2.12. Dimensiones finales de las probetas de ensayo de tracción de las juntas soldadas.	39
Figura 2.13. Probetas maquinadas para el ensayo de tracción.....	39
Figura 2.14. Dimensiones mínimas de las probetas de doblado lateral.	40
Figura 2.15. Probetas maquinadas para el ensayo de doblado lateral.....	41
Figura 2.16. Dimensiones finales de las probetas para el ensayo de doblado lateral...	41
Figura 2.17. Realización del ensayo de doblado.	42
Figura 2.18. Dimensiones para las probetas de ensayo Charpy.	43
Figura 2.19. Requerimientos para el ensayo Charpy.	43
Figura 2.20. Ubicación de las probetas para el ensayo Charpy.	44
Figura 2.21. Dimensiones finales de las probetas para ensayo Charpy.	44
Figura 2.22. Esquema de toma de durezas.....	46
Figura 3.1. Probeta ensayada del Metal Base y sección transversal.	50
Figura 3.2. Macrografía probeta sin tratamiento térmico (ST) (Magnificación 0,4X).	65
Figura 3.3. Macrografía probeta con tratamiento térmico (T1) (Magnificación 0,4X).	65
Figura 3.4. Macrografía probeta con tratamiento térmico (T2) (Magnificación 0,4X).	66
Figura 3.5. Diagrama de barras comparativo de la resistencia a la tracción de las juntas soldadas.....	69
Figura 3.6. Barrido de dureza superior.....	70
Figura 3.7. Barrido de dureza central.	71
Figura 3.8. Barrido de dureza inferior.....	71

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un análisis comparativo de algunas propiedades mecánicas de juntas soldadas tratadas térmicamente en acero estructural ASTM A572 Gr. 50. Aplicando la Norma AWS D1.1 se realizaron las probetas de soldadura, es decir, se estableció los procedimientos de soldadura (WPS) para realizar los respectivos cordones. En base a la norma ASME Sección VIII División I se realizó el tratamiento térmico post-soldadura de recocido a una de las probetas, a otra probeta se le realizó un revenido de alivio de esfuerzos, y una tercera probeta no se le realizó ningún tratamiento térmico; a cada probeta se le efectuó ensayos de tracción, Charpy, barrido de dureza, doblado, y ultrasonido. En base a los diferentes ensayos fue posible determinar la variación de la microestructura y de las propiedades mecánicas (dureza, ductilidad, tenacidad) entre las juntas soldadas, para así llegar a la conclusión de que los tratamientos térmicos post-soldadura en juntas con espesores mayores a 38 [mm] son necesarios.

Palabras clave: Tratamiento térmico, Propiedades mecánicas, Acero A572.

ABSTRACT

In this project a comparative analysis of some mechanical properties of welded joints treated thermally in structural steel ASTM A572 Gr.50 was developed. The welding specimens were made applying the AWS D1.1 standard. That is, the welding procedure (WPS) to make the respective welds were set. Based on the ASME Section VIII Division I standard, the postweld heat treatment of annealing was performed on one of the test pieces, another test piece was subjected to a stress relief temper, and a third test piece was not subjected to any heat treatment. Each test piece was subjected to tensile tests, Charpy, hardness scanning, bending, and ultrasound. Based on the different tests it was possible to determine the variation of the microstructure and the mechanical properties (hardness, ductility, toughness) between the welded joints, in order to reach the conclusion that postweld heat treatment in joints with thicknesses greater than 38 [mm] is necessary.

Keywords: Heat Treatment, Mechanical properties, Steel ASTM A572.

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE JUNTAS SOLDADAS DE ACERO ASTM A572 TRATADAS TÉRMICAMENTE”

INTRODUCCIÓN

El acero estructural es un material que se caracteriza por tener una resistencia elevada la cual permite que sea utilizado para edificar estructuras con gran eficacia. Este tipo de acero tiene la capacidad de soportar grandes pesos, sin alterar o dañar la forma del mismo.

Varias son las características que hacen que el acero estructural sea un material muy utilizado por las empresas constructoras, como por ejemplo: la apariencia del material, la cual no varía con las condiciones climatológicas u otras, pero que con el fuego si se puede ver afectado en gran medida; otros aspecto importante es la durabilidad, con un mantenimiento correctivo, se pude lograr que la estructura dure un tiempo prolongado; la ductilidad y la tenacidad son otras características que permiten al material soportar grandes cargas sin fallar y absorber energía sin llegar a sufrir roturas respectivamente.

Los esfuerzos residuales generados en las uniones soldadas son habitualmente identificados como una de los principales factores que afectan en el deterioro de la mayoría de construcciones o estructuras soldadas, por tal motivo es que se ha realizado varios estudios por parte de ingenieros e investigadores, para determinar las características y las formas de disminuir o eliminar dichos esfuerzos en las soldaduras.

En la industria, el método ampliamente utilizado para alivio de esfuerzos, es el tratamiento térmico el cual consiste en calentar el conjunto soldado hasta una temperatura preestablecida, mantenerlo un tiempo, y proceder a su posterior enfriamiento en diferentes medios, dependiendo de lo que se quiera obtener del tratamiento en el conjunto soldado.

Por todo lo expuesto, se requiere realizar un estudio comparativo el cual nos permita obtener resultados con los que podamos apreciar las diferencias que existen entre placas tratadas térmicamente mediante dos procesos y una placa sin tratamiento y a su vez compararlo con el material base.

El proceso de soldadura seleccionado será FCAW, ya que generalmente este proceso se utiliza industrialmente para producir los prefabricados en estructuras metálicas y no genera defectos, por lo que produce uniones de alta calidad, además de ser un proceso limpio el cual no genera incrustaciones o imperfecciones debido al electrodo utilizado en el mismo. Posteriormente se realizará los ensayos conforme a lo indicado en la norma AWS D1.1.

Objetivo general

Analizar las propiedades mecánicas de juntas soldadas de acero ASTM A572 tratadas térmicamente.

Objetivos específicos

- Elaborar probetas de soldadura simulando juntas de restricción.
- Realizar ultrasonido a las soldaduras para observar su integridad.
- Realizar tratamientos térmicos post-soldadura de recocido y revenido.
- Realizar ensayos de tracción, dureza, Charpy, Doblado para medir propiedades mecánicas en las juntas sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico
- Comparar las propiedades mecánicas de las probetas sin tratamiento térmico con las que se realizaron tratamientos térmicos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. La soldabilidad

El acero ASTM A572 es un acero estructural que no es comúnmente utilizado como el acero ASTM A36, el cual tiene un punto de fluencia de 36 000 psi mientras que el acero ASTM A572 posee una resistencia de 50 000 psi el cual es evidentemente mayor a la del acero ASTM A36 comúnmente utilizado, razón por la cual en la actualidad la tendencia es usar el acero con mayor resistencia.

La soldabilidad es una propiedad tecnológica de los materiales que se define como la capacidad que tienen los mismos para establecer una unión soldada de tal forma que la unión cumpla con las exigencias establecidas por el tipo de construcción y requerimientos técnicos. En otras palabras, que la unión obtenida sea de calidad necesaria.

La AWS define la soldabilidad como la capacidad de un material para ser soldado bajo condiciones impuestas de fabricación en una estructura específica, apropiadamente diseñada y que cumpla su función satisfactoriamente en el servicio propuesto.

1.1.1. Tipos de soldabilidad

En la práctica se pueden diferenciar algunos tipos de soldabilidad. Tenemos la soldabilidad metalúrgica, soldabilidad operativa y la soldabilidad constructiva.

La soldabilidad metalúrgica estudia las transformaciones o cambios que ocurren en los materiales debido al proceso de soldadura.

La soldabilidad operativa estudia las condiciones de la realización de las uniones dependiendo de cada proceso de soldadura.

La soldabilidad constructiva estudia las propiedades del conjunto y su tendencia al agrietamiento de la unión soldada.

1.1.2. Soldabilidad en los aceros estructurales

Se debe tomar en cuenta que la soldabilidad se la debe definir en relación a un proceso de soldadura determinado. En el acero estructural, las características y particularmente la composición química son factores que influyen en la soldabilidad.

Tomando como referencia el carbono se puede clasificar a la soldabilidad de un acero como se indica en la figura 1.1.

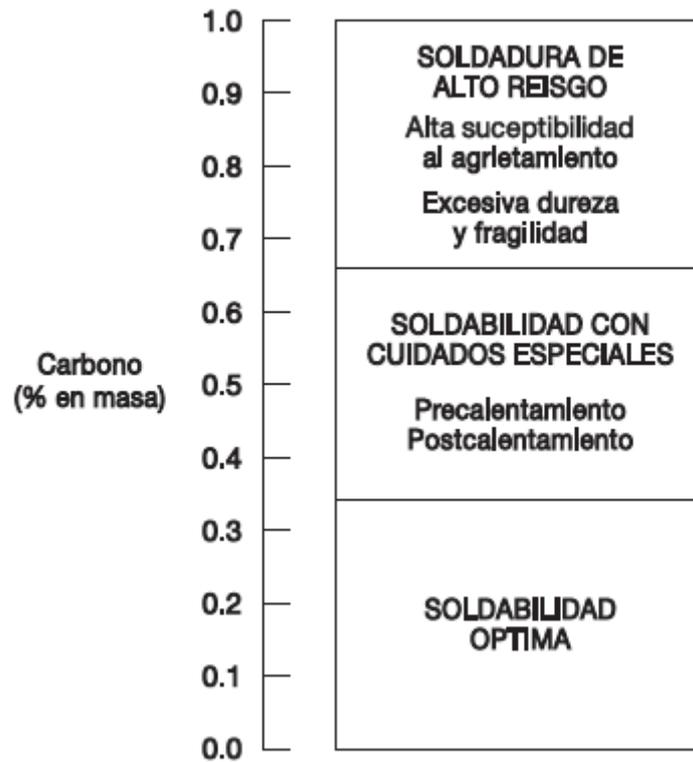


Figura 1.1. Efecto del carbono en la soldabilidad del acero.
(Fuente: AHMSA, 2013)

1.1.3. Determinación de la soldabilidad en los aceros

Una manera sencilla para poder establecer la soldabilidad del acero es mediante el cálculo del carbono equivalente (CE), utilizando una de las ecuaciones mostradas a continuación; las cuales relacionan la composición química del material. Es importante destacar que cada elemento que constituye el material tiene un efecto directo en las propiedades mecánicas del mismo.

Ecuación establecida por la AWS D1.1

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + Nb + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

Ecuación desarrollada por el Instituto Internacional de Soldadura:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (2)$$

Ecuación de Fórmula de Ito y Bessyo:

$$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn + Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3)$$

Tabla 1.1. Soldabilidad del acero en función del carbono equivalente (CE).

Carbono equivalente CE	Soldabilidad
CE < 0.40	Excelente
0.41 < CE ≤ 0.45	Buena
0.46 < CE ≤ 0.52	Regular
CE > 0.52	Pobre

(Fuente: AHMSA, 2013)

La soldabilidad de un acero se considera aceptable si el valor del carbono equivalente (CE) es menor a 0.45, como se observa en la tabla 1.1.

1.2. Clasificación de los materiales según la norma ASME sección IX

1.2.1. Número P

La ASME BPVC ha asignado los números P, a los materiales base con el fin de reducir el número de calificación de procesos de soldadura (WPS). (ASME, 2017)

El número P, es usado para agrupar materiales base, permitiendo así la calificación de un gran grupo de materiales y no solo de un material en específico.

Este número ha sido establecido en función de características comparables entre los materiales, como son: composición, soldabilidad, propiedades mecánicas, tratamientos térmicos.

La tabla 1.2 presenta los materiales con su respectivo número P:

Tabla 1.2. Números P de soldadura ASME.

Numero P	Material Base
1	Aceros aleados (Cuatro Números G)
3	½ Molibdeno o ½ Cromo (Tres Números G)
4	1 ¼ Cromo, ½ Molibdeno (Dos Números G)
5A	2 ¼ Cromo, 1 Molibdeno
5B	5 Cromo, ½ Molibdeno o 9 Cromo, 1 Molibdeno (Dos Números G)
5C	Cromo, Molibdeno, Vanadio (Cinco Números G)
6	Aceros Inoxidables Martensíticos (Grado 410, 415, 429) (Seis Números G)
7	Aceros Inoxidables Ferríticos (Grado 409, 430)
8	Aceros Inoxidables Austeníticos
9A, B, C	2-4 Aceros al Níquel
10A, B, C, F	Varios Aceros de Baja Aleación
10H	Aceros Inoxidables Dúplex y Súper Dúplex

10I	Aceros Inoxidables de alto contenido de Cromo
10J	Aceros Inoxidables de alto contenido de Cromo, Molibdeno
10K	Aceros Inoxidables de alto contenido de Cromo, Molibdeno, Níquel
11A	Varios Aceros de Baja Aleación de alta resistencia (Seis Números G)
11B	Varios Aceros de Baja Aleación de alta resistencia (Diez Números G)
21	Alto contenido de Aluminio (Series 1000 y 3000)
22	Aluminio (Series 5000 – 5052, 5454)
23	Aluminio (Series 6000 – 6061, 6063)
25	Aluminio (Series 5000 – 5083, 5086, 5456)
31	Alto contenido de Cobre
32	Latón
33	Aleación Cobre - Silicio
34	Aleación Cobre - Níquel
35	Aleación Cobre – Aluminio
41	Alto contenido de Níquel
42	Níquel, Cobre – (Monel 500)
43	Níquel, Cromo, Hierro – (Inconel)
44	Níquel, Molibdeno – (Hastelloy B2, C22, C276, X)
45	Níquel, Cromo, Silicio
46	Níquel, Cromo, Silicona
47	Níquel, Cromo, Tungsteno
51, 52, 53	Aleaciones de Titanio
61, 62	Aleaciones de Zirconio

(Fuente: Propia)

A continuación, la tabla 1.3 presenta un resumen de los materiales base y sus aleaciones de la tabla 1.2 para obtener una mejor perspectiva del número P que representa a cada material.

Tabla 1.3. Números P de soldadura ASME.

Material	Números P
Acero y sus aleaciones	1 / 3 / 4 / 5 A ,B,C/6/7/8/9x/10x/11x/15x
Aluminio y sus aleaciones	21-25
Cobre y sus aleaciones	31-35
Níquel y sus aleaciones	41-49
Titanio	51-53
Circonio	61/62

(Fuente: Propia)

La tabla 1.4 presenta los números P de los materiales base: aceros al carbono y sus aleaciones, aceros martensíticos, ferríticos, austeníticos, níquel, microaleados y materiales UHT para poder ser usados al momento de la realización de un WPS.

Tabla 1.4. Números P de soldadura ASME.

Material	Números P
Acero al carbono	1
0,5Cr/0,5Mo	3
1,25Cr/0,5Mo	4
2.2Cr/1Mo	5A
5-7Cr/1Mo	5B
Aceros Martensíticos	6
Aceros Ferríticos	7
Aceros Austeníticos	8
Níquel	9x
Microaleados/Dúplex	10x
Materiales UHT	11x

(Fuente: Propia)

Gracias a los números P los costos de calificación de procesos y desempeño de soldadura se reducen, ya que un soldador calificado para un material específico, también califica para materiales de su mismo número P.

Esto ayuda a tener un WPS para varios materiales, y a su vez un WPQ con el cual un soldador está habilitado para soldar varios materiales.

1.2.2. Número de grupo

También existe el número de grupo el cual es usado solo para cuando sea requerido ensayos de impacto en metales ferrosos, subgrupos de materiales con numero P de propiedades metalúrgicas similares.

A continuación, en la tabla 1.5 se presenta las asignaciones de los grupos a diferentes sistemas de aleación.

Tabla 1.5. Número de grupo para soldadura según la norma ASME.

Material Base	Soldadura
Aceros y Aceros Aleados	P-No. 1 hasta P-No. 15F
Aluminio y Aleaciones de Aluminio	P-No. 21 hasta P-No. 26
Cobre y Aleaciones de Cobre	P-No. 31 hasta P-No. 35
Níquel y Aleaciones de Níquel	P-No. 41 hasta P-No. 49
Titanio y Aleaciones de Titanio	P-No. 51 hasta P-No. 53
Zirconio y Aleaciones de Zirconio	P-No. 61 hasta P-No. 62

(Fuente: Propia)

1.3. Generalidades del acero estructural

Los aceros estructurales, son usados en general para la construcción de estructuras metálicas tales como son puentes, edificios, etc.; estos aceros son referidos por la norma ASTM A6, la cual establece los requerimientos generales para las diferentes formas de este tipo de aceros.

El proceso de obtención de este tipo de acero posee varias etapas, en resumen, es el siguiente:

- El hierro crudo pasa por un proceso de clasificación y trituración, con procesos de refinación con el fin de obtener las mejores calidades de hierro con un 60% de pureza aproximada.
- El hierro es calentado en un alto horno desde la parte superior esto logra eliminar impurezas, conforme el hierro puro se va hacia el fondo del horno.
- El hierro fundido es extraído, y es calentado a mayor temperatura con el fin de realizar las inclusiones de otras sustancias como el manganeso. Las diferentes sustancias darán varias propiedades al acero como son mayor ductilidad, dureza, resistencia, etc.

Como propiedades clave de este tipo de acero destacan la ductilidad, la resistencia y tenacidad.

La ductilidad es la capacidad de un material de transformarse en hilos ante la presencia de un esfuerzo externo, es decir la capacidad de deformarse plásticamente sin sufrir una fractura.

La tenacidad es la cantidad de energía que puede absorber un material antes de fracturarse.

1.3.1. Aplicaciones

Como su nombre lo indica su campo de aplicación radica en las estructuras y en un menor porcentaje en elementos de máquinas.

Es muy usado en edificios, puentes, elementos secundarios de recipientes a presión, etc.

1.3.2. Acero estructural ASTM A-572 Gr 50

Es un acero de alta resistencia, baja aleación; ha sido desarrollado durante los últimos años, el cual es actualmente el más utilizado en la construcción de edificios industriales, residenciales, puentes, etc.

Este acero logra gran resistencia gracias a la adición de su principal aleante el manganeso; este acero posee gran soldabilidad al igual que una buena resistencia a la corrosión.

Este tipo de acero posee varios grados, los cuales están directamente relacionados con los porcentajes de aleación, los cuales varían sus propiedades siendo la principal la resistencia a la tracción.

En la figura 1.2 se define el número P y Grupo de este acero según la norma ASME Sección IX.

Spec. No.	Type or Grade	UNS No.	Minimum Specified Tensile, ksi (MPa)	Welding		Brazing		ISO 15608 Group	Nominal Composition	Typical Product Form
				P-No.	Group No.	P-No.	Group			
Ferrous (Cont'd)										
A/SA-556	B2	K02707	60 (415)	1	1	101	11.1	C-Si		Smls. tube
A/SA-556	C2	K03006	70 (485)	1	2	101	11.1	C-Mn-Si		Smls. tube
A/SA-557	A2	K01807	47 (325)	1	1	101	1.1	C		E.R.W. tube
A/SA-557	B2	K03007	60 (415)	1	1	101	11.1	C		E.R.W. tube
A/SA-557	C2	K03505	70 (485)	1	2	101	11.1	C-Mn		E.R.W. tube
A/SA-562	...	K11224	55 (380)	1	1	101	1.1	C-Mn-Ti		Plate
A/SA-572	42	...	60 (415)	1	1	101	1.2	C-Mn-Si		Plate & shapes
A/SA-572	50	...	65 (450)	1	1	101	1.2	C-Mn-Si		Plate & shapes
A/SA-572	55	...	70 (485)	1	2	101	1.3	C-Mn-Si		Plate & shapes
A/SA-572	60	...	75 (515)	1	2	101	11.1	C-Mn-Si		Plate & shapes
A/SA-572	65	...	80 (550)	1	3	101	1.3	C-Mn-Si		Plate & shapes

Figura 1.2. Número P y grupo de materiales base.
(Fuente: ASME, 2017)

1.3.3. Composición química

En las figuras 1.3 y 1.4 se presentan los requerimientos de composición química de este acero según la norma ASTM A 572/A 572M.

Diameter, Thickness, or Distance Between Parallel Faces, in. [mm] Plates and Bars	Structural Shape Flange or Leg Thickness, in. [mm]	Grade	Carbon, max, %	Manganese, ^B max, %	Phosphorus, max, %	Sulfur, max, %	Silicon	
							Plates to 1½ in. [40 mm] Thick, Shapes with Flange or Leg Thickness to 3 in. [75 mm] inclusive, Sheet Piling, Bars, Zees, and Rolled Tees ^C	Plates Over 1½ in. [40 mm] Thick and Shapes with Flange Thickness Over 3 in. [75 mm]
							max, %	range, %
6 [150]	all	42 [290]	0.21	1.35 ^D	0.04	0.05	0.40	0.15-0.40
4 [100] ^E	all	50 [345]	0.23	1.35 ^D	0.04	0.05	0.40	0.15-0.40
2 [50] ^F	all	55 [380]	0.25	1.35 ^D	0.04	0.05	0.40	0.15-0.40
1¼ [32] ^F	≤2 [50]	60 [415]	0.26	1.35 ^D	0.04	0.05	0.40	^G
>½ - 1¼ [13-32]	>1-2 [25-50]	65 [450]	0.23	1.65	0.04	0.05	0.40	^G
≤½ [13] ^H	≤ 1 ^H	65 [450]	0.26	1.35	0.04	0.05	0.40	^G

Figura 1.3. Requerimientos de Composición Química.
(Fuente: ASTM A572, 2013)

Type ^A	Elements	Heat Analysis, %
1	Columbium ^B	0.005-0.05 ^C
2	Vanadium	0.01-0.15
3	Columbium ^B	0.005-0.05 ^C
	Vanadium	0.01-0.15
	Columbium plus vanadium	0.02-0.15 ^D
5	Titanium	0.006-0.04
	Nitrogen	0.003-0.015
	Vanadium	0.06 max

Figura 1.4. Contenido de Aleante.
(Fuente: ASTM A572, 2013)

En la figura 1.5 se detallan los requerimientos de límite de fluencia y esfuerzo último a la tracción para el acero ASTM A572.

Grade	Yield Point, min		Tensile Strength, min		Minimum Elongation, % <i>B,C,D</i>	
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	in 8 in. [200 mm]	in 2 in. [50 mm]
42 [290]	42	[290]	60	[415]	20	24
50 [345]	50	[345]	65	[450]	18	21
55 [380]	55	[380]	70	[485]	17	20
60 [415]	60	[415]	75	[520]	16	18
65 [450]	65	[450]	80	[550]	15	17

Figura 1.5. Requerimientos de Límite de Fluencia y Esfuerzo ultimo a la Tracción.
(Fuente: ASTM A572, 2013)

1.4. Tratamientos térmicos

Los Tratamientos Térmicos abarcan diferentes procesos de calentamiento y enfriamiento para generar variaciones en la estructura de un material; estas variaciones permitirán mejorar sus propiedades mecánicas dependiendo de la aplicación que se le dé al material. El principal objetivo de un tratamiento térmico es proveer a los materiales propiedades específicas para su conformación o uso final. A diferencia de otros tratamientos, un tratamiento térmico no modifica la composición química en el material, pero si factores como el tamaño de grano, su estructura, y como efecto las propiedades mecánicas. Los tratamientos térmicos se los puede realizar en una parte o en la totalidad de pieza, en uno o varios pasos del proceso de manufactura.

La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con parámetros o tiempos establecidos. (Askeland, 2011)

En un tratamiento térmico se debe establecer: la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia a dicha temperatura y la velocidad de enfriamiento. La temperatura de calentamiento siempre debe ser menor a la temperatura de fusión del material o aleación con el que se esté trabajando.

El calentamiento se lo debe realizar de una manera lenta y que sea lo más uniforme posible, en especial cuando se trabaja con piezas de espesores considerables. Con esto se trata de no generar tensiones internas por calentamiento desigual entre las secciones de diferentes dimensiones, siendo lo ideal la permanencia de la misma temperatura en toda la sección de la pieza trabajada.

En los tratamientos térmicos los procedimientos son varios dependiendo de lo que se desee conseguir. La gran variedad de los tratamientos térmicos, diferentes aleaciones y reacciones y los distintos requerimientos técnicos demandan soluciones y conocimientos profundos acerca de los tratamientos. En un tratamiento térmico lo que se trata es de endurecer o ablandar, eliminar las consecuencias de un mecanizado, alterar la estructura cristalina o alterar total o parcialmente las propiedades mecánicas del material. Podemos distinguir dos razones principales para efectuar tratamientos térmicos en los cuales se pretende conseguir un endurecimiento (temple) o un ablandamiento (recocido).

1.4.1. Efecto de los tratamientos térmicos en los aceros

Para realizar un estudio de los tratamientos térmicos de los aceros es beneficioso usar el diagrama Hierro-Carbono y en especial la parte mostrada en la figura 1.6.

Los aceros se pueden clasificar como: Hipoeutectoides, Eutectoides e Hipereutectoides.

- Los aceros Hipoeutectoides son aquellos que su contenido en carbono es menor que el contenido Eutectoide.
- Los aceros Eutectoides contienen $\approx 0,78\%$ C y los aceros Hipereutectoides, cantidades mayores de carbono.

El diagrama de la figura indica esquemáticamente las microestructuras metalográficas resultantes de enfriar lentamente desde la región Austenítica (Recocido) los tres tipos de aceros. Un acero Eutectoide se transforma totalmente a Perlita (láminas alternadas de Cementita y Ferrita) mientras que en los Hipoeutectoides contienen Ferrita primaria y Perlita. En los aceros Hipereutectoides se forma primero Cementita y luego la Perlita.

Utilizando este hecho, es posible estimar el % de carbono de un acero recocido por medio de un análisis metalográfico sin necesidad de un análisis químico, ya que en aceros Hipoeutectoides a mayor cantidad de Ferrita corresponda un menor % de carbono y en los aceros Hipereutectoides, a mayor presencia de Cementita indica un aumento en % de carbono.

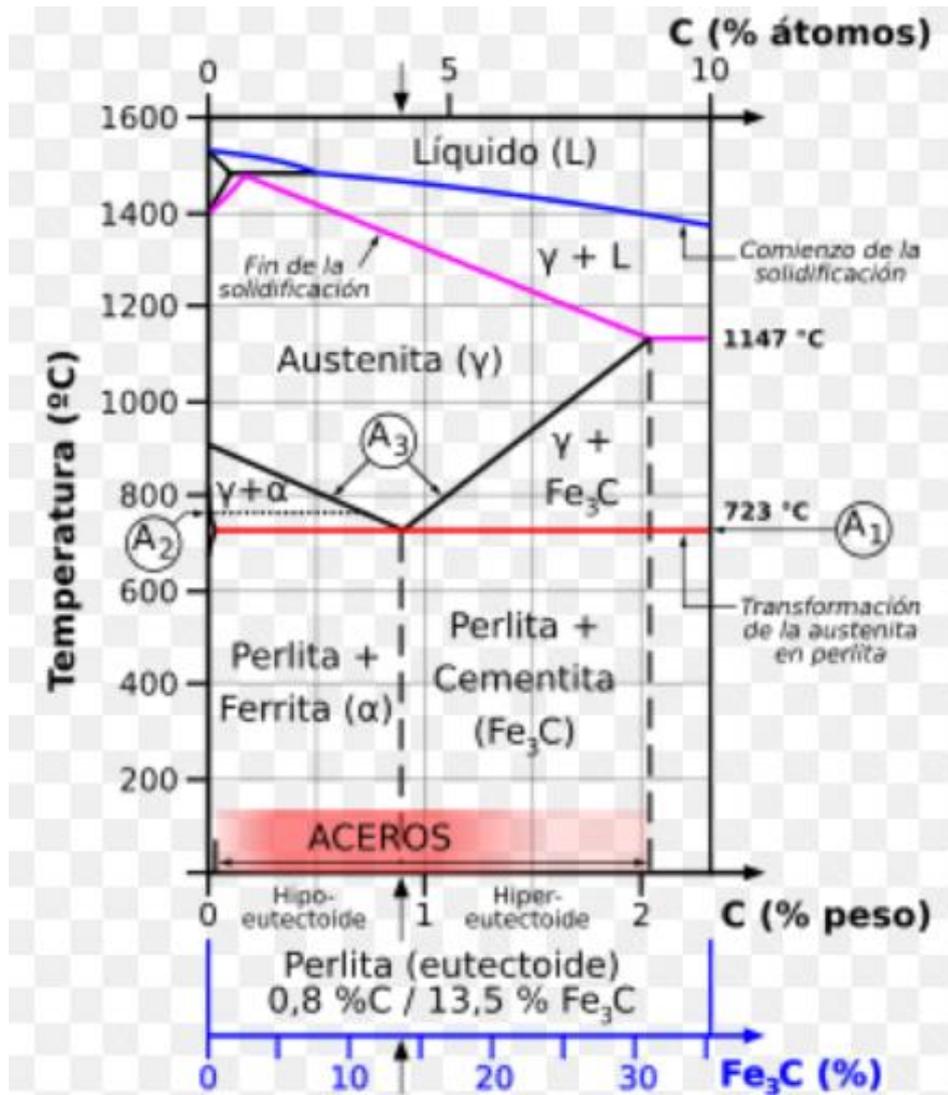


Figura 1.6. Diagrama Hierro-Carbono.
(Fuente: Ramírez, 2008)

1.4.2. Generalidades de los tratamientos térmicos Recocido, Temple y Revenido.

A continuación, se detalla las generalidades de los tratamientos térmicos Recocido, Temple y Revenido para lo cual es necesario definir las siguientes temperaturas de transformación de fases:

- A3: Temperatura a la cual se completa la transformación de ferrita en austenita o austenita en ferrita
- A1: Temperatura a la cual se complete la transformación de austenita a ferrita o ferrita más cementita.

1.4.2.1 Tratamiento térmico de Recocido

Para el tratamiento térmico de recocido generalmente el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente superior a A_3 y luego se enfría lentamente (por lo general dentro del horno). El principal objetivo es ablandar el acero, deseándose a veces también regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. La figura 1.7 muestra el ciclo del tratamiento.

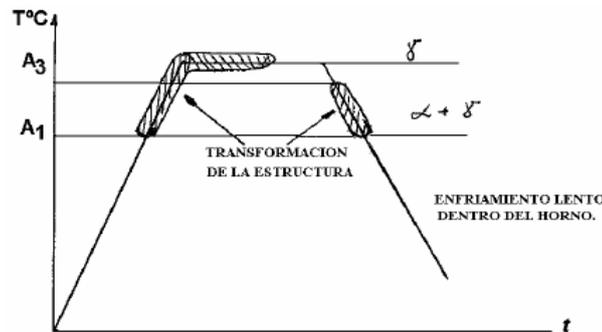


Figura 1.7. Ciclo térmico utilizado en un tratamiento térmico de recocido.
(Fuente: Ramírez, 2008)

El Recocido se realiza principalmente para:

- Alterar la estructura del material para obtener las propiedades mecánicas deseadas, ablandando el metal y mejorando su maquinabilidad.
- Recristalizar los metales trabajados en frío.
- Para aliviar los esfuerzos residuales.

Las operaciones de Recocido se ejecutan algunas veces con el único propósito de aliviar los esfuerzos residuales en la pieza de trabajo causadas por los procesos de formado previo. Este tratamiento es conocido como Recocido para Alivio de Esfuerzos, el cual ayuda a reducir la distorsión y las variaciones dimensionales que pueden resultar de otra manera en las partes que fueron sometidas a esfuerzos. Por lo que al material se le realiza este tratamiento posterior con el objetivo de obtener características necesarias para que cumpla su función satisfactoriamente en el servicio propuesto.

1.4.2.2 Tratamiento térmico de Temple

El Temple es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, transformando toda la masa en Austenita con el calentamiento y después, por medio de un enfriamiento brusco (con aceites, agua o salmuera), se convierte en Martensita, que es el constituyente duro típico de los aceros templados.

Consiste en austenizar un acero y luego enfriarlo en forma más o menos rápida (según composición química y tamaño de las piezas) en un medio adecuado como ser: agua, aceite o sales fundidas. Tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia del acero. En la figura 1.8 se esquematiza el ciclo térmico de un temple.

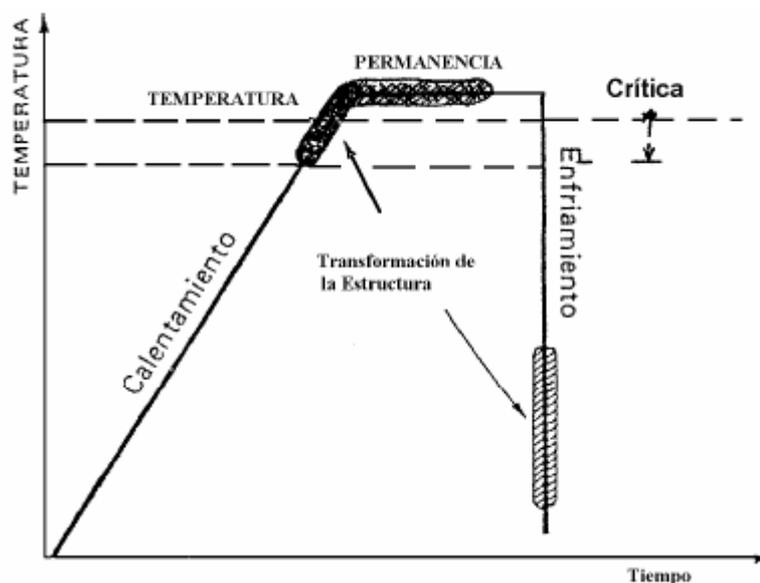


Figura 1.8. Ciclo térmico en un tratamiento térmico de temple.
(Fuente: Ramírez, 2008)

En el temple, es muy importante la fase de enfriamiento y la velocidad alta del mismo, además, la temperatura para el calentamiento óptimo debe ser siempre superior a la crítica para poder obtener de esta forma la Martensita. Existen varios tipos de Temple, clasificados en función del resultado que se quiera obtener y en función de la propiedad que presentan casi todos los aceros, llamada Templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del acero.

1.4.2.3 Tratamiento térmico de Revenido

El Revenido es un tratamiento complementario del Temple, que generalmente prosigue a éste. Después del Temple, los aceros suelen quedar demasiados duros y frágiles para los usos a los cuales están destinados. Lo anterior se puede corregir con el proceso de Revenido, que disminuye la dureza y la fragilidad excesiva, sin perder demasiada tenacidad.

Es el tratamiento térmico que sigue a todo temple. El objetivo es modificar y no eliminar los efectos del temple. El revenido consiste en calentar el acero, previamente templado, a

temperaturas inferiores a la crítica A1 (723°C), mantenerlo un tiempo adecuado y luego enfriarlo a temperatura ambiente como se indica en la figura 1.9.

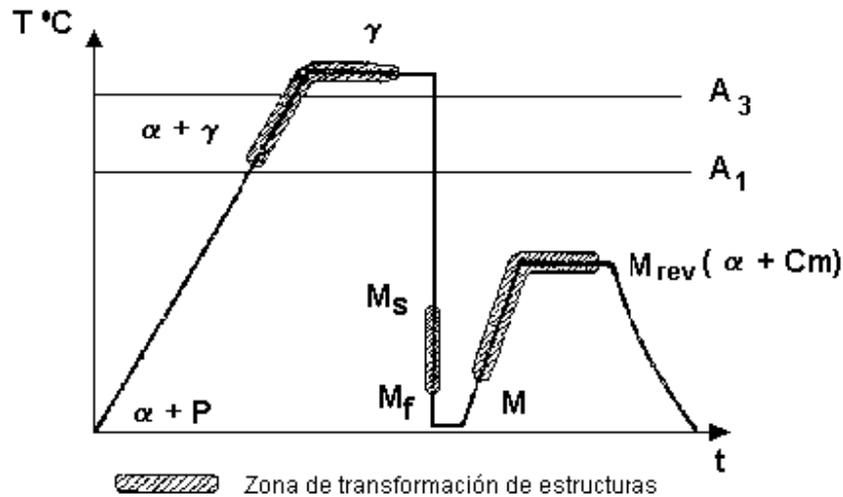


Figura 1.9. Ciclo térmico utilizado en un tratamiento térmico de temple y revenido.
(Fuente: Ramírez, 2008)

1.4.3. Tratamientos térmicos post-soldadura

El tratamiento térmico de alivio de tensiones es utilizado para eliminar o disminuir las tensiones situadas en una estructura como resultado de un proceso de manufactura. Este proceso se lo debe realizar siempre por debajo de la temperatura crítica. Sin embargo, es importante diferenciar el tratamiento térmico de alivio de tensiones del tratamiento térmico posterior a la soldadura, el objetivo de este último es proveer, a más de aliviar las tensiones, mejoras en la estructura y las propiedades del conjunto soldado. Tomando en cuenta el rango de temperaturas a las que se ejecuta las cuales son inferiores a la temperatura de transformación, el tratamiento térmico arrastra un "efecto de revenido" sin que las uniones soldadas tengan componentes de temple, ya sea en la zona que se funde y en la zona afectada por el calor (ZAC).

Se enfatiza que casi en la totalidad de las soldaduras de aleaciones ferríticas, se requiere un tratamiento térmico post-soldadura (PWHT), como una manera de homogenizar la estructura de la junta soldada. Las aleaciones no ferrosas y aleaciones austeníticas pueden necesitar tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) con el objeto de optimizar su resistencia al ambiente. El tratamiento térmico se define por el calentamiento uniforme de la toda la estructura, hasta una temperatura previamente establecida, manteniéndola a esta por un período determinado de tiempo, continuado de un enfriamiento uniforme. El

enfriamiento se lo debe realizar con mucho cuidado en las estructuras que cuentan con variaciones de sección, ya que, si la tasa no es constante, se podrán generar nuevas tensiones ya sean iguales o en ciertos casos superiores, a aquellas cuyo tratamiento intenta disminuir.

Realizar un estudio de cuáles son las razones para que se produzca fisuración es un tema complicado. La fusión incompleta o inclusiones derivan en defectos en el área soldada la cual habitualmente contiene una concentración de tensiones, como resultado de estos defectos se puede generar la fisuración.

Deformaciones provocadas por la solidificación, contracción durante la soldadura y variaciones son responsables de las tensiones residuales que se generan en las juntas soldadas y también perturban el comportamiento a la fatiga de las soldaduras.

2. METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se detalla cada uno de los ensayos que se deben realizar para comparar las propiedades mecánicas y microestructurales de cada una de las probetas soldadas con y sin tratamiento térmico y con esto cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo de titulación.

Para determinar discontinuidades volumétricas en cada una de las probetas soldadas se realizó el Ensayo No Destructivo (END) de ultrasonido. A continuación, se llevó a cabo los respectivos tratamientos térmicos en las probetas según los requerimientos. Posteriormente, se ejecutaron los ensayos de tracción, dureza, Charpy y doblado en el material base y las probetas las cuales permitieron estudiar el comportamiento mecánico de las mismas. Finalmente, se efectuaron los ensayos metalográficos los cuales nos permitirán observar la forma, el tipo, distribución del grano y así poder diferenciar las fases metalográficas en el material base, Zona Afectada por el Calor (ZAC) y el cordón de soldadura.

2.1. Especificación del proceso de soldadura

Para el procedimiento de soldadura se establecieron los parámetros de soldadura como: procesos de soldadura, la temperatura de precalentamiento, tipo de junta, variables eléctricas (voltaje y amperaje), velocidad de soldadura y todas las variables esenciales, no esenciales y esenciales suplementarias; los WPS's, PQR y WPQ que se realizaron se indican en el ANEXO 1.

2.2. Preparación de las probetas

Para las probetas fueron necesarias placas con dimensiones mínimas en base a la norma AWS D1.1, como se indica en la figura 2.1, los biseles de las tres probetas a obtener fueron diseñados con oxi-corte, disco de corte y grata, esto en base a la norma AWS D1.1 mostrado en la figura 2.2.

Se seleccionó un bisel en X para evitar la deformación angular que se produce en espesores grandes cuando se suelda desde un solo lado.

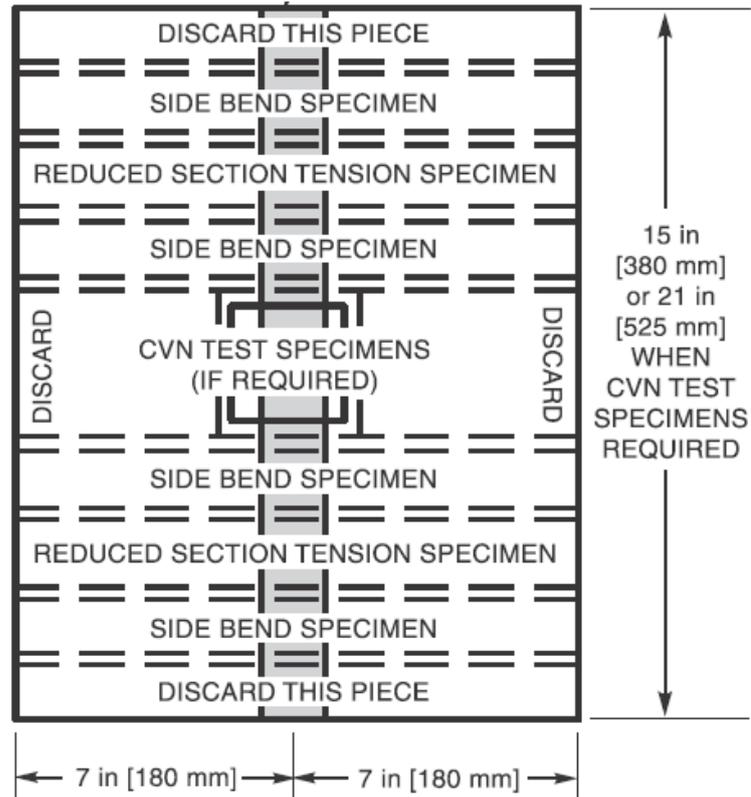


Figura 2.1. Dimensiones de las probetas.
(Fuente: AWS D1.1, 2015)

Welding Process		Joint Designation		Groove Preparation			Allowed Welding Positions	Gas Shielding for FCAW	Notes
				Base Metal Thickness (U = unlimited)		Root Opening			
		T ₁	T ₂	Root Face Groove Angle	As Detailed (see 3.13.1)	As Fit-Up (see 3.13.1)			
SMAW	B-U3b	U	—	R = 0 to 1/8 f = 0 to 1/8 α = β = 60°	+1/16, -0	+1/16, -1/8	All	—	d, e, h, j
GMAW FCAW	B-U3-GF				+1/16, -0	Not limited			
SAW	B-U3c-S	U	—	R = 0 f = 1/4 min. α = β = 60°	+1/16, -0 +1/4, -0 +10°, -0°	+1/16, -0 +1/4, -0 +10°, -5°	F	—	d, h, j

For B-U3c-S only		
T ₁	to	S ₁
Over 2	2-1/2	1-3/8
2-1/2	3	1-3/4
3	3-5/8	2-1/8
3-5/8	4	2-3/8
4	4-3/4	2-3/4
4-3/4	5-1/2	3-1/4
5-1/2	6-1/4	3-3/4
For T ₁ > 6-1/4 or T ₁ ≤ 2 S ₁ = 2/3 (T ₁ - 1/4)		

Figura 2.2. Dimensiones del bisel.
(Fuente: AWS D1.1, 2015)

Con el fin de simular una junta de restricción completa forzando así la generación de grandes esfuerzos durante el proceso de soldadura se procedió a soldar tiras en los cuatro lados de las placas, para que de esta manera no exista deformaciones angulares ni

desplazamientos longitudinales producto del proceso de soldadura, como se indica en la figura 2.3:



Figura 2.3. Placas con junta de restricción completa.
(Fuente: Propia)

2.2.1. Realización de los cordones

Se seleccionó un proceso mixto de soldadura, conformado por un pase de raíz con proceso SMAW y los posteriores pases con el proceso FCAW, repitiéndose este proceso para los dos lados de la junta.

Las tres probetas requirieron un precalentamiento de 65 °C, tal y como se muestra en la figura 2.4 obtenida de la norma AWS D1.1, este proceso se lo llevó a cabo con llama oxi-acetilénica y observando el aumento de la temperatura del material base con la ayuda de un pirómetro hasta que llegue al valor deseado.

Se procedió a realizar los cordones de soldadura (figura 2.5) con las especificaciones definidas en los WPS's.

Table 3.3 (Continued)
Prequalified Minimum Preheat and Interpass Temperature (see 3.5)

C a t e g o r y	Steel Specification	Welding Process	Thickness of Thickest Part at Point of Welding		Minimum Preheat and Interpass Temperature		
			in	mm	°F	°C	
B (Cont'd)	ASTM A537	Classes 1 & 2					
	ASTM A572	Grades 42, 50, 55					
	ASTM A573	Grade 65					
	ASTM A588						
	ASTM A595	Grades A, B, C					
	ASTM A606						
	ASTM A618	Grades Ib, II, III					
	ASTM A633	Grades A, B Grades C, D					
	ASTM A709	Grades 36, 50, 50S, 50W, HPS 50W					
	ASTM A710	Grade A, Class 2 (>2 in [50 mm])					
	ASTM A808						
	ASTM A913 ^b	Grade 50					
	ASTM A992						
	ASTM A1008 HSLAS	Grade 45 Class 1 Grade 45 Class 2 Grade 50 Class 1 Grade 50 Class 2 Grade 55 Class 1 Grade 55 Class 2	SMAW with low- hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	32 ^a	0 ^a
	ASTM A1008 HSLAS-F	Grade 50		Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 incl.	50	10
	ASTM A1011 HSLAS	Grade 45 Class 1 Grade 45 Class 2 Grade 50 Class 1 Grade 50 Class 2 Grade 55 Class 1 Grade 55 Class 2		Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl.	Over 38 thru 65 incl.	150	65

Figura 2.4. Tabla de requerimientos de precalentamiento para espesores mayores a 38 [mm].
(Fuente: AWS D1.1, 2015)

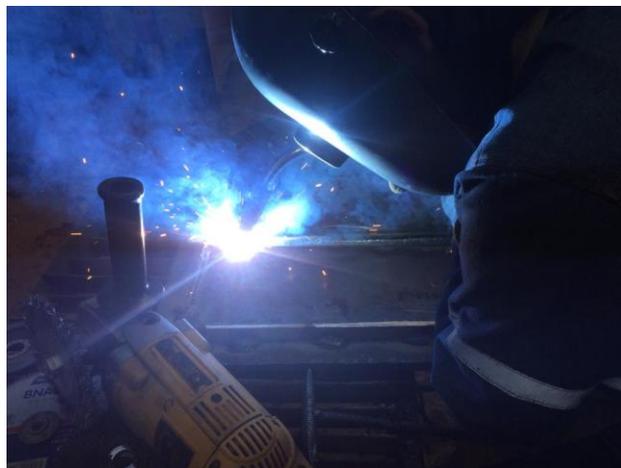


Figura 2.5. Realización del proceso de soldadura.
(Fuente: Propia)

2.2.2. Equipo de soldadura utilizado

En la tabla 2.1 se presentan las especificaciones de la máquina utilizada para el proceso de soldadura.

Tabla 2.1. Especificaciones de la máquina de soldadura.

	Especificaciones	
	Equipo	Soldadora
	Equipo	Soldadora
	Marca	Lincoln Electric
	Modelo	Invertec V350-PRO
	Voltaje de entrada	5-425V / 50 o 60 Hz
	Amperaje de salida	5-425 A max 80 V DC
	Procesos Admisibles	Electrodo revestido, mic, tig, innershield, outthershield corte con arco
	Ciclo de Trabajo	60%

(Fuente: Propia)

2.3. Ultrasonido

El ensayo para las probetas fue realizado en la empresa SINDES ECUADOR S.A. obteniendo el informe respectivo, que se muestra en el ANEXO 2.

2.3.1. Realización del ensayo

- Se empezó con la calibración del equipo, posteriormente se introdujeron datos de la pieza inspeccionada, también se introdujo la norma bajo la cual se realizarán la evaluación de las indicaciones.
- Limpiar la superficie de cualquier imperfección presente, la cual pueda obstaculizar el recorrido del palpador.
- Derramar sobre la pieza el gel ultrasónico y esparcirlo con el palpador sobre toda la superficie que se va a inspeccionar.
- Mover el palpador para realizar la inspección y observar en la pantalla los picos que se generan.
- Este proceso se realiza para los dos lados del cordón de soldadura y para la parte superior e inferior de la placa.

2.3.2. Equipo Utilizado

En la tabla 2.2 se presentan las especificaciones de la maquina utilizada para el ensayo de ultrasonido.

Tabla 2.2. Especificaciones del Equipo de Ultrasonido.

		Especificaciones	
		Equipo	Ultrasonido
		Marca	General Electric
		Modelo	USM Go+
		Tamaño de pantalla	5 pulg.
		Rango de conectores	14,016 mm para onda longitudinal en acero
		Velocidad del sonido	De 1000 a 16000 m/s
		Configuraciones	AWS, DAC, DGS, PRF, etc.

(Fuente: Propia)

2.4. Tratamiento térmico post-soldadura

Dentro de los parámetros de un tratamiento térmico se destacan la temperatura de permanencia, tiempo de permanencia y velocidad de enfriamiento.

Los tratamientos térmicos post-soldadura se los realizó en la empresa Acero de los Andes.

2.4.1. Recocido (Probeta T1)

2.4.1.1. Parámetros

- La temperatura de permanencia se estableció en 650 grados centígrados, debido a que la norma específica una temperatura mínima de 595 grados centígrados como se indica en la figura 2.6.
- El tiempo mínimo de permanencia fue calculado en función al espesor nominal, utilizando una regla de tres simple en base a los datos obtenidos de la figura 2.6:

**Table UCS-56-1
Postweld Heat Treatment Requirements for Carbon and Low Alloy Steels — P-No. 1**

Material	Normal Holding Temperature, °F (°C), Minimum	Minimum Holding Time at Normal Temperature for Nominal Thickness [See UW-40(f)]		
		Up to 2 in. (50 mm)	Over 2 in. to 5 in. (50 mm to 125 mm)	Over 5 in. (125 mm)
P-No. 1 Gr. Nos. 1, 2, 3	1,100 (595)	1 hr/in. (25 mm), 15 min minimum	2 hr plus 15 min for each additional inch (25 mm) over 2 in. (50 mm)	2 hr plus 15 min for each additional inch (25 mm) over 2 in. (50 mm)
Gr. No. 4	NA	None	None	None

Figura 2.6. Tabla UCS-56-1 Requerimientos de tratamientos térmicos post-soldadura para aceros de bajo carbono P-No.1.
(Fuente: ASME, 2017)

Tiempo [horas] Espesor nominal [mm]

1 25

X 40

$$\frac{40 * 1}{25} = 1,6 [horas] = 1 \text{ hora con } 36 \text{ minutos}$$

- El enfriamiento para un proceso de alivio de esfuerzos debe realizarse de la manera más lenta posible, para aceros al carbón ciertos autores recomiendan una velocidad de 100 a 200 grados centígrados por hora por lo que el enfriamiento se efectuó dentro del mismo horno.

2.4.1.2. Curva de Tratamiento de Térmico

Los datos referentes al tratamiento térmico de recocido fueron entregados por parte de la empresa Aceros de los Andes, para posteriormente obtener la curva de dicho tratamiento. En la figura 2.7 se observa las diferentes etapas del tratamiento térmico realizado (Calentamiento, permanencia y enfriamiento).

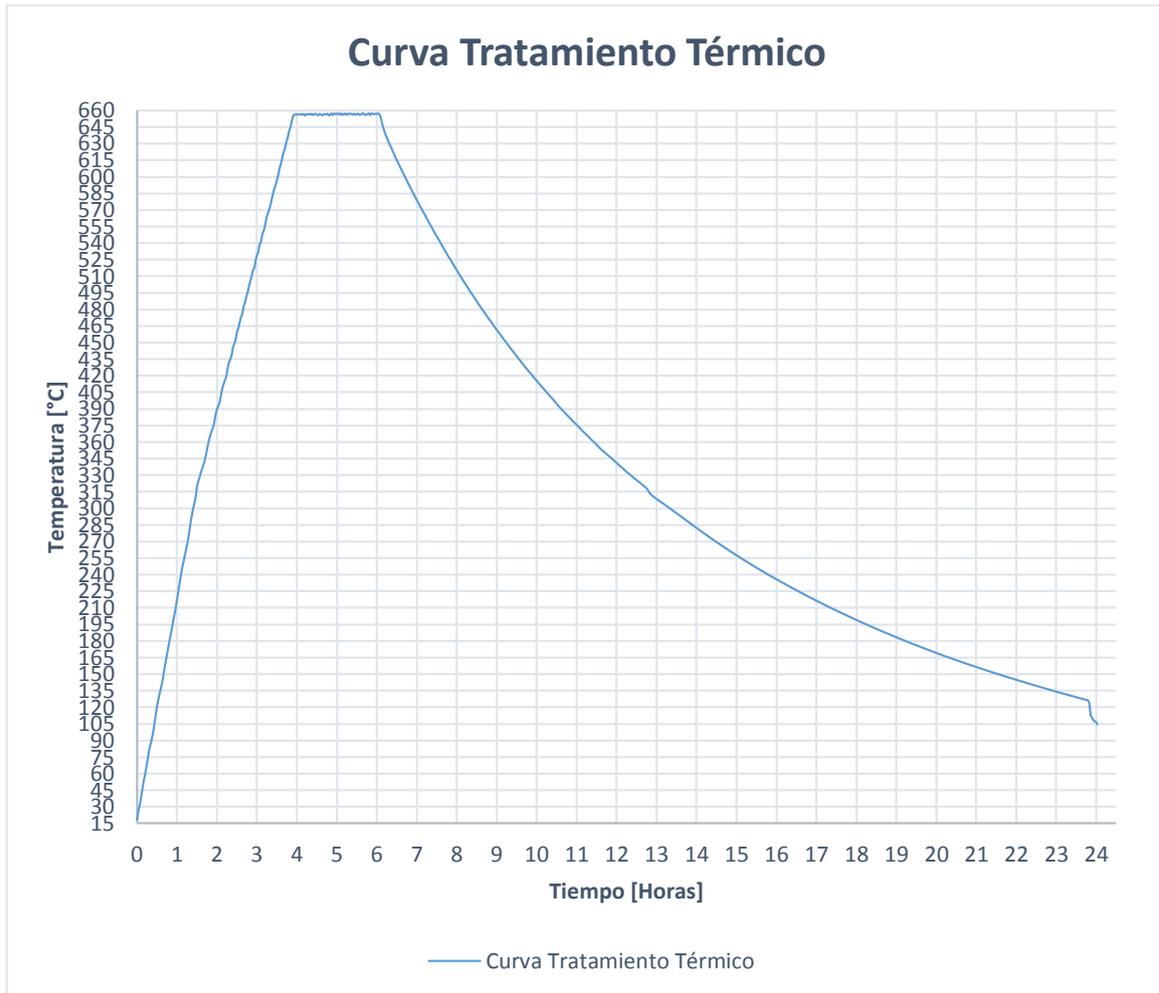


Figura 2.7. Curva de Tratamiento Térmico de Recocido.
(Fuente: Propia)

2.4.2. Revenido (Probeta T2)

2.4.2.1. Parámetros

Un revenido de alivio de esfuerzos comúnmente ejecutado tiene una temperatura de permanencia entre 200 y 275 grados centígrados con un tiempo de permanencia superior a las seis horas dependiendo del espesor. Por lo cual en este caso nuestras condiciones de tratamiento térmico son: tiempo de permanencia ocho horas, temperatura de permanencia de 250 grados centígrados. (Sturla, 1999)

2.4.2.2. Curva de Tratamiento Térmico

Los datos referentes al tratamiento térmico de revenido fueron entregados por parte de la empresa Aceros de los Andes, para posteriormente obtener la curva de dicho tratamiento. En la figura 2.8 se observa las diferentes etapas del tratamiento térmico realizado (Calentamiento, permanencia y enfriamiento).

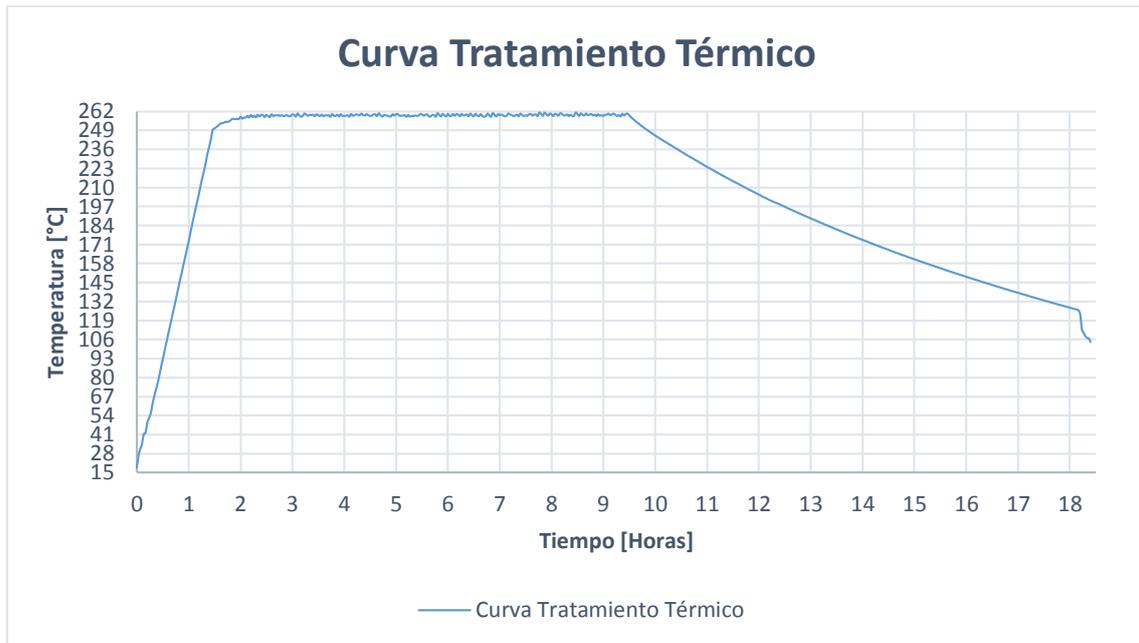


Figura 2.8. Curva del Tratamiento Térmico de Revenido.
(Fuente: Propia)

2.5. Ensayos destructivos

2.5.1. Preparación de las probetas

Las probetas para cada ensayo se proceden a cortar en las dimensiones requeridas en base a cada norma, según se indica en la tabla 2.3:

Tabla 2.3. Normas Aplicadas en cada Ensayo.

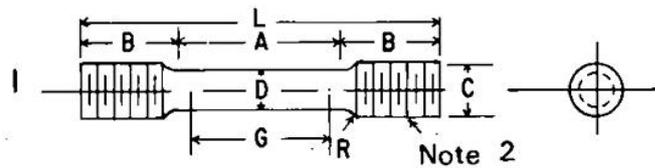
Ensayo	Norma
Tracción	AWS D1.1 y ASTM E8
Doblado	AWS D1.1
Charpy	AWS D1.1 y ASTM E23

(Fuente: Propia)

2.5.2. Ensayo de Tracción

2.5.2.1. Ensayo de Tracción para metal base

Este ensayo es usado para determinar la resistencia a la tracción del material base, las dimensiones mínimas de la probeta son las indicadas en la figura 2.9.



Dimensions, mm [in.]					
For Test Specimens with Gage Length Four times the Diameter [E8]					
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]				
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]				
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	10 [0.375]	2 [0.0625]	10 [0.375]	10 [0.375]
A—Length of reduced section	56 [2.25] min	56 [2.25] min	100 [4] approximate	56 [2.25] min	56 [2.25] min
L—Overall length, approximate	145 [5]	155 [5.5]	155 [5.5]	140 [4.75]	255 [9.5]
B—Length of end section (Note 3)	35 [1.375] approximate	25 [1] approximate	20 [0.75] approximate	15 [0.5] approximate	75 [3] min
C—Diameter of end section	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	22 [0.875]	20 [0.75]
E—Length of shoulder and fillet section, approximate		15 [0.625]	15 [0.625]	20 [0.75]	15 [0.625]
F—Diameter of shoulder		15 [0.625]	15 [0.625]	15 [0.625]	15 [0.625]

Figura 2.9. Dimensiones para la probeta de tracción.
(Fuente: ASTM E8/E8M, 2013)

2.5.2.1.1. Obtención de probetas y realización del ensayo

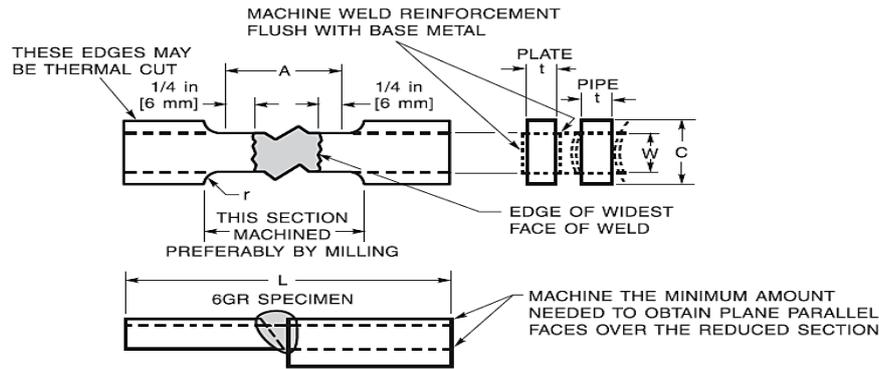
- Se cortó una sección del material base de dimensiones mayores a las especificadas.
- Se redujo las dimensiones de la tira de material base en la limadora del laboratorio de máquinas y herramientas de la Escuela Politécnica Nacional.
- Se procedió a obtener las dimensiones finales de la probeta en el torno disponible en el mismo laboratorio como se presenta en la figura 2.10.
- El ensayo de tracción se lo realizó en el LAEV.



Figura 2.10. Probeta maquinada para el ensayo de tracción del material base.
(Fuente: Propia)

2.5.2.2. Ensayo de tracción para probetas soldadas

Este ensayo es usado para determinar la resistencia a la tracción de la junta soldada, las dimensiones mínimas de la probeta son las indicadas en la figura 2.11.



Dimensions in inches [mm]					
	Test Plate Nominal Thickness, T_p		Test Pipe		
	$T_p \leq 1$ in [25 mm]	1 in [25 mm] < $T_p < 1\text{-}1/2$ in [38 mm]	$T_p \geq 1\text{-}1/2$ in [38 mm]	2 in [50 mm] & 3 in [75 mm] Diameter	6 in [150 mm] & 8 in [200 mm] Diameter or Larger Job Size Pipe
A—Length of reduced section	Widest face of weld + 1/2 in [12 mm], 2-1/4 in [60 mm] min.			Widest face of weld + 1/2 in [12 mm], 2-1/4 in [60 mm] min.	
L—Overall length, min ^a	As required by testing equipment			As required by testing equipment	
W—Width of reduced section ^{b, c}	3/4 in [20 mm] min.	3/4 in [20 mm] min.	3/4 in [20 mm] min.	1/2 ± 0.01 (12 ± 0.025)	3/4 in [20 mm] min.
C—Width of grip section ^{c, d}	W + 1/2 in [12 mm] min.	W + 1/2 in [12 mm] min.	W + 1/2 in [12 mm] min.	W + 1/2 in [12 mm] min.	W + 1/2 in [12 mm] min.
t—Specimen thickness ^{e, f}	T_p	T_p	T_p/n (Note f)	Maximum possible with plane parallel faces within length A	
r—Radius of fillet, min.	1/2 in [12 mm]	1/2 in [12 mm]	1/2 in [12 mm]	1 in [25 mm]	1 in [25 mm]

Figura 2.11. Dimensiones mínimas de la probeta para el ensayo de tracción de las probetas soldadas.
(Fuente: AWS D1.1, 2015)

2.5.2.2.1. Criterios de aceptación

La resistencia a la tracción no debe ser menor al valor mínimo de la resistencia a la tracción del metal base. (AWS D1.1, 2015)

2.5.2.2.2. Realización del ensayo

- Se cortó varias secciones de las placas anteriormente soldadas de dimensiones mayores a las especificadas, en la sierra semiautomática refrigerada mediante agua disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional, con discos de corte de 14 [pulg].
- Se redujo las dimensiones de cada una de las secciones obtenidas en el paso anterior, en la limadora del Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Escuela Politécnica Nacional hasta obtener dimensiones próximas a las especificadas.
- Se procedió a obtener las dimensiones finales de la probeta en la rectificadora disponible en el dicho Laboratorio; las dimensiones finales varían entre probetas, pero todas cumplen con la norma AWS D1.1.

- Mediante una amoladora pequeña y una lima se obtuvo los radios de las probetas, obtenido así las dimensiones finales de las probetas, como se indica en la figura 2.12.

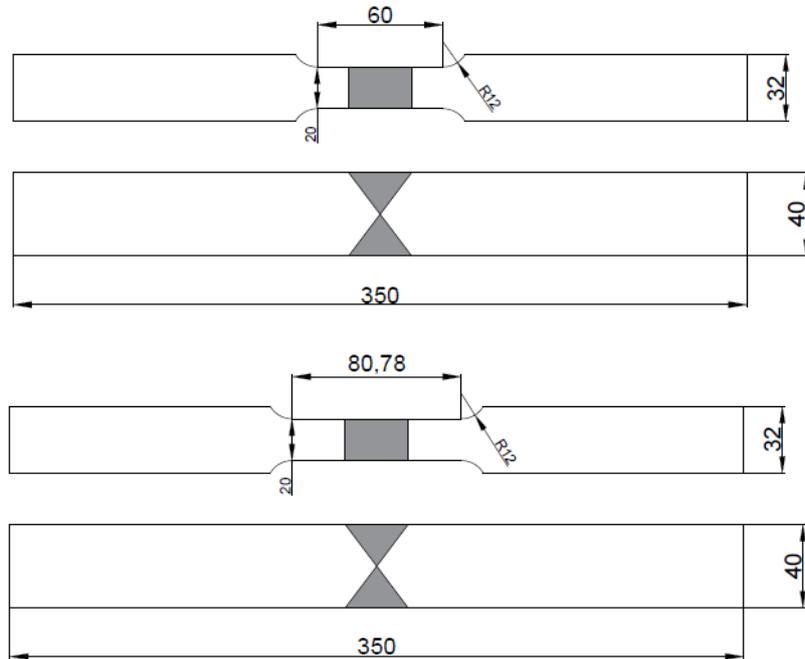


Figura 2.12. Dimensiones finales de las probetas de ensayo de tracción de las juntas soldadas.
(Fuente: Propia)

En la figura 2.13 se presentan todas las probetas mecanizadas listas para realizar el ensayo correspondiente.



Figura 2.13. Probetas maquinadas para el ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

2.5.3. Ensayo de Doblado Lateral

Este ensayo nos permite determinar la ductilidad y el grado de rigidez de la junta soldada, cada probeta es doblada en una matriz que cumpla con las especificaciones de la norma, las dimensiones mínimas de la probeta son indicadas en la figura 2.14.

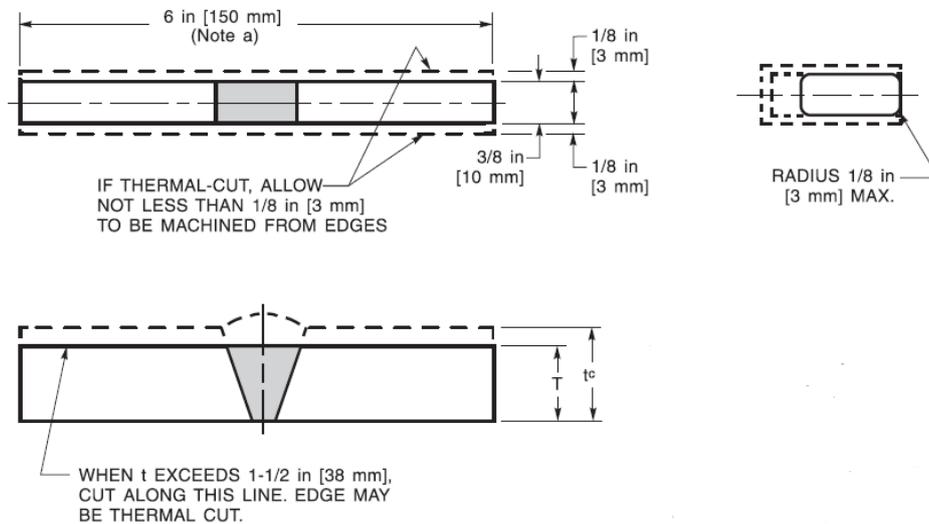


Figura 2.14. Dimensiones mínimas de las probetas de doblado lateral.
(Fuente: AWS D1.1, 2015)

2.5.3.1. Criterios de aceptación

La superficie convexa de las probetas será examinada para observar si existen discontinuidades superficiales. La superficie no deberá contener discontinuidades que superen las siguientes dimensiones:

- 3 [mm] (1/8 pulg) medida en cualquier dirección de la superficie.
- 10 [mm] (3/8 pulg) la suma de todas las discontinuidades que excedan 1 mm [1/32 pulg] y que son menores o igual a 3 [mm] (1/8 pulg).
- 6 [mm] (1/4 pulg) la máxima grieta esquinera; excepto cuando esta fue consecuencia por una inclusión de escoria visible o de otra discontinuidad, entonces se deberá aplicar la dimensión de 3 [mm] (1/8 pulg); probetas que posean grietas esquineras con dimensiones superiores a 6 [mm] (1/4 pulg) sin evidencias de ser producto de inclusiones de escorias u otra discontinuidad deben ser rechazadas y reemplazadas por otra probeta obtenida del cordón original. (AWS D1.1, 2015)

2.5.3.2. Realización del ensayo

- Se cortó varias secciones de las placas soldadas de dimensiones mayores a las especificadas en la sierra semiautomática refrigerada mediante agua, disponible en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional, con discos de corte de 14 [pulg].
- Se redujo las dimensiones de cada una de las secciones, obtenidas en el paso anterior, en la limadora del Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Escuela Politécnica Nacional hasta obtener dimensiones próximas a las especificadas.
- Se procedió a obtener las dimensiones finales de la probeta en la rectificadora disponible en el dicho Laboratorio, como se indica en la figura 2.15.
- Antes de realizar el ensayo, usando un disco Flaper, se procedió a lijar la zona del cordón de soldadura para poder observar cualquier indicación que se produzca durante el ensayo (figura 2.16).
- Se procedió a realizar el ensayo de doblado en la máquina disponible del Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional (figura 2.17).

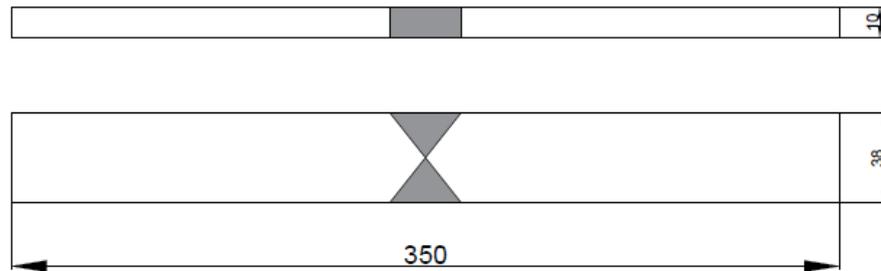


Figura 2.15. Dimensiones finales de las probetas para el ensayo de doblado lateral.
(Fuente: Propia)



Figura 2.16. Probetas maquinadas para el ensayo de doblado lateral.
(Fuente: Propia)



Figura 2.17. Realización del ensayo de doblado.
(Fuente: Propia)

2.5.3.3. Equipo utilizado

En la tabla 2.4 se presentan las especificaciones técnicas del equipo utilizado para la realización del ensayo.

Tabla 2.4. Especificaciones de la máquina para ensayos de doblado.

	Especificaciones	
	Equipo	Doblado
	Marca	
	Modelo	Proyecto de tesis
	Presión máxima	2000 psi
	Potencia del motor	2 HP
	Velocidad de giro del motor	1720 rpm
	Frecuencia	60 Hz
	Eficiencia del motor	82,3 %

(Fuente: Propia)

2.5.4. Ensayo Charpy

Este ensayo nos permite determinar la tenacidad de la junta soldada; cada probeta es impactada por medio de un péndulo con el fin de fracturar la probeta; las dimensiones mínimas de la probeta son indicadas en la figura 2.18.

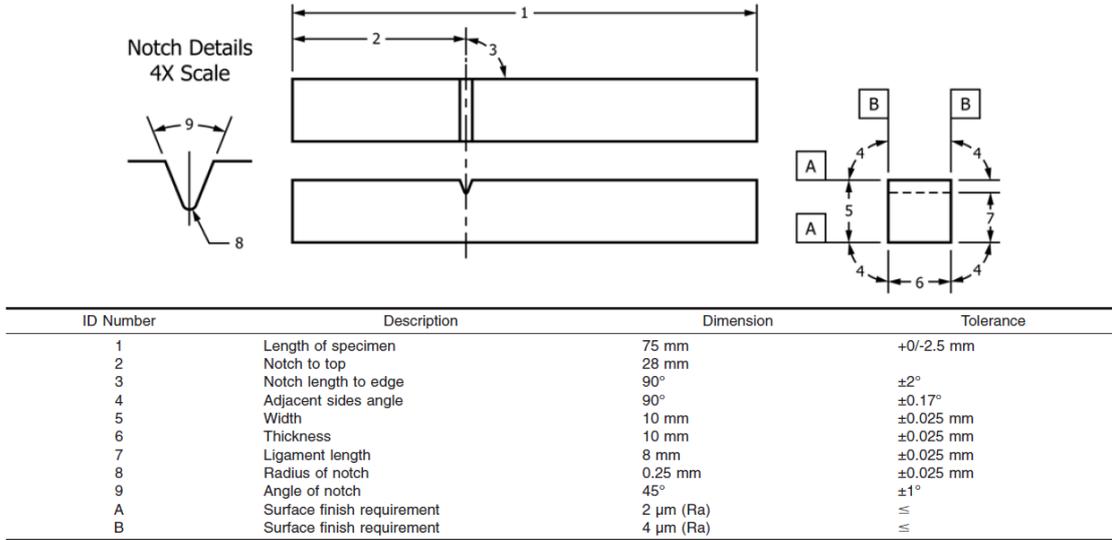


Figura 2.18. Dimensiones para las probetas de ensayo Charpy.
(Fuente: ASTM E23, 2018)

2.5.4.1. Criterios de aceptación

Los valores obtenidos durante el ensayo de impacto deben ser iguales o mayores según corresponde en la figura 2.19.

Welding Process ^a	Test Location	Number of Specimens ^b	Test Temperature °F/°C	Specimen Size, ^d mm	Minimum Average Absorbed Energy, ^e ft-lbf [J]	Minimum Individual Absorbed Energy, ^e ft-lbf [J]	Minimum Average Percent Shear Area,	Minimum Average Lateral Expansion, Mils/mm
SMAW	Weld Metal	3	(Note c)	10 × 10	20 [27]	15 [20]	(Note f)	(Note f)
GTAW	Fusion Line +1 mm	3	(Note c)	10 × 10	20 [27]	15 [20]	(Note f)	(Note f)
GMAW								
SAW								
ESW	Fusion Line +5 mm	3	(Note c)	10 × 10	20 [27]	15 [20]	(Note f)	(Note f)
EGW								
FCAW-S FCAW-G								

Figura 2.19. Requerimientos para el ensayo Charpy.
(Fuente: AWS D1.1, 2015)

2.5.4.2. Realización del ensayo

- Se cortó varias secciones de las placas soldadas siguiendo el mismo proceso de los ensayos anteriores; se estableció la ubicación de extracción de las probetas en base a la norma AWS D1.1 (figura 2.20) para proceder a reducir las dimensiones de estas secciones usando la limadora y rectificadora del Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Escuela Politécnica Nacional.
- Con las probetas ya con las dimensiones especificadas en la figura 2.18, se realizó la muesca en la limadora a cada una de ellas (figura 2.21.), con una cuchilla especial, para que estén listas para proceder con el ensayo.
- Se Enfrío las probetas con hielo seco hasta la temperatura de -21 grados centígrados, que especifica la norma. Al llegar a esta temperatura se procede a colocar una a una las probetas en la máquina de tipo péndulo del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de Escuela Politécnica Nacional.
- Se tomó los datos para cada probeta y después compararlos.

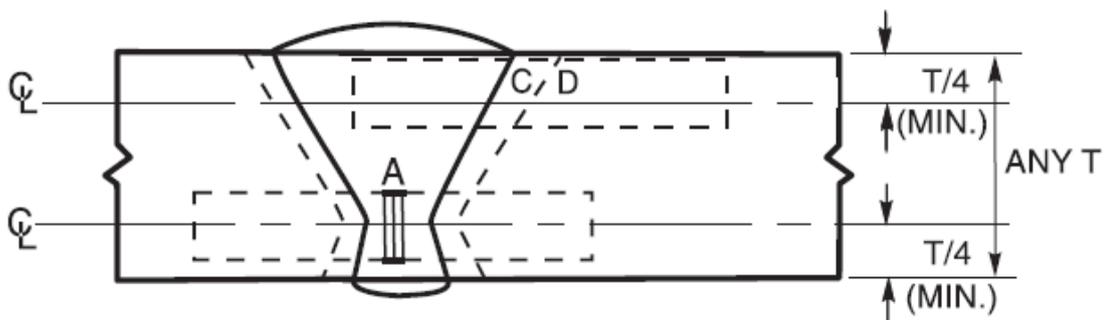


Figura 2.20. Ubicación de las probetas para el ensayo Charpy.
(Fuente: AWS D1.1, 2015)

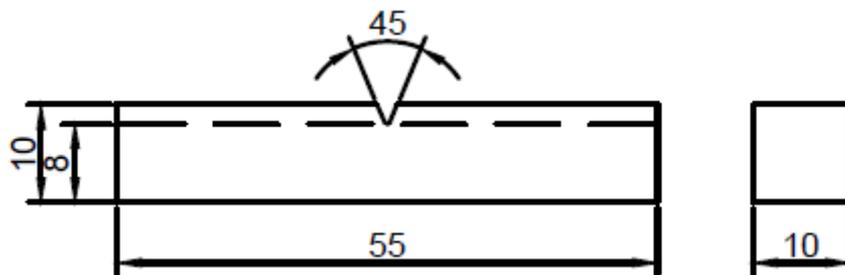


Figura 2.21. Dimensiones finales de las probetas para ensayo Charpy.
(Fuente: Propia)

2.5.4.3. Equipo Utilizado

En la tabla 2.5 se presentan las especificaciones técnicas del equipo utilizado para la realización del ensayo.

Tabla 2.5. Especificaciones de la máquina para ensayo Charpy.

	Especificaciones	
	Equipo	Charpy
	Marca	Tinius Olsen
	Modelo	N/A
	Capacidad	264 ft/inch

(Fuente: Propia)

2.5.5. Ensayo de Dureza

Este ensayo nos permite determinar la resistencia a la indentación de un material, también es usado como un indicador de la maquinabilidad, tenacidad y resistencia al desgaste del material. Existen varias escalas para la medición de la dureza de un material, pero la más utilizada es la escala Rockwell, la cual posee tres escalas dependiendo de la carga aplicada y el tipo de indentador. Por medio de este ensayo se podrá observar la variación de la dureza en el metal base, ZAC y el cordón de soldadura debido a los tratamientos térmicos y también al proceso de soldadura en sí.

2.5.5.1. Realización del ensayo

Se realizaron 15 tomas de durezas en varias zonas (superior, central e inferior) del cordón de soldadura como se indican en el esquema indicado en la figura 2.22.

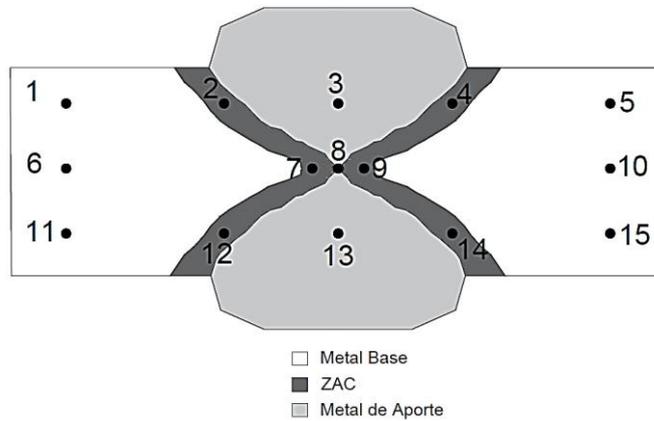


Figura 2.22. Esquema de toma de durezas.
(Fuente: Propia)

Debido a la variación de dureza de las diferentes zonas, fue necesario cambiar de escala entre Rockwell B y Rockwell C dependiendo de la zona a analizar.

Para obtener un valor de referencia, este se procedió a calcular por medio de la ecuación 4 la cual relaciona la resistencia última a la tracción (S_{ut}) con la dureza (HB) por medio de una constante de proporcionalidad (k_h), (Mikell, G, 2017)

$$S_{ut} = k_h * HB \quad (4)$$

Despejando HB de la ecuación 4 obtenemos:

$$HB = \frac{S_{ut}}{k_h} = \frac{450}{3,45} = 130,44 HB$$

Donde:

$$k_h = 3,45$$

$$S_{ut} = 450 \text{ [MPa]}$$

2.5.5.2. Equipo Utilizado

En la tabla 2.6 se presentan las especificaciones técnicas del equipo utilizado para la realización del ensayo.

Tabla 2.6. Especificaciones de la máquina para ensayo de dureza.

Especificaciones	
Equipo	Dureza
Marca	Mitutoyo
Modelo	DT-10
Capacidad de carga	60, 100, 150 kgf
Peso	60 kg
Indentadores	Punta de acero de 1/16 pulg. / Cono de diamante
Dimensiones	70 x 79 x 21,5 cm



(Fuente: Propia)

El barrido de dureza es realizado, los resultados obtenidos son tabulados para luego compararlos.

2.6. Ensayo de Metalografía y Macrografía

Estos ensayos nos permiten observar la microestructura y macroestructura de las diferentes zonas que se presentan después del proceso de soldadura.

2.6.1. Obtención de probetas y realización del ensayo

- Se cortó secciones de cada una de las placas y luego rectificamos las dimensiones de estas, hasta obtener probetas las cuales sean fáciles de manipular.
- Se desbastó manualmente a cada una de las probetas con lijas # 240, 320, 500, 1200 y 1500 respectivamente.
- Se procedió al pulido de cada una de las probetas, primeramente, en paño con alúmina de $0,3 \mu$ y luego en paño con agua hasta que las probetas estén listas para seguir con el ensayo.
- Se colocó las probetas una a una en el equipo de macrografía para obtener las fotografías para su posterior comparación. Para las macrografías no se necesita realizar ataque químico.
- Se colocó las probetas una a una en el equipo de micrografía para obtener las fotografías antes de realizar el ataque químico.
- Se realizó el ataque químico a las probetas con Nital al 2% durante 20 segundos por 2 ocasiones, de tal forma que se pueda observar correctamente la microestructura de cada una y poder obtener las fotografías para posteriormente compararlas.

2.6.2. Equipo Utilizado

En la tabla 2.7 y 2.8 se presentan las especificaciones técnicas del equipo utilizado para la realización de los ensayos de macrografía y micrografía respectivamente.

Tabla 2.7. Especificaciones del equipo para ensayo de macrografía.

	Especificaciones	
	Equipo	Macrografía
	Marca	OLYMPUS
	Modelo	GX41
	Serie	4D41167
	Peso	20,8 kg
	Voltaje	100-200 / 230-240 V
	Frecuencia	50/60 Hz

(Fuente: Propia)

Tabla 2.8. Especificaciones del equipo para el ensayo de micrografía.

	Especificaciones	
	Equipo	Micrografía
	Marca	OLYMPUS
	Modelo	SZX7
	Capacidad	40X
	Voltaje	100-200 / 230-240 V
	Software	Stream Essentials

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante los ensayos realizados al material base y las probetas soldadas son presentados en este capítulo con la finalidad de ser discutidos, analizados y comparados entre si según las normas AWS D1.1 y ASTM A-572 y así poder determinar el comportamiento mecánico y metalúrgico en cada una de las muestras analizadas.

3.1. Resultados para el metal base

3.1.1. Ensayo de tracción

Los resultados obtenidos para el ensayo de tracción realizado en el LAEV, se los detalla en la tabla 3.1. El informe que respalda esta información se la puede observar en el ANEXO 3.

Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción para el material base.

Tipo	Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación mínimo 50 mm
	ksi	MPa	ksi	MPa	
Material Base	62,8	432,9	81,2	559,9	36,2

(Fuente: LAEV, 2018)

En la figura 3.1 se puede observar la probeta del material base luego de haberse realizado en ensayo de tracción y la sección transversal de la zona de fractura de la probeta.



Figura 3.1. Probeta ensayada del Metal Base y sección transversal.
(Fuente: Propia)

3.1.2. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se lo realizó en el LAEV, los resultados se muestran en la tabla 3.2, además del promedio para la muestra ensayada.

Tabla 3.2. Resultados del ensayo de dureza del material base.

Indentación	Dureza	Dureza Promedio	
	HRB	HRB	HB
1	81	81,33	151,33
2	83,5		
3	79,5		

(Fuente: LAEV, 2018)

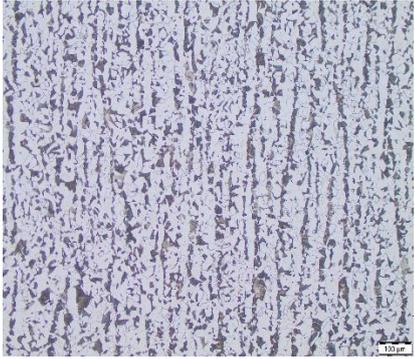
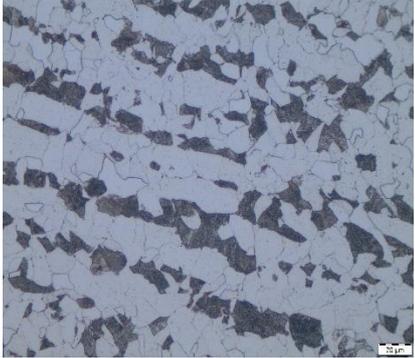
3.1.3. Ensayo metalográfico

Las metalografías para el material base se observan en la tabla 3.3. Las micrografías se las obtuvieron sin realizar el ataque químico y con ataque químico de Nital al 2%, con ampliificaciones de 100X y 500X.

Tabla 3.3. Resultados del ensayo de metalografía para el material base.

Tipo	Ampliación	Observación	Micrografía
Material base Sin ataque	100X	Presencia de inclusiones en menor cantidad	
	500X	Presencia de inclusiones no metálicas	

Continuación Tabla 3.3.

Material base Con ataque	100X	Perlita y ferrita alineada en la dirección del laminado	
	500X	Se observa mayor presencia de ferrita que perlita	

(Fuente: LMDF, 2018)

3.2. Resultados para las probetas soldadas

3.2.1. Ensayo de Tracción

Como se mencionó en el capítulo anterior, los ensayos de tracción para las probetas soldadas se los realizó en el INEN (ANEXO 4). En la tabla 3.4, se presentan los resultados obtenidos en dichos ensayos.

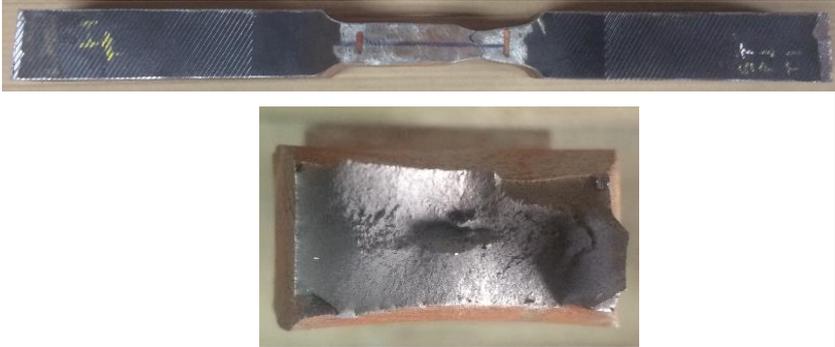
Tabla 3.4. Resultados obtenidos en el ensayo de tracción de las probetas soldadas.

Probeta	Resistencia mínima a la Tracción		Observación	Calificación
	ksi	MPa		
ST-1	88,78	584,27	Fractura en Metal Base	Aprobado
ST-2	89,36	616,13	Fractura en Metal Base	Aprobado
T1-1	78,92	544,15	Fractura en Metal Base	Aprobado
T1-2	79,81	550,26	Fractura en Metal Base	Aprobado
T2-1	86,29	594,92	Fractura en Metal Base	Aprobado
T2-2	81,59	562,57	Fractura en Metal Base	Aprobado

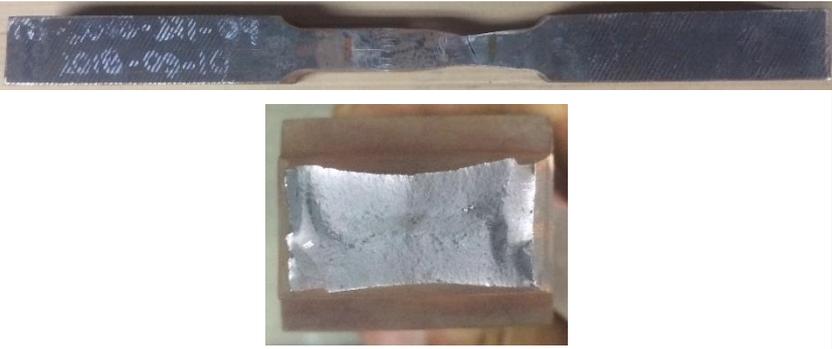
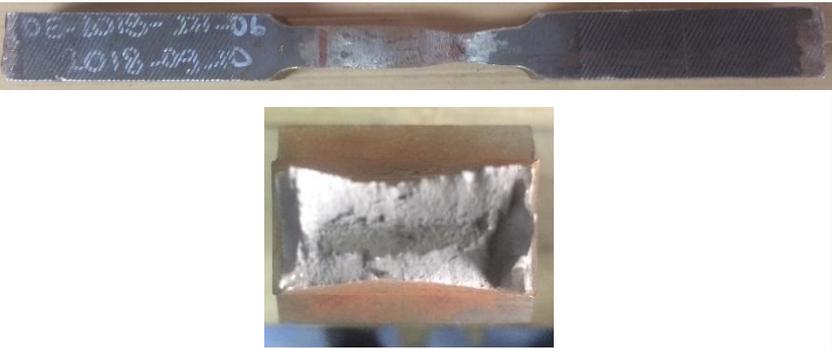
(Fuente: INEN, 2018)

En la tabla 3.5 se muestra las probetas ensayadas y la sección transversal de cada una de ellas.

Tabla 3.5. Especificación del Tipo de Fractura.

Probeta	Imagen	Tipo de fractura
ST-1		Dúctil
ST-2		Dúctil
T1-1		Dúctil

Continuación Tabla 3.5.

T1-2		Dúctil
T2-1		Dúctil
T2-2		Dúctil

(Fuente: Propia)

3.2.2 Ensayo de Doblado

3.2.2.1 Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST)

En la tabla 3.6, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de doblado para las probetas sin tratamiento térmico.

Tabla 3.6. Resultados del ensayo de doblado para probetas sin tratamiento térmico.

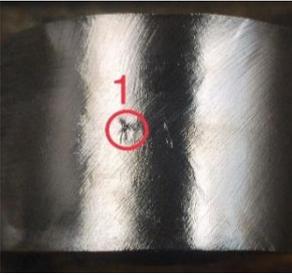
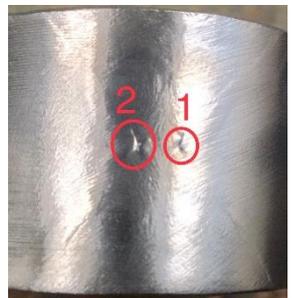
Probeta	Observación	Imagen	Calificación	Calificación Global
ST-1	Indicaciones: 1. 3 [mm] 2. 6 [mm]		No Aprobado	No Aprobado
ST-2	Indicaciones: 1. 2,3 [mm] 2. 1,2 [mm] 3. 1,7 [mm] 4. 3,7 [mm] 5. 3,3 [mm]		No Aprobado	
ST-3	Indicaciones: 1. 2 [mm] 2. 4,4 [mm]		No Aprobado	No Aprobado
ST-4	Indicaciones: 1. 2,7 [mm]		Aprobado	

(Fuente: Propia)

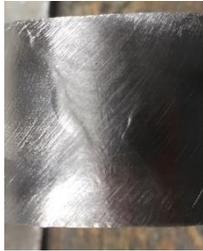
3.2.2.2 Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2)

En la tabla 3.7, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de doblado para las probetas con tratamiento térmico.

Tabla 3.7. Resultados del ensayo de doblado para probetas con tratamiento térmico.

Probeta	Observación	Imagen	Calificación	Calificación Global
T1-1	Sin indicaciones		Aprobado	Aprobado
T1-2	Sin indicaciones		Aprobado	
T1-3	Indicaciones: 1. 1,4 [mm]		Aprobado	Aprobado
T1-4	Indicaciones: 1. 2 [mm] 2. 2,5 [mm]		Aprobado	

Continuación Tabla 3.7.

T2-1	Indicaciones: 1. 3,7 [mm]		No Aprobado	No Aprobado
T2-2	Indicaciones: 1. 1,5 [mm] 2. 1 [mm]		Aprobado	
T2-3	Sin indicaciones		Aprobado	
T2-4	Indicaciones: 1. 3 [mm] 2. 2,5 [mm]		Aprobado	

(Fuente: Propia)

3.2.3 Ensayo Charpy

A continuación, se muestran los resultados y la calificación para el ensayo Charpy realizado en el LAEV (ANEXO 3) para las probetas con y sin tratamiento térmico.

3.2.3.1 Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST)

En la tabla 3.8 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo Charpy para la probeta sin tratamiento térmico.

Tabla 3.8. Resultados y calificación del ensayo Charpy para la probeta sin tratamiento térmico.

Probeta	Ubicación de la muesca	Energía Individual Absorbida		Energía Promedio Absorbida		Calificación	
		lbf-ft	J	lbf-ft	J	Individual	Promedio
ST-1	Centrada	26	35	27,33	37	Aprobado	Aprobado
ST-2	Centrada	24	33			Aprobado	
ST-3	Centrada	32	43			Aprobado	
ST-1-1	+ 5[mm] línea de fusión	88	119	70,67	95,67	Aprobado	Aprobado
ST-2-1	+ 5[mm] línea de fusión	60	81			Aprobado	
ST-3-1	+ 5[mm] línea de fusión	64	87			Aprobado	

(Fuente: propia)

3.2.3.2 Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2)

En las tablas 3.9 y 3.10 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo Charpy para las probetas con tratamiento térmico.

Tabla 3.9. Resultados y calificación del ensayo Charpy para probetas tratadas térmicamente (T2).

Probeta	Ubicación de la muesca	Energía Individual Absorbida		Energía Promedio Absorbida		Calificación	
		lbf-ft	J	lbf-ft	J	Individual	Promedio
T2-1	Centrada	32	43	22	29,67	Aprobado	Aprobado
T2-2	Centrada	22	30			Aprobado	
T2-3	Centrada	12	16			No aprobado	
T2-1-1	+ 5[mm] línea de fusión	28	38	56	76	Aprobado	Aprobado
T2-2-1	+ 5[mm] línea de fusión	34	46			Aprobado	
T2-3-1	+ 5[mm] línea de fusión	106	144			Aprobado	

(Fuente: propia)

Tabla 3.10. Resultados y calificación del ensayo Charpy para probetas tratadas térmicamente (T1).

Probeta	Ubicación de la muesca	Energía Individual Absorbida		Energía Promedio Absorbida		Calificación	
		lbf-ft	J	lbf-ft	J	Individual	Promedio
T1-1	Centrada	52	71	61,33	83,33	Aprobado	Aprobado
T1-2	Centrada	68	92			Aprobado	
T1-3	Centrada	64	87			Aprobado	
T1-1-1	+ 5[mm] línea de fusión	120	163	120,67	163,67	Aprobado	Aprobado
T1-2-1	+ 5[mm] línea de fusión	66	89			Aprobado	
T1-3-1	+ 5[mm] línea de fusión	176	239			Aprobado	

(Fuente: propia)

3.2.4 Ensayo de Dureza

3.2.4.1 Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST)

En la tabla 3.11, se muestra los resultados del ensayo de dureza realizado a las probetas que no se realizó el tratamiento térmico.

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de dureza para probetas sin tratamiento térmico.

Zona	Barrido Superior			Barrido Central			Barrido Inferior		
	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB
MB	82	-	156	82	-	156	86	-	169
ZAC	-	22,5	239	-	21	231	-	18	214
MA	86,5	-	170,5	-	20,5	228	89	-	180
ZAC	-	17,5	212	-	22	236	-	16	204
MB	82	-	156	84	-	162	85	-	165

(Fuente: Propia)

3.2.4.2 Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2)

En las tablas 3.12 y 3.13 se muestran los resultados de los ensayos realizados a las probetas con tratamiento térmico.

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de dureza para probetas con tratamiento térmico (T1).

Zona-T1	Barrido Superior			Barrido Central			Barrido Inferior		
	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB
MB	80	-	150	78,5	-	145,5	81	-	153
ZAC	85	-	165	89	-	180	86	-	169
MA	84	-	162	-	10	173	85	-	165
ZAC	86	-	169	88	-	176	87	-	172
MB	80	-	150	80	-	150	81,5	-	154,5

(Fuente: Propia)

Tabla 3.13. Resultados del ensayo de dureza para probetas con tratamiento térmico (T2).

Zona-T2	Barrido Superior			Barrido Central			Barrido Inferior		
	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB
MB	87	-	172	79	-	147	81	-	153
ZAC	-	11	178	-	16	204	-	13	186
MA	86,5	-	169,5	-	15	199	88	-	176
ZAC	-	12	183	-	16	204	-	11	178
MB	83	-	159	81	-	153	88	-	176

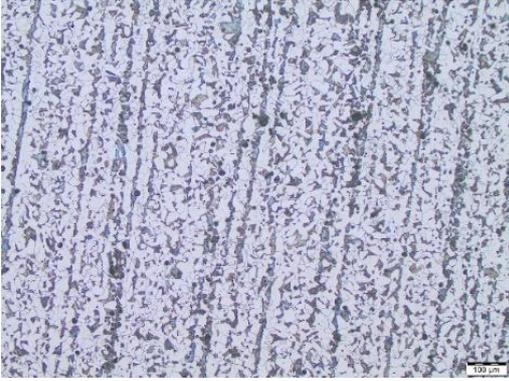
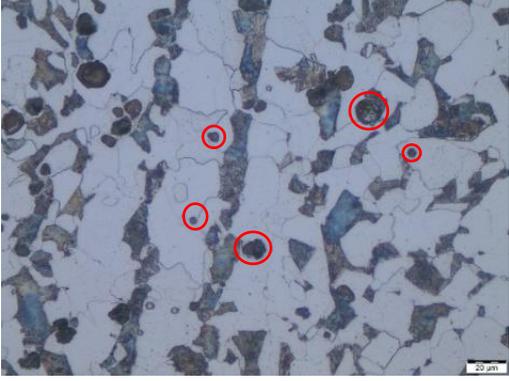
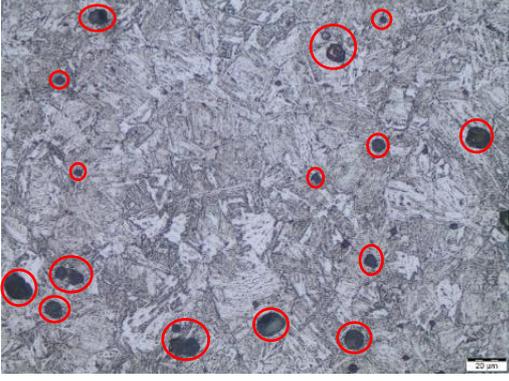
(Fuente: Propia)

3.2.5 Ensayo de Metalografía

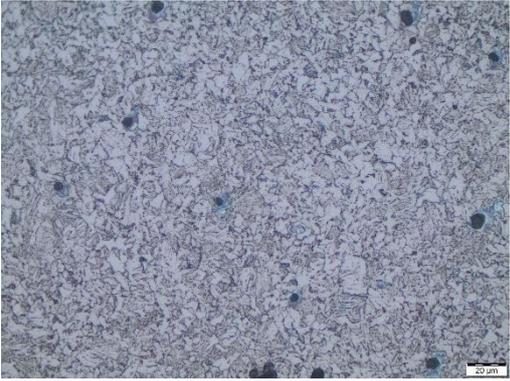
3.2.5.1 Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST)

En la tabla 3.14, se muestra los resultados del ensayo micrográfico realizado a las probetas que no se realizó el tratamiento térmico.

Tabla 3.14. Resultados del ensayo micrográfico para probetas sin tratamiento térmico (ST).

ID	Posición	Ampliación	Imagen	Observaciones
ST	Material base con ataque químico	100X		Perlita y ferrita alineada en la dirección del laminado
	Material base con ataque químico	500X		Tamaño de grano no homogéneo Presencia de inclusiones no metálicas
	Zona afectada por el calor con ataque químico zona superior	500X		Ferrita alotropomórfica ferrita poligonal, ferrita con martensita tipo listón/austenita/ alineada inclusiones no metálicas

Continuación Tabla 3.14.

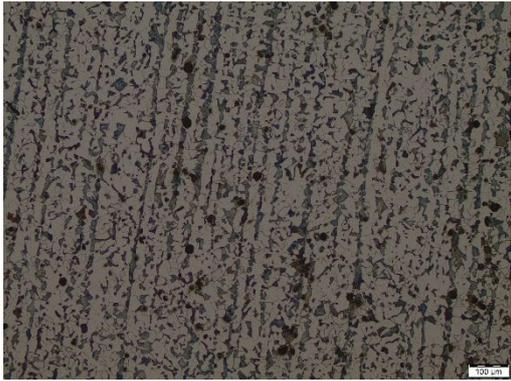
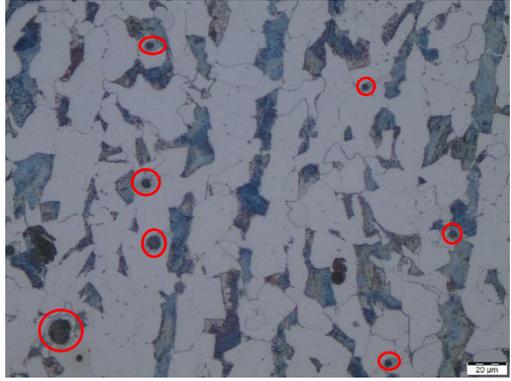
ST	Zona afectada por el calor con ataque químico zona central	500X		Descomposición de martensita en ferrita y cementita
----	--	------	--	---

(Fuente: LMDF, 2018)

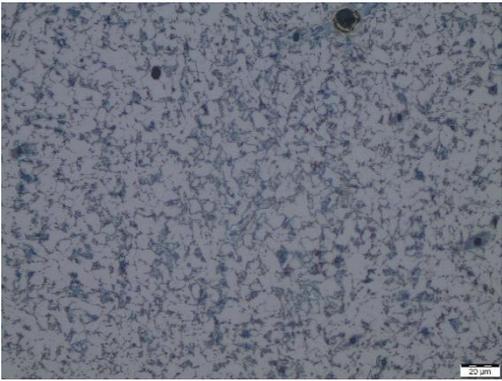
3.2.5.2 Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2)

En las tablas 3.15 y 3.16, se muestra los resultados del ensayo micrográfico realizado a las probetas con tratamiento térmico.

Tabla 3.15. Resultados del ensayo micrográfico para probetas con tratamiento térmico (T1).

ID	Posición	Ampliación	Imagen	Observaciones
T1	Material base con ataque químico	100X		Perlita y ferrita alineada en la dirección del laminado
	Material base con ataque químico	500X		Tamaño de grano no homogéneo Presencia de inclusiones no metálicas

Continuación Tabla 3.15.

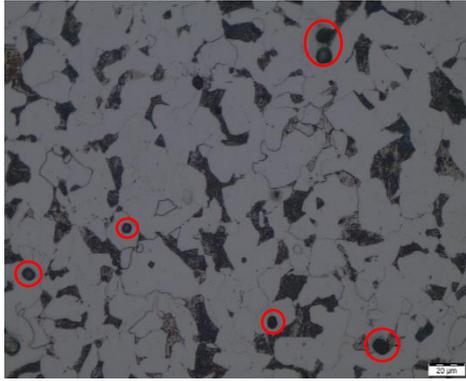
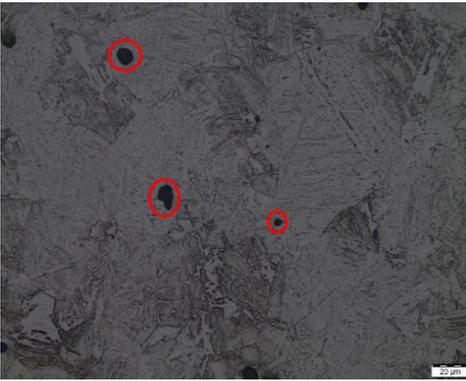
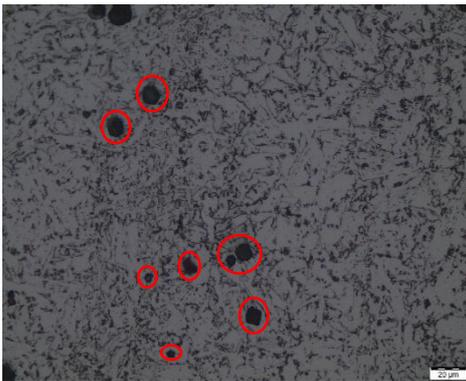
T1	Zona afectada por el calor con ataque químico zona superior	500X		Descomposicion de martensita en ferrita y cementita.
	Zona afectada por el calor con ataque químico zona central	500X		Presencia de granos refinados de ferrita y perlita, en su mayoría se encuentra ferrita poligonal y perlita fina Poca presencia de cementita.

(Fuente: LMDF,2018)

Tabla 3.16. Resultados del ensayo micrográfico para probetas con tratamiento térmico (T2).

ID	Posición	Ampliación	Imagen	Observaciones
T2	Material base con ataque químico	100X		Perlita degenerada y ferrita

Continuación Tabla 3.16.

T2	Material base con ataque químico	500X		Tamaño de grano no homogéneo Presencia de inclusiones no metálicas
	Zona afectada por el calor con ataque químico zona superior	500X		No hubo una completa descomposición de la martensita. Gran cantidad de ferrita. Pocas inclusiones.
	Zona afectada por el calor con ataque químico zona central	500X		Presencia de Ferrita en gran cantidad y casi nada de cementita. Presencia de inclusiones no metálicas

(Fuente: LMDF, 2018)

3.2.6. Ensayo macrográfico

A continuación, se presentan los resultados referentes al ensayo macrográfico en el que se visualizan las longitudes de todas las ZAC, para posteriormente ser evaluadas y analizadas.

3.2.6.1. Resultados del ensayo micrográfico para probeta sin tratamiento térmico (ST)

En la figura 3.2 se muestra la macrografía para la probeta sin tratamiento térmico.



Figura 3.2. Macrografía probeta sin tratamiento térmico (ST) (Magnificación 0,4X).
(Fuente: LMDF, 2018)

3.2.6.2. Resultados del ensayo micrográfico para probeta con tratamiento térmico (T1, T2)

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran las macrografías para las probetas con tratamiento térmico.

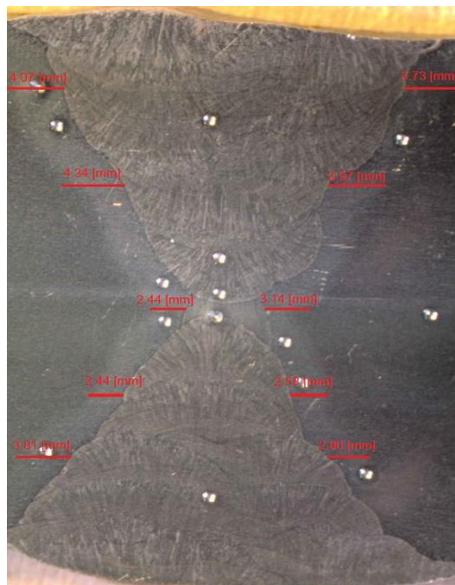


Figura 3.3. Macrografía probeta con tratamiento térmico (T1) (Magnificación 0,4X).
(Fuente: LMDF, 2018)

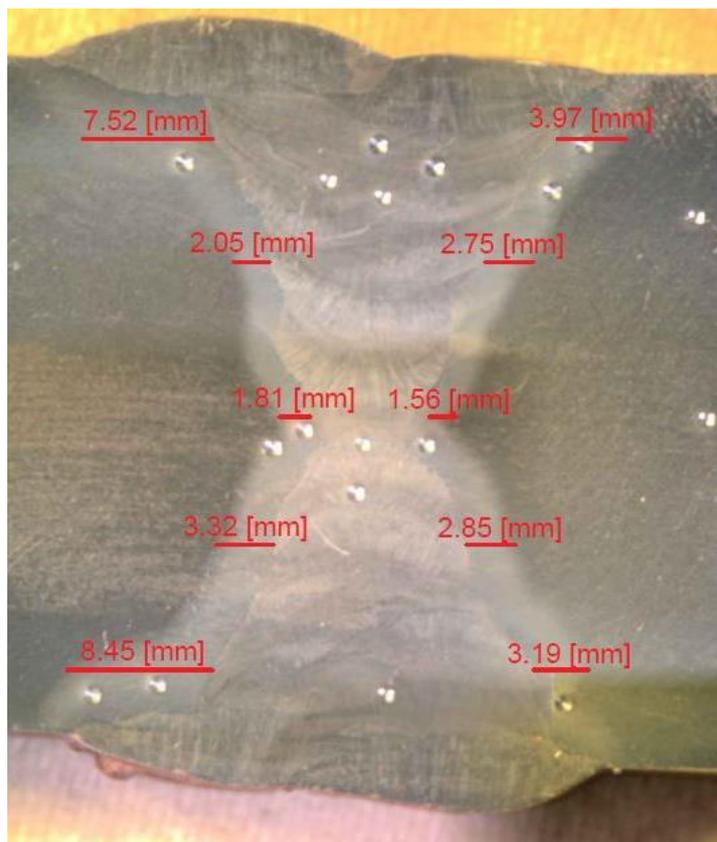


Figura 3.4. Macrografía probeta con tratamiento térmico (T2) (Magnificación 0,4X).
(Fuente: LMDf, 2018)

3.3. Discusión

3.3.1. Discusión para el metal base

3.3.1.1. Comportamiento mecánico del metal base

Se efectuaron ensayos de tracción y dureza en el material base para la comprobación de las propiedades mecánicas con relación a las especificaciones del mismo; para posteriormente establecer relaciones entre las propiedades que se deriven y las especificaciones.

La tabla 3.17 muestra que los valores obtenidos para el ensayo de tracción en el material base, supera los valores mínimos establecidos en la norma ASTM A572.

Tabla 3.17. Comparación de los resultados del ensayo de tracción con referencia a la especificación.

Valor de:	Límite de fluencia	Resistencia a la tracción	% Elongación en 50 mm
	ksi	ksi	
Norma ASTM A572 Gr. 50 (mínimo)	50	65	21
Probeta ensayada	62,8	81,2	36,2

(Fuente: Propia)

La probeta de metal base mostrada en la figura 3.1 presenta una fractura de tipo dúctil debido a la elevada deformación plástica que se produjo; lo que es evidenciado con el porcentaje de elongación (36,2 %) que se originó en el ensayo, seguido de una reducción en el área de la sección de estrangulamiento con respecto al área de la sección original de la probeta. Se demuestra también el comportamiento dúctil al analizar la gráfica esfuerzo vs deformación (ANEXO 3) realizada para este acero, ya que la forma que se obtuvo en la curva es similar a la de materiales que presentan características como buena ductilidad y resistencia a la tracción.

Con respecto a la dureza cabe acotar que esta propiedad tiene una estrecha relación con la resistencia a la deformación y la rotura, por lo tanto, a mayor dureza del material mayor será la resistencia mecánica. Por medio de esta relación directamente proporcional y al observar los datos de dureza Brinell del ensayo (Tabla 3.2.) se puede comprobar que en el acero A572 presenta una alta resistencia a la tracción. Complementariamente a lo acotado, se puede establecer que la dureza alcanzada por la probeta de material base, es mayor al valor mínimo teórico obtenido en la ecuación (dureza).

3.3.1.2. Comportamiento metalúrgico para el metal base

En la Tabla 3.3, que hace referencia al ensayo metalográfico del material base nos muestra una matriz ferrítico-perlítica con tipo de grano no homogéneo.

Adicionalmente se obtuvo los datos de la composición química del material (ANEXO 5) con los cuales se pudo comprobar que el material analizado se trata de un acero de bajo contenido de carbono (0,18) ya que posee un porcentaje menor a 0,25% en peso de C. Con relación a lo teórico, la microestructura de este tipo de aceros presenta ferrita y perlita, tal y como se pudo observar en las metalografías del ensayo micrográfico. Complementariamente a lo acotado, los datos de composición química permitieron

corroborar que el material ensayado se trata de un acero A572 grado 50, ya que los porcentajes de cada uno de los aleantes se encuentran dentro del rango que indica la norma ASTM para que el material sea considerado de grado 50.

3.3.2. Discusión para las soldaduras

3.3.2.1. Ensayo no destructivo

Referente al ensayo de ultrasonido; En base a los resultados de este ensayo la probeta ST es rechazada debido a una discontinuidad tipo A ubicada a 100 [mm] del borde y a una profundidad de 15 [mm] probablemente debido a la presencia de escoria retenida entre los pases (ANEXO 2); En las probetas T1 y T2 no presentaron discontinuidades las cuales puedan afectar a la aceptación de las mismas.

3.3.2.2. Comportamiento mecánico de las juntas soldadas

De la misma forma que para el material base, se debe analizar y comparar el comportamiento mecánico que presentan las diferentes probetas soldadas (ST, T1, T2) resultado de los ensayos de tracción, doblado, dureza y Charpy y adicionalmente relacionarlas entre sí.

En la figura 3.5, se puede diferenciar los valores promedio de resistencia a la tracción de cada una de las probetas; todas las probetas presentan valores mayores a la resistencia mínima a la tracción establecida para el material base; ST presenta un valor notablemente superior con respecto al material base ensayado debido a que no se realizó un tratamiento térmico post-soldadura; T1 y T2 presentan valores promedios cercanos al valor obtenido para el material base ensayado, consecuencia de los tratamientos térmicos realizado; razones por las que todas las probetas fallaron en el metal base.

Esfuerzo Último a la Tracción (Sut)

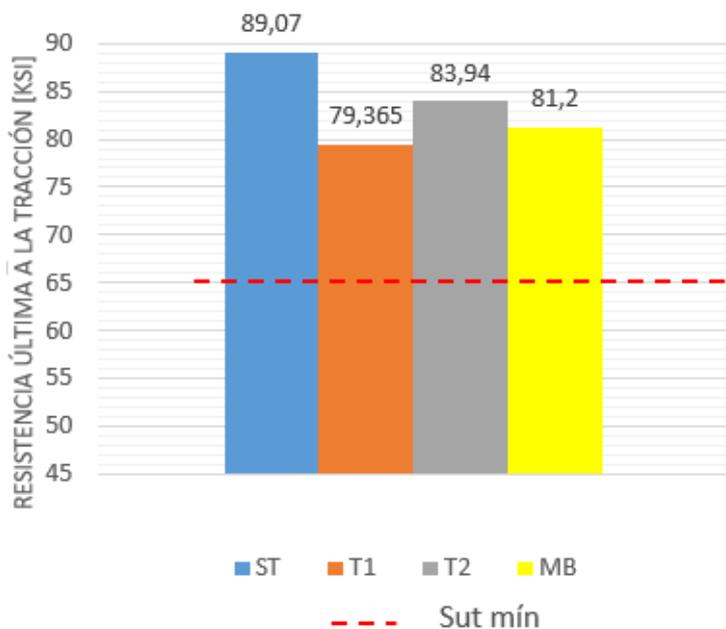


Figura 3.5. Diagrama de barras comparativo de la resistencia a la tracción de las juntas soldadas. (Fuente: Propia)

Para el análisis de la ductilidad de cada una de las probetas soldadas (ST, T1, T2) se ha considerado varios aspectos, el primero está relacionado con la formación de cuello de botella en el área fracturada como se observa en las imágenes de la Tabla 3.5. así como también la reducción del área transversal en la zona de estrangulamiento.

Tanto las probetas T1 y T2 presentan una disminución del área transversal de la zona de estrangulamiento con respecto a la probeta ST (Tabla 3.18.); con lo que se evidencia que las probetas T1 y T2 adquirieron una mayor ductilidad en comparación con la probeta ST.

Tabla 3.18. Porcentaje de reducción área transversal en las probetas del ensayo de tracción.

Probeta	Reducción del Área Transversal [%]
ST-1	56,80
ST-2	53,34
T1-1	63,11
T1-2	65,71
T2-1	63,70
T2-2	66,36

(Fuente: Propia)

En las fracturas dúctiles, una de las características comunes, es que a menudo presentan un color oscuro en la zona de fractura lo que claramente se puede evidenciar en cada una de las imágenes de la Tabla 3.5.

En el ensayo de doblado, el análisis de todas las probetas se basó en la norma AWS D1.1. En la tabla 3.6., las probetas ST no cumplieron los requisitos establecidos por la norma donde la mayoría de indicaciones encontradas son falta fusión y en la probeta ST-4 hubo inclusión de escoria; las probetas T1 si cumplieron con los requisitos ya que de todas las indicaciones abiertas a la superficie (falta de fusión) que se formaron durante el ensayo no superan los 3 [mm] medidos en cualquier dirección sobre la superficie (Tabla 3.7.); de las probetas T2 en las cuales se encontraron indicaciones por falta de fusión e inclusión de escoria una no aprobó (T2-1), por lo que el procedimiento en general para estas probetas no aprueba según la norma mencionada anteriormente (Tabla 3.7.).

Es importante realizar un análisis en base a la dureza para complementar el análisis comparativo del comportamiento mecánico de todas las probetas; para esto fue preciso estudiar la ductilidad de las juntas soldadas como se lo efectuó anteriormente, con lo que pudimos establecer que probeta se comportó de manera más dúctil en comparación con las demás.

En la figura 3.6, se evidencia claramente que la probeta ST con menor ductilidad en comparación a las demás, obtiene valores elevados de dureza en la ZAC, la probeta T1 con mayor ductilidad presenta las durezas más bajas, mientras que la probeta T2 obtiene valores intermedios entre las probetas ST y T1. Esta tendencia se evidencia tanto para la toma realizada en la zona central e inferior del ensayo de dureza como se observa en las figuras 3.7 y figura 3.8 respectivamente.

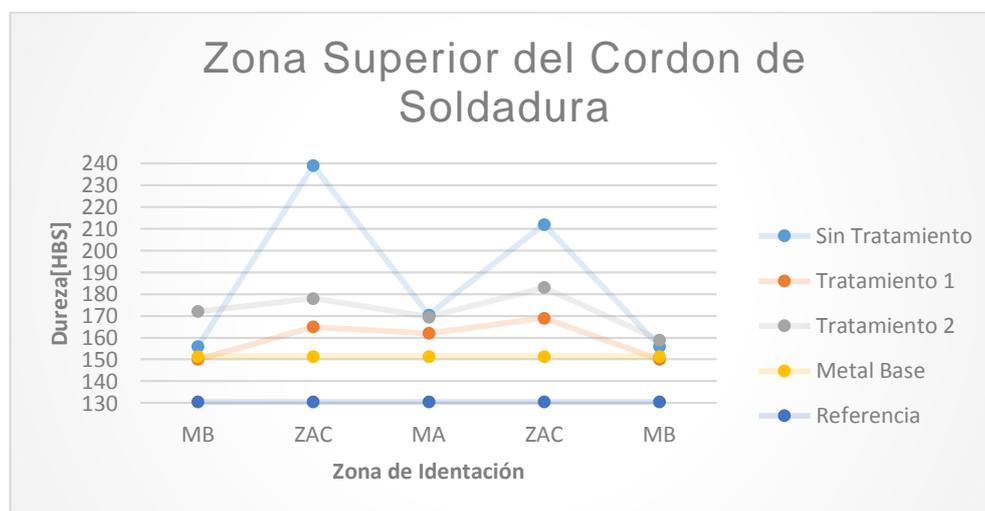


Figura 3.6. Barrido de dureza superior. (Fuente: Propia)

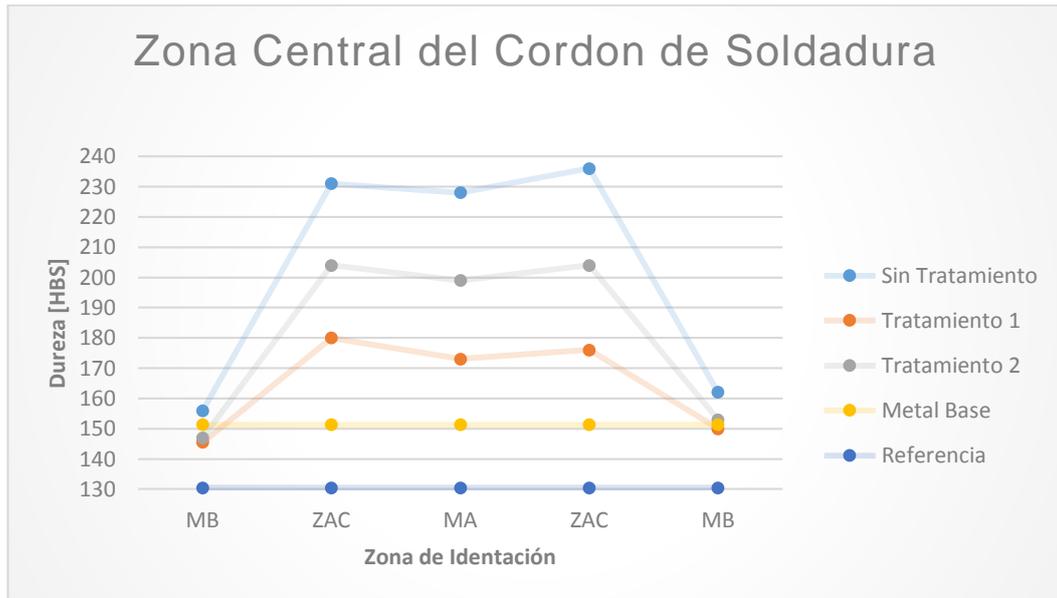


Figura 3.7. Barrido de dureza central.
(Fuente: Propia)

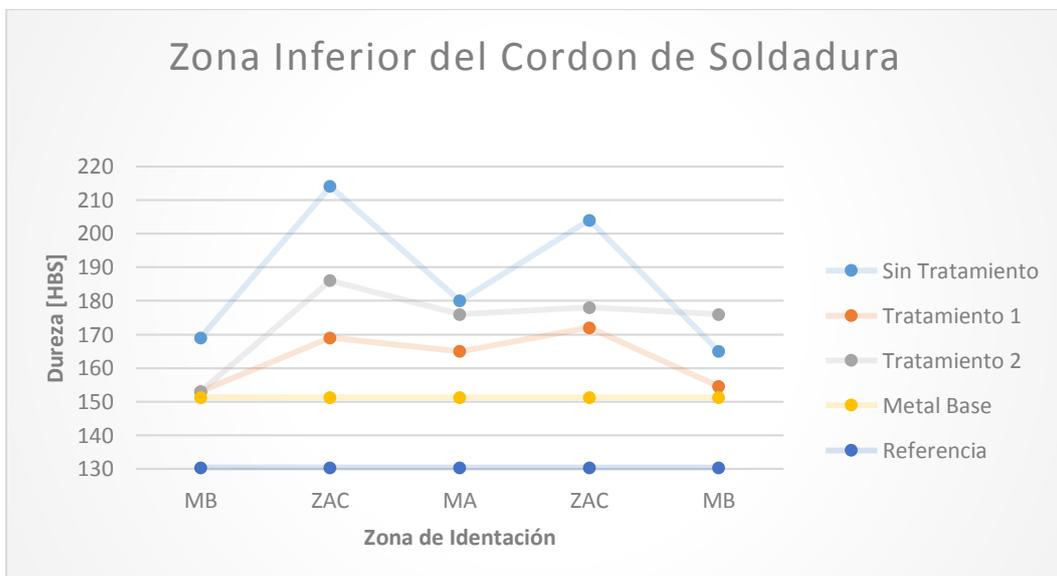


Figura 3.8. Barrido de dureza inferior.
(Fuente: Propia)

En la zona central del cordón (figura 3.7) los valores de dureza para todas las probetas (ST, T1, T2) son mayores respecto a las zonas superior e inferior;

Para el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo Charpy se tomó la decisión de invalidar los valores de las probetas (T2-1-1, T2-2-1) ya que los valores no tienen relación con los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y dureza, esto debido a varios factores como: el estado de la máquina durante la realización del ensayo; la temperatura de trabajo de las probetas; la ubicación y el ángulo del concentrador de esfuerzos (muesca) de las probetas.

En las tablas 3.8, 3.9, 3.10, se puede evidenciar que tanto las probetas T1 y T2 obtuvieron valores mayores en relación a la probeta ST; mientras que entre las probetas con tratamiento térmico se observó que la probeta T1 obtuvo valores más elevados con respecto a T2, teniendo así estos resultados relación directa con los ensayos anteriormente analizados.

La energía absorbida en las probetas T1 da una clara evidencia de que el material tiene el comportamiento más dúctil respecto a T2 y ST, teniendo relación directa con los resultados obtenidos en el ensayo de tracción. Esta capacidad de absorber mayor energía indica que la probeta posee mayor tenacidad.

3.3.2.3. Comportamiento metalúrgico de las juntas soldadas

En el presente proyecto de titulación es de gran importancia estudiar el comportamiento metalúrgico de cada una de las juntas soldadas para poder determinar la microestructura de las probetas (tablas 3.14, 3.15, 3.16) y así justificar el comportamiento mecánico de las mismas. Para comenzar este análisis es significativo enfatizar que las probetas con tratamiento térmico presentan un comportamiento similar con respecto al tamaño del grano. Cabe mencionar que al haber realizado un tratamiento térmico localizado en dos de las tres probetas soldadas la microestructura del metal base no se ve alterada.

Para el análisis metalográfico se iniciará comparando las zonas superiores del ZAC entre las diferentes juntas soldadas; En la tabla 3.14., se observa que la probeta ST presenta ferrita alotropomórfica, ferrita poligonal, martensita tipo listón, austenita e inclusiones no metálicas; la probeta T1 debido a la temperatura de tratamiento térmico se observa una descomposición de las fases martensítica dando como resultado ferrita y cementita (Tabla 3.15.); en la probeta T2 la temperatura de tratamiento térmico no logró una descomposición completa de las fases martensítica (Tabla 3.16.).

Continuando con el análisis para la zona central de ZAC, las tres probetas presentan un tamaño de grano menor respecto a la zona superior, la principal diferencia radica en la presencia de cementita y ferrita, siendo la probeta ST la que posee mayor porcentaje de cementita, T1 presentado el menor porcentaje de cementita, mientras que la probeta T2 posee un porcentaje intermedio entre las probetas ST y T1, justificando así las variaciones de los valores de dureza observados en las figuras 3.6, 3.7., 3.8.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 Conclusiones

- Se logró cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo de titulación, los cuales se enfocaban en: realizar tratamientos térmicos post-soldadura a dos de las tres juntas soldadas, comparar la microestructura y las propiedades mecánicas de cada una de las juntas tratadas térmicamente con la que no se realizó el tratamiento.
- Por medio de los ensayos destructivos y no destructivos realizados en las probetas se logró determinar que la probeta con tratamiento térmico post-soldadura de revenido (T1) obtuvo el mejor comportamiento mecánico en lo que concierne a ductilidad y tenacidad, al mismo tiempo que calificó todos los ensayos según la norma AWS D1.1.
- El ensayo metalográfico nos permitió determinar el cambio microestructural que ocurrió durante los tratamientos térmicos post-soldadura; lográndose evidenciar que las juntas soldadas presentan ferrita, martensita y austenita producto del proceso de soldadura; como consecuencia de los tratamientos térmicos la fase martensítica se descompone en ferrita en mayor porcentaje y cementita en menor porcentaje dependiendo el tratamiento térmico aplicado.
- En el ensayo de doblado se pudo observar que la mayor cantidad de indicaciones encontradas en las diferentes probetas fueron producto de la presencia de escoria ocasionadas por una incorrecta limpieza entre pases, mientras que otras indicaciones son consecuencia de una falta de fusión, en general son una falla humana antes que una falla del material.
- Por medio de este trabajo teórico-experimental se pudo concluir que el tratamiento térmico post soldadura de revenido ayudo de manera significativa a mejorar el comportamiento mecánico y metalográfico de las juntas soldadas que presenten esfuerzos residuales producto del mismo proceso de soldadura.
- La selección del tipo de tratamiento térmico post soldadura para este tipo de juntas soldadas dependerá de la aplicación y las condiciones a las cuales se encuentre sometido, así como también las propiedades mecánicas necesarias para dicha aplicación.

- A pesar de que las probetas ST, T1, T2 superaron los valores mínimos de resistencia última a la tracción y capacidad de absorber energía (tenacidad), se concluye que es necesario la realización de un tratamiento térmico post-soldadura debido a que la junta después del proceso de soldadura presenta un comportamiento poco dúctil, lo cual se traduce en una mayor posibilidad de fallar frente a la aplicación de esfuerzos de tensión mayormente presentes en la aplicación de este material.

4.2 Trabajos futuros

- Para asegurar la integridad de la soldadura se recomienda realizar una correcta limpieza entre pases y así evitar concentradores de esfuerzos innecesarios los cuales puedan afectar de manera directa al comportamiento mecánico de las juntas soldadas.
- Es recomendable realizar un estudio de la corrosión a las probetas soldadas realizadas tratamiento térmico post-soldadura, para de esta manera determinar si dicho proceso favorece o reduce las propiedades resistivas a la corrosión que presenta el material base por sí solo.
- Para garantizar la correcta obtención de datos del ensayo Charpy, se recomienda realizar la muesca en la ubicación correcta y con las herramientas adecuadas.

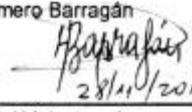
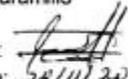
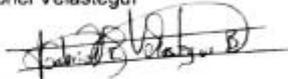
Referencias Bibliográficas

- [1] Adewuyi, R. A. (2016). *Impact of Post-Weld Heat Treatment (PWHT) on the Hardness and. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology.*
- [2] AHMSA. (2013). *Manual de Diseño para la Construcción con Acero.* México: AHMSA.
- [3] Antonio, S. (2002). *Tratamiento Térmico de los Aceros- Tomo I.* Buenos Aires: Nueva Librería.
- [4] Antonio, S. (2002). *Tratamiento Térmico de los Aceros- Tomo II.* Buenos Aires: Nueva Librería.
- [5] ASME. (2017). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section IX.* New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- [6] ASME. (2017). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division I.* New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- [7] ASME. (2018, Enero 12). *ASME P-Numbers for Base Metals in Welding & Brazing Procedure.* Retrieved from The Indian Institute of Welding: <http://www.iiwindia.com/pdf/ASME%209%20Base%20Metal%20P.pdf>
- [8] ASTM. (2013). *ASTM A572/572M: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel.* Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- [9] ASTM. (2013). *ASTM E140: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness.* Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- [10] ASTM. (2013). *ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.* Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- [11] ASTM. (2018). *ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.* Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- [12] AWS. (2015). *AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code-Steel.* Estados Unidos: American Welding Society.
- [13] Carvalho Cleiton, T. J. (2016, Marzo). *Residual Stress, Microstructure and Hardness of Thin-Walled Low-Carbon Steel Pipes Welded Manually.* Brasil.

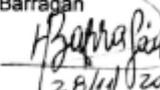
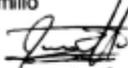
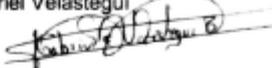
- [14] CEI. (2018, Mayo 14). *ASME WELD NUMBER TABLES – P NUMBER BASE & F NUMBER FILLER*. Retrieved from CEI: <https://info.thinkcei.com/think-tank/asme-weld-number-tables-p-number-f-number>
- [15] CORSA, G. (2012). *EI ACERO HOY*. México: Gerdau Corsa.
- [16] Engineer, W. (2017, Diciembre 30). *ASME P-Numbers*. Retrieved from Welding Engineer: <http://www.weldingengineer.com/ASME%20P-Numbers.htm>
- [17] George, T. (2004). *Steel Heat Treatment Handbook*. Portland: Totten George E.
- [18] Jhon, A. (2014, diciembre). Influencia de la Aplicación del Tratamiento Térmico Post-Soldadura en el Acero SAE 4130. Bogotá, Colombia: Universidad Libre sede Bogotá.
- [19] Jonny, C. (2006). *Welding Porcess in the Engineering*. Atlanta.
- [20] Jorge, D. S. (2010). *Tratamento Térmico de Juntas Soldadas*. Porto.
- [21] Joshi Suraj, A. A. (2013). Hardness, Microstruture, and Residual Stresses in Low Carbon Steel Welding With Post-Weld Heat Treatment and Temper Bead Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*.
- [22] Maldonado, J. (1996, Diciembre). *Aceros y sus Aplicaciones*. México, México: Universidad Autónoma de Nueva León.
- [23] MatWeb. (2018, Febrero 12). *ASTM A572 Steel, grade 50*. Retrieved from MatWeb: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9ced5dc901c54bd1aef19403d0385d7f&ckck=1>
- [24] MIESA. (2017). *Soldadura y Tratamiento Térmicos*. Madrid, España.
- [25] Mikell, G. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna* . México: Mc Graw Hill.
- [26] Sebastián, A. (2015). Estudio Del Tratamiento Térmico Post Soldadura Gtaw En Tuberías De Proceso De Acero Al Carbono Astm A106 Gr B Y Su Incidencia En La Resistencia A La Tracción Y Dureza". Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- [27] Sergio, L. (2004, Abril 21). *Tratamiento Térmico de Soldadura*. Perú: Termo Soldex S.A.
- [28] Termiser. (2018, Febrero 5). *Termiser*. Retrieved from Acero Estructural: <https://www.termiser.com/acero-estructural-que-es-como-se-fabrica/>

Anexos

GAS DE PROTECCION Proceso No: 1 Nombre comercial: N/A Composición: N/A Flujo: N/A Proceso No: 2 Nombre comercial: Composición: CO ₂ Flujo: 20 – 25 [lt/min]			LIMPIEZA: Proceso No: 1 - Disco - Grata Proceso No: 2 - Grata				
CARACTERISTICAS ELECTRICAS: Proceso No: 1 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje: Proceso No: 2 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje:			NOTAS:				
TRATAMIENTO TÉRMICO DESPUES DE LA SOLDADURA : Proceso No: 1 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura: Proceso No: 2 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura:							
Pase #	Meta de aporte		Amperaje [A]	Tensión de Trabajo		Velocidad de Avance [cm / min]	Vel. Alimentación del electrodo [m/min]
	Clase	Diámetro [mm]		Pol.	Voltaje		
1	E8010	3,2	130	DC+	23	0,092	-
2	E8011	3,2	170	DC+	23	0,054	-
3	E71T1	1,2	215	DC+	28	0,043	450
4	E71T1	1,2	217	DC+	28	0,037	450
5	E71T1	1,2	218	DC+	28	0,038	450
6	E71T1	1,2	216	DC+	28	0,042	450
7	E71T1	1,2	235	DC+	28	0,039	450
8	E71T1	1,2	255	DC+	28	0,036	450
9	E71T1	1,2	246	DC+	28	0,031	450
10	E71T1	1,2	255	DC+	27	0,037	450
11	E71T1	1,2	230	DC+	27	0,036	450
12	E71T1	1,2	210	DC+	28	0,041	450
13	E71T1	1,2	202	DC+	28	0,043	450
14	E71T1	1,2	218	DC+	28	0,036	450
15	E71T1	1,2	215	DC+	28	0,034	450
16	E71T1	1,2	212	DC+	28,5	0,044	450
17	E71T1	1,2	210	DC+	28,5	0,033	450

18	E71T1	1,2	225	DC+	28,5	0,047	450
19	E71T1	1,2	227	DC+	28,5	0,041	450
Realizado por:				Aprobado por :			
Carlos Campos Firma:  Fecha: 28/11/2018				M.Sc. Homero Barragán Firma:  Fecha: 28/11/2018			
Luis Jaramillo Firma:  Fecha: 28/11/2018				Ing. Gabriel Velastegui Firma:  Fecha: 28/11/2018			

GAS DE PROTECCION (QW-408.15) Proceso No: 1 Nombre comercial: N/A Composición: N/A Flujo: N/A Proceso No: 2 Nombre comercial: Composición: CO ₂ Flujo: 20 – 25 [lt/min]				LIMPIEZA: Proceso No: 1 - Disco - Grata Proceso No: 2 - Grata			
CARACTERISTICAS ELECTRICAS: Proceso No: 1 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje: Proceso No: 2 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje:				NOTAS:			
TRATAMIENTO TÉRMICO DESPUES DE LA SOLDADURA: Proceso No: 1 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura: Proceso No: 2 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura:							
Pase #	Meta de aporte		Amperaje [A]	Tensión de Trabajo		Velocidad de Avance [cm / min]	Vel. Alimentación del electrodo [m/min]
	Clase	Diámetro [mm]		Pol.	Voltaje		
1	E8010	3,2	128	DC+	23	0,100	-
2	E8011	3,2	128	DC+	23	0,074	-
3	E71T1	1,2	223	DC+	28	0,044	400
4	E71T1	1,2	216	DC+	28	0,049	400
5	E71T1	1,2	218	DC+	28	0,041	400
6	E71T1	1,2	214	DC+	28	0,038	400
7	E71T1	1,2	220	DC+	28	0,041	450
8	E71T1	1,2	212	DC+	28	0,032	450
9	E71T1	1,2	225	DC+	28	0,047	450
10	E71T1	1,2	218	DC+	28	0,039	450
11	E71T1	1,2	228	DC+	28	0,045	450
12	E71T1	1,2	220	DC+	28	0,049	450
13	E71T1	1,2	228	DC+	28	0,035	450
14	E71T1	1,2	235	DC+	28	0,038	450
15	E71T1	1,2	223	DC+	28	0,031	450
16	E71T1	1,2	223	DC+	28	0,032	450
17	E71T1	1,2	220	DC+	28	0,039	450

18	E71T1	1,2	216	DC+	28	0,037	450
Realizado por:				Aprobado por :			
Carlos Campos				M. Sc. Homero Barragán			
Firma: 				Firma: 			
Fecha: 25/11/2018				Fecha: 28/11/2018			
Luis Jaramillo				Ing. Gabriel Velastegui			
Firma: 				Firma: 			
Fecha: 28/11/2018				Fecha:			



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)**



WPS No. 3

Compañía: Escuela Politécnica Nacional
WPS No.: 0003 Norma: AWS D1.1
Revisión No.:
PQR Soporte No.: N/A

PROCESO Y TIPO DE SOLDADURA
Proceso No: 1 Proceso: SMAW
No: 2 Proceso: FCAW
Tipo proceso:
No: 1 Manual Semiautom Autom.
No: 2 Manual Semiautom Autom.

JUNTA UTILIZADA
Proceso No: 1
Tipo de junta: Ranura
Tipo de soldadura: SMAW
Posición: Todas
Cordón de respaldo: SI NO
Placa de respaldo: SI NO
Preparación de la junta: SI NO
Separación entre juntas: 3 [mm]

Proceso No: 2
Tipo de junta: Ranura
Tipo de soldadura: FCAW
Posición: Todas
Cordón de respaldo: SI NO
Placa de respaldo: SI NO
Preparación de la junta: SI NO
Separación entre juntas: 3 [mm]

METAL BASE
Proceso No: 1
Especificación y grado: ASTM A572 Gr 50
Espesor nominal: 39 [mm]

Gr-No: 2

Proceso No: 2
Especificación y grado: ASTM A572 Gr 50
Espesor nominal: 39 [mm]

Gr-No: 2

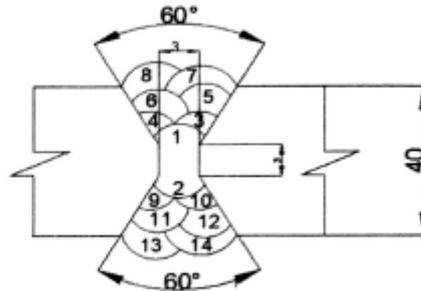
METAL DE APORTE
Proceso No: 1
Especificación o norma: 5.5
Clasificación: E8010
Diámetro: 3,2 [mm]
Casa comercial:

F-No: 3

Proceso No: 2
Especificación o norma: 5.20
Clasificación: E71T1
Diámetro: 1,2 [mm]
Casa comercial:

F-No: 6

ESQUEMA:



TÉCNICA

Proceso No: 1
Ángulo de avance:
Velocidad de avance:
Cordón: Recto Ondulado Otro
Capas: Simple Múltiple
Distancia entre pases:
Electrodo: Simple Múltiple
Vel. De alimentación del alambre:

Extensión del electrodo:
Tiempo entre pases:
Control de distorsión:
Sujeción: SI No
Tipo de sujeción:

Placas de restricción

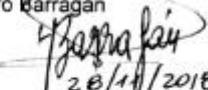
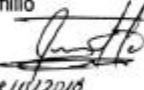
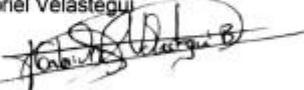
Proceso No: 2
Ángulo de avance:
Velocidad de avance:
Cordón: Recto Ondulado Otro
Capas: Simple Múltiple
Distancia entre pases:
Electrodo: Simple Múltiple
Vel. De alimentación del alambre:

3 – 3.5 [m./min.]
Extensión del electrodo:
Tiempo entre pases:
Control de distorsión:
Sujeción: SI No
Tipo de sujeción:

Placas de restricción

GAS DE PROTECCION Proceso No: 1 Nombre comercial: N/A Composición: N/A Flujo: N/A Proceso No: 2 Nombre comercial: Composición: CO ₂ Flujo: 20 – 25 [lt/min]	LIMPIEZA: Proceso No: 1 - Disco - Grata Proceso No: 2 - Grata
CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS: Proceso No: 1 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje: Proceso No: 2 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje:	NOTAS:
TRATAMIENTO TÉRMICO DESPUES DE LA SOLDADURA: Proceso No: 1 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura: Proceso No: 2 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura:	

Pase #	Meta de aporte		Amperaje [A]	Tensión de Trabajo		Velocidad de Avance [cm / min]	Vel. Alimentación del electrodo [m/min]
	Clase	Diámetro [mm]		Pol.	Voltaje		
1	E8010	3,2	122	DC+	23	0,092	-
2	E71T1	1,2	242	DC+	28	0,044	450
3	E71T1	1,2	217	DC+	28	0,050	450
4	E71T1	1,2	234	DC+	28	0,036	450
5	E71T1	1,2	224	DC+	28	0,048	450
6	E71T1	1,2	236	DC+	28	0,035	450
7	E71T1	1,2	230	DC+	28	0,042	450
8	E71T1	1,2	228	DC+	28	0,037	450
9	E71T1	1,2	230	DC+	28	0,041	450
10	E71T1	1,2	238	DC+	28	0,045	450
11	E71T1	1,2	241	DC+	28	0,050	450
12	E71T1	1,2	229	DC+	28	0,041	450
13	E71T1	1,2	244	DC+	28	0,046	450
14	E71T1	1,2	232	DC+	28	0,034	450
15	E71T1	1,2	237	DC+	28	0,039	450
16	E71T1	1,2	232	DC+	28	0,040	450
17	E71T1	1,2	236	DC+	28	0,051	450

Realizado por:	Aprobado por :
Carlos Campos	M. Sc. Homero Barragán
Firma: 	Firma: 
Fecha: 23/11/2018	Fecha: 23/11/2018
Luis Jaramillo	Ing. Gabriel Velastegui
Firma: 	Firma: 
Fecha: 26/11/2018	Fecha:



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL SOLDADOR (WPQ)

Nombre Compañía:	Escuela Politécnica Nacional	Fecha de realización :	28/09/2018
WPQ No.	1	Fecha de expiración :	28/09/2020
Según norma :	AWS D1.1 – 2010 "STRUCTURAL WELDING CODE - STEEL "	Inspector:	Ing. Gabriel Velastegui
WPS SOPORTE No.	2		

Nombre del Soldador :	Jorge Patricio Guzmán Enriquez	CI #:	1720117223	Código No.	SW-31
Proceso de soldadura :	MANUAL SMAW X	SEMIAUTOMÁTICO FCAW X	AUTOMÁTICO GMAW	SAW	
Tipo y grado del metal base :	ASTM A 572 Gr 50	Espesor:	40 mm.	Tipo de soldadura :	RANURA
Metal de aporte :	Especificación: 5.5 Especificación: 6.20	Denominación AWS:	E 8010 E 71T1	Diámetro :	3,2 mm. 1,2 mm.
Pre calentamiento :	65 C	Temperatura entre pas:	N/A		
Tipo de máquina de soldar :	Lincoln Invertec V350-PRO	Potencia de la máquina de soldar: 1:	220 V		

PARÁMETRO DE SOLDADURA				
Pase No.	1	2	3	4
Proceso :	SMAW	SMAW	FCAW	FCAW
Tipo de electrodo (AWS) :	E8010	E8010	ET1T1	ET1T1
Especificación (SFA) No.	5.5	5.5	5.20	5.20
Diámetro (mm) :	3,2	3,2	1,2	1,2
Voltaje :	23	23	28	28
Tipo de corriente y polaridad :	DC+	DC+	DC+	DC+
Código del soldador :	SW-31	SW-31	SW-31	SW-31

EXÁMENES

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS		
INSPECCION VISUAL	Calificado	Descalificado
CALIFICADO	SI	DESCALIFICADO

ENSAYOS DESTRUCTIVOS

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO				
DOBLADOS LATERALES				
Muestra No.	Ident. de Laboratorio	Aprobado	Observaciones	
1	1DL T1-1	SI	No presenta indicaciones	
2	1DL T1-2	SI	No presenta indicaciones	
3	1DL T1-3	SI	1 indicacion (1,4 mm)	
4	1DL T1-4	SI	2 indicaciones (2 mm y 2,5 mm)	
ENSAYOS DE DOBLADO.		Calificado	SI	Descalificado

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCION			
TRACCION			
Muestra No.	Ident. de Laboratorio	Aprobado	
1	T1-1	SI	
2	T1-2	SI	
ENSAYOS DE DOBLADO.		Calificado	SI
			Descalificado

Límites de calificación:	El soldador queda habilitado para soldadura de RANURA para la posición 1G, 1F, 2F en placa y 1G, 1F, 2F en tubería Límite de calificación en material base: Todos los materiales especificados con Grupo No 2 Espesores calificados 3,0 mm (1/8") a ilimitado El proceso de soldadura utilizado es SMAW/FCAW
Proceso	Especificación AWS
SMAW	E8010
FCAW	E71T1
	Rango de espesor
	3,0 mm. ≤ t ≤ ilimitado
	3,0 mm. ≤ t ≤ ilimitado

Nosotros certificamos que las especificaciones de este registro de soldadura son correctas, y que además los cupones fueron soldados y ensayados de acuerdo a los requerimientos de la norma AWS D1.1 / 2010 "STRUCTURAL WELDING CODE - STEEL" para calificación de soldadores.

Realizado por:	Carlos Campos	Aprobado por:	Msc. Homero Barragán
Firma:		Firma:	
Fecha:		Fecha:	
Luis Jaramillo		Ing. Gabriel Velastegui	
Firma:		Firma:	
Fecha:		Fecha:	



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

Nombre Compañía:	Escuela Politécnica Nacional	Fecha de realización :	28/10/2018
WPQ No.	1	Inspector:	Ing. Gabriel Velastegui
Según norma :	AWS D1.1 – 2015 "STRUCTURAL WELDING CODE - STEEL "		
WPS SOPORTE No.	2		

Nombre del Soldador :	Jorge Patricio Guzmán Enriquez	CI #:	1720117223	Código No.	SW-31
Proceso de soldadura :	MANUAL SMAW X	SEMIAUTOMÁTICO FCAW X	GMAW	AUTOMÁTICO SAW	
Tipo y grado del metal base :	ASTM A 572 Gr 50	Espesor:	40 mm.	Tipo de soldadura :	RANURA
Metal de aporte :	Especificación AWS: A 5.5 Especificación: 5.20	Denominación AWS: E 8010	Diámetro : 3,2 mm.		
Precalentamiento :	65 C	Denominación AWS: E 71T1	Diámetro : 1,2 mm.	Temperatura entre pas:	N/A
Tipo de máquina de soldar :	Lincoln Invertec V350-PRO			Potencia de la máquina de soldar:	1 220 V

PARAMETRO DE SOLDADURA				
Pase No.	1	2	3	4
Proceso :	SMAW	SMAW	FCAW	FCAW
Tipo de electrodo (AWS) :	E8010	E8010	ET1T1	ET1T1
Especificación (SFA) No.	5.5	5.5	5.20	5.20
Diámetro (mm) :	3,2	3,2	1,2	1,2
Voltaje :	23	23	28	28
Tipo de corriente y polaridad :	DC+	DC+	DC+	DC+
Código del soldador :	SW-31	SW-31	SW-31	SW-31

EXÁMENES

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS		
INSPECCIÓN VISUAL	Calificado	Descalificado
CALIFICADO	SI	DESCALIFICADO

ENSAYOS DESTRUCTIVOS

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO				
DOBLADOS LATERALES				
Muestra No.	Ident. de Laboratorio	Aprobado	Observaciones	
1	1DL T1-1	SI	No presenta indicaciones	
2	1DL T1-2	SI	No presenta indicaciones	
3	1DL T1-3	SI	1 indicación (1,4 mm)	
4	1DL T1-4	SI	2 indicaciones (2 mm y 2,5 mm)	
ENSAYOS DE DOBLADO.		Calificado	SI	Descalificado

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN				
TRACCIÓN				
Muestra No.	Ident. de Laboratorio	Aprobado	Observaciones	
1	T1-1	SI		
2	T1-2	SI		
ENSAYOS DE DOBLADO.		Calificado	SI	Descalificado

Limites de calificación:	El procedimiento queda habilitado para soldadura de RANURA para la posición 1G Limite de calificación en material base: Todos los materiales especificados con Grupo No 2 Espesores calificados 3,0 mm (1/8") a ilimitado El proceso de soldadura utilizado es SMAW/FCAW	
Proceso	Especificación AWS	Rango de espesor
SMAW	E8010	3 mm. ≤ t ≤ ilimitado
FCAW	E71T1	3,0 mm. ≤ t ≤ ilimitado

Nosotros certificamos que las especificaciones de este registro de soldadura son correctas, y que además los cupones fueron soldados y ensayados de acuerdo a los requerimientos de la norma AWS D1.1 / 2010 "STRUCTURAL WELDING CODE - STEEL" para calificación del procedimiento de soldadura

Realizado por:		Aprobado por:	
Carlos Campos		M. Sc. Homero Barragán	
Firma:		Firma:	
Fecha:		Fecha:	
Luis Jaramillo		Ing. Gabriel Velastegui	
Firma:		Firma:	
Fecha:		Fecha:	

ANEXO II.
INFORME DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO - SINDES



SR. LUIS
JARAMILLO

**SERVICIOS DE INSPECCIÓN
NO DESTRUCTIVA Y SOLDADURA**

RUC: 1792147220001
Telf: (02)2323774 | Cel: 0993696196 | 0993696177
Email: info@sindes.com
Web: www.sindes.com

CLIENTE:	LUIS JARAMILLO	
LOCACION:	OFICINAS SINDESECUADOR S.A	
ORIGEN :	PROBETAS SOLDADAS	
ORDEN DE TRABAJO:	SINDES-02-142-0518	
REVISION:	0	FECHA EMISIÓN: 25/05/2018
ORDEN DEL CLIENTE:	S/N	
FECHA INSPECCIÓN:	20/05/2018	
INSPECTOR:	Ing. Oscar Yanchapaxi	
PROCEDIMIENTO:	SINDES-PR-0402-020 / UT Aws	
ESPECIFICACION:	AWS D1.1 / Structural Welding Code - Steel	

DESCRIPCION: INSPECCIÓN DE PROBETAS SOLDADAS
PROBETAS 1, 2, 3



TRABAJO REALIZADO:
A. INSPECCION POR ULTRASONIDO CONVENCIONAL

	ORDEN DE TRABAJO : SINDES-02-142-0518	PAG. 1 de 3	REV.: 0	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> SR. LUIS JARAMILLO </div>
	CLIENTE : LUIS JARAMILLO	REPORTE N°: 001		
	LOCACIÓN : OFICINAS SINDESECUADOR S.A	ORIGEN: PROBETAS SOLDADAS		
	FECHA EMISIÓN: 25/05/2018			
	FECHA INSPECCIÓN: 20/05/2018			
SERVICIOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA Y DE SOLDADURA				CDD SINDES-02-142-0518 REV. 1 FICHA: 14/02/2017

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO

AWS D1.1 / Structural Welding Code - Steel

Table 6.2
UT Acceptance-Rejection Criteria (Statically Loaded Nontubular Connections and Cyclically Loaded Nontubular Connections in Compression) (see 6.13.1, 6.13.2(2), and C-6.25.6)

Discontinuity Severity Class	Weld Size ^a in inches [mm] and Search Unit Angle												
	5/16 through 3/4 [8-20]		> 3/4 through 1-1/2 [20-38]		> 1-1/2 through 2-1/2 [38-65]			> 2-1/2 through 4 [65-100]			> 4 through 8 [100-200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°		
Class A	+5 & lower	+2 & lower	-2 & lower	+1 & lower	+3 & lower	-5 & lower	-2 & lower	0 & lower	-7 & lower	-4 & lower	-1 & lower		
Class B	+6	+3	-1	+2	+4	-4	-1	+1	-6	-3	0		
Class C	+7	+4	+1	+5	+6	-2 to +2	+1	+3	-1 to +2	+1 to +2	+2		
Class D	+8 & up	+5 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up	+3 & up	+3 & up	+5 & up	+3 & up	+3 & up	+4 & up		

Table 6.3
UT Acceptance-Rejection Criteria (Cyclically Loaded Nontubular Connections in Tension) (see 6.13.2 and C-6.25.6)

Discontinuity Severity Class	Weld Size ^a in inches [mm] and Search Unit Angle												
	5/16 through 3/4 [8-20]		> 3/4 through 1-1/2 [20-38]		> 1-1/2 through 2-1/2 [38-65]			> 2-1/2 through 4 [65-100]			> 4 through 8 [100-200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°		
Class A	+10 & lower	+8 & lower	+4 & lower	+7 & lower	+9 & lower	+1 & lower	+4 & lower	+6 & lower	-2 & lower	+1 & lower	+3 & lower		
Class B	+11	+9	+5	+8	+10	+2	+5	+7	-1	+2	+4		
Class C	+12	+10	+6	+9	+11	+3	+6	+8	0	+3	+5		
Class D	+13 & up	+11 & up	+9 & up	+12 & up	+14 & up	+6 & up	+9 & up	+11 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up		

Class A (large discontinuities)
Any indication in this category shall be rejected (regardless of length).

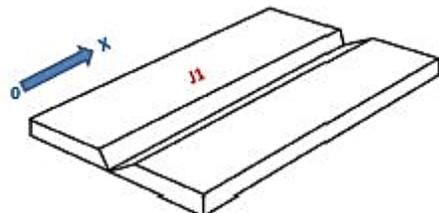
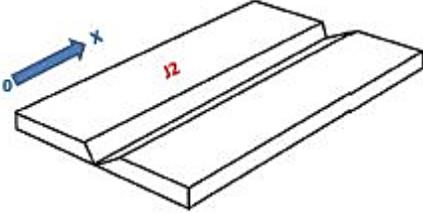
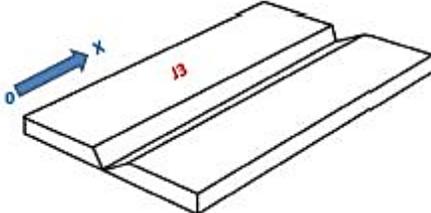
Class B (medium discontinuities)
Any indication in this category having a length greater than 3/4 in [20 mm] shall be rejected.

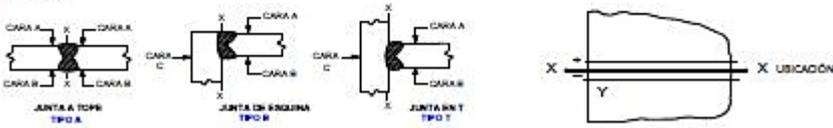
Class C (small discontinuities)
Any indication in this category having a length greater than 2 in [50 mm] shall be rejected.

Class D (minor discontinuities)
Any indication in this category shall be accepted regardless of length or location in the weld.



Servicios de Inspección No Destructiva y de Soldadura
Tel: (02) 2323774 | Cel: 0997550411 | 0993696177
Email: info@sindes.com | Web: www.sindes.com

	ORDEN DE TRABAJO :	SINDES-02-142-0518	PAG. 2 de 3	REV.: 0	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> SR. LUIS JARAMILLO </div>	
	CLIENTE :	LUIS JARAMILLO	REPORTE N°:			001
	LOCALIZACIÓN :	OFICINAS SINDESECUADOR S.A	ORIGEN: PROBETAS SOLDADAS			
	FECHA EMISIÓN:	25/05/2018				
FECHA INSPECCIÓN:	20/05/2018	SERVICIOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA Y DE SOLDADURA			CCO: SINDES-PD-IN-008 REV: 1 FECHA: 14/02/2017	
ESQUEMA GENERAL DE JUNTAS						
ELEMENTOS						
<p>— PROBETAS 1, 2, 3</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; gap: 20px;">    </div>						
	Servicios de Inspección No Destructiva y de Soldadura Tel: (02) 2323774 Cel: 0997550411 0993696177 Email: info@sindes.com Web: www.sindes.com					

	ORDEN DE TRABAJO : SINDES-02-143-0518		FAG. 3 de 3 REV. 0		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> SR. LUIS JARAMILLO </div>																	
	CLIENTE : LUIS JARAMILLO		REPORTE N°: 001																			
	LOCACIÓN : OFICINAS SINDES/ECUADOR S.A.		ORIGEN : PROYECTOS SOLDADAS																			
	FECHA EMISIÓN : 25/05/2018		FECHA INSPECCIÓN : 20/05/2018																			
SERVICIOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA Y DE SOLDADURA					COD: SINDES-PO-020-001 RPA: 1 FICHA: 14/08/2017																	
REPORTE DE INSPECCIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE ULTRASONIDO INDUSTRIAL																						
EQUIPO EMPLEADO																						
EQUIPO : USMGO S/N: 13056151		Calibrado el: 05/12/2017																				
PALNADOR : PANAMETRICS C400/613709		Angulo : 70°		Frecuencia : 2,25 MHz																		
GANANCA (dB) : 82		RANGO (mm): 400		Modo : PULSO/ECHO																		
				Retardo Zapata (µs) : 14,69																		
				Velocidad (m/s): 3239																		
PARÁMETROS DE INSPECCIÓN																						
Material: ASTM A572		Bloque Calibración: DSC		Grilla / Matriz: No aplica																		
Condición Superficial: Sin pintura		Técnica: Haz Angular		Procedimiento: SINDES-PR-0400-000 / UT Aws																		
Acoplante: Gel (metil celulosa)		Espesor Plancha: 40 mm		Código Aplicable: AWS D1.1																		
DESCRIPCIÓN / PROYECTO : <u>PROYECTOS SOLDADAS</u> <u>PROYECTOS 1, 2, 3</u>																						
ESQUEMA - CARAS DE BARRIDO / UBICACIÓN:																						
																						
DETALLE DE INSPECCIÓN																						
IDENTIFICACIÓN				INSPECCIÓN				DISCONTINUIDADES				REINSPECCIÓN										
ELEMENTO	JUNTA	TIPO	LADO	SOLDADOR	FECHA	ANGULO (°)	TRANSDUCTOR	DESE DE LA CARA	PIERNA (RT)	RESULTADOS		CARGO DEFECTOS	CLASIFICACION	DISTRIBUCION DEFECTOS	PREVALENCIAS	LONGITUD (mm)	UBICACIÓN		REINA	SOLUCIÓN	REALIZADO	
										ACEPTADA	RECHAZADA						X (mm)	Y (mm)			ACEPTADA	RECHAZADA
PROBETA 1	11	A	A	-	20/05/2018	70	A	H	H			214	D	A	15	150	100	0				
PROBETA 2	12	A	A	-	20/05/2018	70	A	H	H	X												
PROBETA 3	13	A	A	-	20/05/2018	70	A	H	H	X												
																						
NOMENCLATURA: (Evaluación de la discontinuidad) A: Clase A, discontinuidad Mayor - Grande. B: Clase B, discontinuidad Mediana. C: Clase C, discontinuidad Pequeña. D: Clase D, discontinuidad Menor.										EQUIPOS EMPLEADOS: Descripción: _____ I.D. / Serie: _____ Calibrado el: _____ _____ _____												
Procedimiento : SINDES-PR-0400-000 / UT Aws										Código / Estándar : AWS D1.1 / Structural Welding Code - Steel												
Resultados Obtenidos : Las juntas de soldadura inspeccionadas, marcadas como aceptada, cumplen con los criterios de aceptación articulados en el AWS D1.1 - 2015.																						
Estado Final : _____										Solicitado por : Luis Jaramillo												
Observaciones : _____																						
REALIZADO POR:						REVISADO POR:						RECIBIDO POR:										
Nombre: Ing. Oscar Yanchapaxi		Nombre: Ing. Robert Toasa		Nombre:		Cargo: Nivel II SNT-TC-1A		Cargo: Nivel III ASNT 218852		Cargo:		Fecha:		Fecha:		Fecha:		Firma:		Firma:		
Fecha: 25/05/2018		Firma: 		Fecha: 25/05/2018		Firma: 																

ANEXO III.

INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA EL METAL BASE Y ENSAYO CHARPY



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



INFORME TÉCNICO

LAEV – SEP.18.03.0

Quito, 18 de septiembre de 2018

TRABAJO SOLICITADO POR: **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**
M.Sc. Galo Homero Barragán Campos

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en juntas soldadas pertenecientes a Sr. Luis Jaramillo y al Sr. Carlos Campos para el proyecto de titulación "ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN JUNTAS SOLDADAS DE ACERO ASTM A572 TRATADAS TÉRMICAMENTE". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. MUESTRAS: Una (1) probeta de material base para ensayo de tracción y diecicho (18) probetas de junta soldada para ensayo de impacto Charpy.

2. ENSAYO DE TRACCIÓN A MATERIAL BASE

En la tabla 1 se indican los valores mínimos de límite de fluencia, resistencia a la tracción y porcentaje de elongación para el material ASTM A572 Gr.50

Tabla 1. Requerimientos para el material base ASTM A572 Gr. 50

Límite de fluencia mínimo		Resistencia mínima a la tracción		% Elongación mínimo 50 mm
ksi	MPa	ksi	MPa	
50	345	65	450	21

En la tabla 2 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas.

Tabla 2. Resultados del ensayo de tracción.

Id.	Díámetro promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
T-1	12,66	15.845	70.482	62,8	432,9	81,2	559,9	36,2

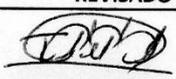


3. ENSAYO DE IMPACTO CHARPY

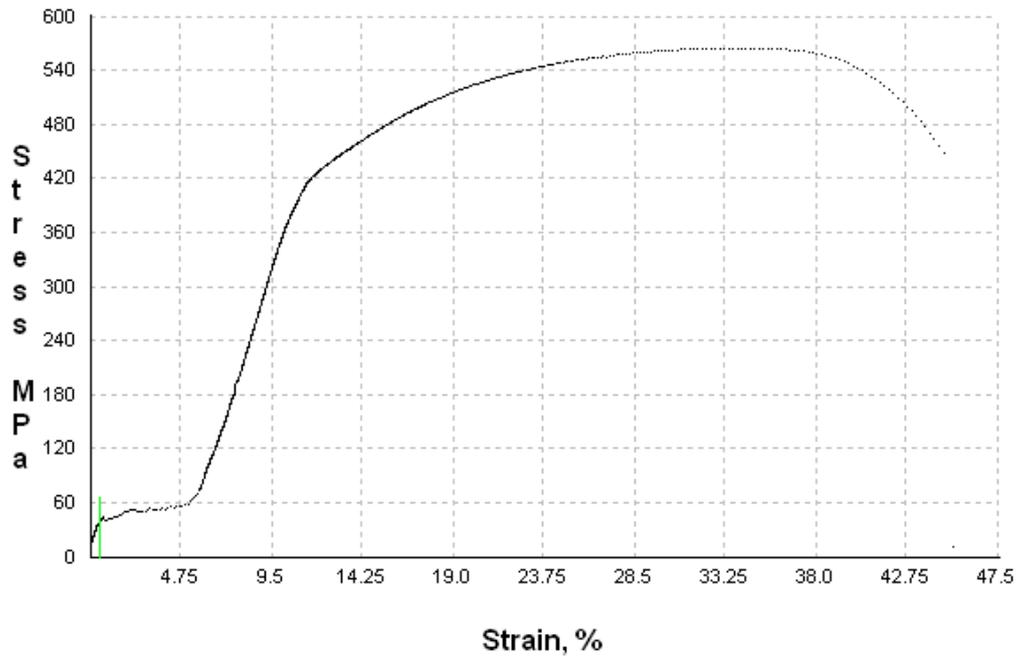
En la tabla 3 se presenta los resultados del ensayo de impacto Charpy realizado a las probetas de junta soldada. Temperatura de ensayo: -21°C.

Tabla 3. Resultados del ensayo de impacto Charpy.

Identificación	Energía de Impacto	
	lbf-ft	J
ST-1	26	35
ST-2	24	33
ST-3	32	43
T1-1	32	43
T1-2	22	30
T1-3	12	16
T2-1	52	71
T2-2	68	92
T2-3	64	87
ST-1-1	88	119
ST-2-1	60	81
ST-3-1	64	87
T1-1-1	28	38
T1-2-1	34	46
T1-3-1	106	144
T2-1-1	120	163
T2-2-1	66	89
T2-3-1	176	239

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		





ANEXO IV.

INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETAS SOLDADAS – INEN

SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN Edición: 05	LABORATORIO DE ENSAYOS INFORME DE RESULTADOS	Hoja N° 1 de 1
---	--	----------------

INFORME DE RESULTADOS N° LE-2018-096 **FECHA:** 2018-09-21

INFORMACIÓN GENERAL			
N° SOLICITUD DE TRABAJO:	ST-2018-66		
ENTIDAD/EMPRESA⁽¹⁾:	Luis Jaramillo		
FECHA DE INGRESO DE OBJETO DE ENSAYO:	2018-09-10	E-MAIL⁽¹⁾:	luiscs93@hotmail.com
MUESTREO/ TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR⁽¹⁾:	Luis Jaramillo	ACTA No.⁽¹⁾:	No aplica

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN			
FECHA DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS:	2018-09-21		
NORMA DE REQUISITOS⁽¹⁾:	No aplica		
MÉTODO DE ENSAYO⁽¹⁾:	LE-PTE-G-02. Ref.: NTE INEN – ISO 6892-1		
LUGAR DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO:	LABORATORIO DE ENSAYOS GENERALES		
CONDICIONES AMBIENTALES:	Temperatura, °C:	No aplica	Humedad Relativa, %: No aplica
EQUIPOS UTILIZADOS:	Máquina Universal de Ensayos. Código: 2499, Calibrador. Código: EI-G-15		
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO⁽¹⁾:	Probeta de Acero ASTM A572 GRADO 50	MARCA⁽¹⁾:	No aplica
CÓDIGO DE OBJETO DE ENSAYO:	OE-2018-271-01 a OE-2018-271-06	CÓDIGO DE CLIENTE⁽¹⁾:	Probeta 1 a Probeta 3

Código de objeto de ensayo	Área de sección mm ²	Carga de fluencia kN	Carga de rotura kN	Límite de fluencia MPa	Resistencia a la Tracción MPa	U (k=2) %	Porcentaje de Alargamiento %	U (k=2) %
OE-2018-271-01	814,34	408,80	475,80	502,00	584,27	± 11,25	32,76	± 4,69
OE-2018-271-02	800,64	394,90	493,30	493,23	616,13	± 11,25	30,08	± 4,69
OE-2018-271-03	831,94	321,40	452,70	386,33	544,15	± 11,25	30,80	± 4,69
OE-2018-271-04	837,96	339,60	461,10	405,27	550,26	± 11,25	30,06	± 4,69
OE-2018-271-05	824,31	399,70	490,40	484,89	594,92	± 11,25	32,08	± 4,69
OE-2018-271-06	840,97	347,30	473,10	412,98	562,57	± 11,25	31,92	± 4,69

OBSERVACIONES:

- La geometría de las probetas para ejecución del ensayo de Resistencia a la Tracción es responsabilidad del Sr Luis Jaramillo y puede afectar a la validez de los resultados.
- Los objetos de ensayo OE-2018-271-01 a OE-2018-271-06 presentan la rotura en el material base

- Los resultados de este informe se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.
 - Este Informe de Resultados no debe ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del Laboratorio.

Realizado por:

Ing. César Reyes

Autorizado por:

Ing. Marcela Cáceres

ANEXO V. COMPOSICION QUIMICA DEL MATERIAL



五矿营口中板有限责任公司
Mimetal's Yingkou Medium Plate Co., Ltd.

产品质量证明书 INSPECTION CERTIFICATE

辽宁省营口市老边区冷金街/115005
Yejin street, Laobian district, Yingkou,
Liaoning, P. R. China/115005
TEL: 0417-3256081 FAX: 0417-3256057
NO.: DT2101501



供货单位 (SOLD BY)	SALZGITTER MANNESMANN INTERNATIONAL	产品名称 (PRODUCT)	热轧合金钢板 Prime newly produced Hot Rolled alloy Steel Plates	证书编号 (CERTIFICATE NO.)	D0700150820188022210
收货单位 (PURCHASER)	SALZGITTER MANNESMANN INTERNATIONAL	交货状态 (DELIVERY CONDITION)	热轧 (AR)	签发日期 (DATE OF ISSUE)	2018-03-05
合同编号 (CONTRACT NO.)	YGCKR35180109211-R-01	技术条件 (SPECIFICATION)	ASTM A572/A572M	牌号 GRADE	A 572 Gr. 50
车号 (TRAIN NO.)	辽HK9661;辽H22599;				

炉号 HEAT NO.	批号 BATCH NO.	规格尺寸 (mm) DIMENSION			件数 PIECES	重量 (ton) WEIGHT	拉伸试验 TENSILE TEST				弯曲试验 BEND TEST	冲击试验 AKY (J) IMPACT TEST			探伤检验 UT TEST				
		T	W	L			屈服ReL (N/mm2)	屈服ReL (N/mm2)	屈服Rp (N/mm2)	抗拉Rm (N/mm2)		伸长率A (%)	尺寸 SIZE (mm2)	温度 TEMP (°C)	1	2	3	级别 LEVEL	结果 RESULT
18202154D	201803010574	15	2500	12000	4	14.132			390	540	25								
18202154D	201803010571	15	2500	12000	4	14.132			400	540	25.5								
18202154D	201803010570	15	2500	12000	12	42.396			395	545	24.5								
合计 (TOTAL)					20	70.660													

批号 BATCH NO.	化学成分 CHEMICAL COMPOSITION (%)																
	C	Si	Mn	P	S	Als	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	Nb	eeq	CEV	N
201803010574	0.18	0.18	1.23	0.017	0.013	0.022	0.023	0.311	0.006	0.008	0.005	0.004	0.003	0.013		0.44	0.0031
201803010571	0.18	0.18	1.23	0.017	0.013	0.022	0.023	0.311	0.006	0.008	0.005	0.004	0.003	0.013		0.44	0.0031
201803010570	0.18	0.18	1.23	0.017	0.013	0.022	0.023	0.311	0.006	0.008	0.005	0.004	0.003	0.013		0.44	0.0031

备注 NOTE:	ACCORDING TO EN10204 3.1: A1-A11				
 野牛	本产品已按照标准要求进行制造和检验, 其结果符合要求, 特此证明。 WE HEREBY CERTIFY THAT MATERIAL DESCRIBED HAS MANUFACTURED AND TESTED WITH SATISFACTORY RESULTS IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ABOVE MATERIAL SPECIFICATION.	操作员 OPERATOR	唐思瑶 Tang Siyao	冶金技术处处长 DIRECTOR OF METALLURGICAL DEPARTMENT	丛洁 Cong Jie