



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDADURA INDIRECTA (FUERTE) EN HORNO DEL ACERO ASTM A572 APLICANDO UN PROCESO DE FRESADO SUPERFICIAL PREVIO AL PROCESO DE SOLDADURA

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

GUALOTUÑA VARGAS DIEGO ANDRÉS

diego.gualotuna01@epn.edu.ec

TUFIÑO TITUAÑA ALEXANDER DARÍO

alexander.tufino@epn.edu.ec

DIRECTOR:

ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME

carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, mayo, 2021

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **GUALOTUÑA VARGAS DIEGO ANDRÉS** y **TUFIÑO TITUAÑA ALEXANDER DARIO**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Gualotuña Vargas Diego Andrés Y Tufiño Tituaña Alexander Darío**, 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 hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros 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.



Gualotuña Vargas Diego Andrés.



Tufiño Tituaña Alexander Darío.

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a Dios, mi padre celestial, por haberme permitido llegar a este punto gracias a su infinita bondad y amor.

A mis padres, René y Olga, que sin su amor, su esfuerzo, su apoyo y sus cuidados este logro no hubiese sido posible.

A mis hermanos René y Pablo por brindarme su apoyo durante todo este proceso y ayudarme a crecer como persona.

A mi novia Yesseña, por toda su ayuda y motivación para alcanzar mis objetivos.

A toda mi familia que se preocupa por mí y me motivan a seguir adelante.

Diego Gualotuña

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por estar conmigo y no desampararme en todo momento de mi vida, y ayudarme a salir victorioso de cada obstáculo que se presenta, por ser un Padre fiel a pesar de ser un hijo tan imperfecto y por enseñarme que de su mano todo es posible.

A mis padres, Vinicio René Gualotuña y Olga Vargas, por su infinito amor, su sacrificio, su esfuerzo diario para que no me falte nada, sus consejos, sus regaños, por ser mi gran apoyo emocional e incondicional, por enseñarme a través de su ejemplo que las metas se alcanzan con pasión y disciplina, por enseñarme responsabilidad, gratitud, a aceptar mis errores y que lo más importante en la vida es Dios, por esto y mucho más les agradezco, los amo y los honro y este logro es por ustedes y para ustedes.

A mi hermano René Gualotuña, por los buenos momentos que hemos pasado y los malos de los cuales hemos aprendido, por su ayuda, y porque desde pequeño me inspiraba a seguir sus pasos.

A mi hermano Pablo Gualotuña, que desde el día de su nacimiento llegó a alegrar mi vida con sus ocurrencias, sus juegos, su forma de pensar, su apoyo, su sentido del humor, me ayuda y me motiva a ser mejor persona ya que quiero ser un ejemplo para su vida.

A mis abuelitos, Segundo Vargas y Rosario Toasa, que con una infaltable sonrisa en sus rostros me brindaban palabras de ánimo y motivación para seguir adelante y para que nunca me deje vencer de nada ni nadie. A mi tía Anita, por su ejemplo de fortaleza, por estar presente en los días importantes de mi vida y por ayudarme de una u otra manera. A mis primos Josué, Sofía, Samuel, Carla, Camila, Fabricio, Paul y David, por compartir buenos y malos momentos, pero sobre todo apoyarnos el uno al otro.

A Yesseña Mishque, mi novia y mejor amiga por darme su apoyo incondicional y su ayuda desinteresada en todo lo que estaba a su alcance, por ser mi confidente y cómplice, por motivarme, por estar a mi lado y levantarme cuando pensaba que ya no podía más, y por ser una de las personas más importantes en mi vida.

A mi compañero de tesis Alexander Tufiño, por su confianza, su amistad y su ayuda para la realización de este trabajo.

A la Escuela Politécnica Nacional, en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica donde me formaron como profesional.

Un agradecimiento muy especial para el Ing. Carlos Díaz, Don Rene, Ing. Patricia Proaño, por su apoyo brindado, su paciencia, su enseñanza y sus consejos, que fueron de gran ayuda para la realización de este proyecto.

Diego Gualotuña

DEDICATORIA

In life many stages
come to an end and
this is one of them,
which with effort,
dedication and
support from my
family came to a end.

This study is
dedicated to all
those who believed
and did not believe
that through effort,
dedication and
discipline dreams
Come true.

“PER ASPERA AD ASTRA”

Alexander Tufiño

AGRADECIMIENTO

Agradecido con Dios y con mi familia por haberme apoyado en todo el camino forjado hasta el día de hoy, donde siempre hubo caídas, pero también hubo victorias en el día a día.

Gracias a la Escuela Politécnica Nacional, en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica donde conocí grandes compañeros y amigos que a lo largo de cada semestre y de este duro camino me apoyaron ya se voluntaria o involuntariamente a crecer y poder llegar a terminar con esta etapa de mi vida profesional.

Al Ing. Carlos Díaz, Ing. Patricia Proaño, Don Rene Jame mi más sincero agradecimiento por todo el apoyo brindado y pautas que supieron manifestar en su momento que fueron muy importante para poder culminar con este trabajo de Titulación.

Alexander Tufiño

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Acero ASTM A572	4
1.2. Composición química del acero ASTM A572	4
1.3. Maquinabilidad de los aceros	5
1.3.1. Estructura del grano.....	5
1.3.2. Características de trabajo de las herramientas de corte	6
1.3.3. Duración de la herramienta de corte.....	6
1.3.4. Duración económica de la herramienta	6
1.3.5. Velocidad de corte.....	6
1.3.6. Lubricantes.....	7
1.4. Procesos de maquinado.....	7
1.4.1. Proceso de fresado CNC.....	7
1.4.2. Parámetros para el proceso de fresado CNC	8
1.4.3. Función que cumple el CNC (control numérico computarizado)	9
1.4.4. Programación.....	9
1.5. Soldabilidad de los aceros.....	11
1.5.1. Factores que afectan a la soldabilidad.....	11

1.5.2. Regiones presentes en la soldadura	11
1.5.2.1. Región fundida	11
1.5.2.2. Línea de fusión.....	12
1.5.2.3. Zona afectada por el calor (ZAC o HAZ).....	12
1.6. Soldadura fuerte.....	12
1.6.1. Mojabilidad	13
1.6.2. Capilaridad	14
1.6.3. Cohesión	15
1.6.4. Aplicaciones	15
1.6.5. Ventajas	15
1.6.6. Desventajas.....	16
1.6.7. Principio de funcionamiento.....	16
1.6.8. Procesos de soldadura fuerte.....	17
1.6.9. Soldadura fuerte en horno.....	17
1.6.9.1. Descripción del proceso	18
1.6.9.2. Material de aporte.....	19
1.6.9.2.1. Mojado y adhesión	19
1.6.9.2.2. Fusión y fluidez.....	20
1.6.9.2.3. Licuación	20
1.6.9.2.4. Selección del material de aporte.....	21
1.6.9.3. Fundentes para soldadura fuerte.....	21
1.6.9.4. Bórax.....	22
2. METODOLOGÍA.....	24
2.1. Caracterización del material base.....	24
2.2. Análisis por espectrometría de chispa	25
2.3. Obtención de las muestras	25
2.4. Mecanizado por arranque de viruta del acero ASTM A572.....	27
2.5. Dimensionamiento y preparación de probetas.....	29
2.6. Soldadura en el horno (mufla)	31

2.6.1. Limpieza de placas a soldar	32
2.6.1.1. Limpieza mecánica	32
2.6.2. Selección de material de aporte y fundente	32
2.6.3. Montaje de placas, colocación de material de aporte y fundente	33
2.6.4. Preparación del horno(mufla)	36
2.7. Corte de probetas normalizadas por chorro de agua	40
2.8. Ensayos destructivos	41
2.8.1. Ensayo de durezas	41
2.8.2. Ensayo de tensión	42
2.8.3. Ensayo de pelado	42
2.9. Metalografía.....	43
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
3.1. Resultados del ensayo de durezas	49
3.2. Resultados del ensayo de tracción.....	50
3.3. Resultados del ensayo de pelado.....	53
3.4. Resultados de las metalografías de las probetas soldadas	57
3.5. Resultados del análisis químico	63
3.6. Discusión de resultados de los ensayos realizados.....	64
4. CONCLUSIONES.....	66
5. RECOMENDACIONES.....	67
Referencias Bibliográficas	68
ANEXOS	71
ANEXO I. Combinaciones metal base-metal de aporte para soldadura fuerte.	71
ANEXO II. Clasificación de los fundentes de soldadura fuerte con materiales de aporte de soldadura fuerte.....	72
ANEXO III. Durezas y cálculo de desviación estándar de las probetas en las zonas de soldadura.....	73
ANEXO IV. Durezas y cálculo de desviación estándar de los materiales base y de aporte antes del proceso de soldadura.....	75
ANEXO V. Registro de procedimiento de calificación (PQR)	76

ANEXO VI. Relación entre dureza y esfuerzo de tensión.....	78
ANEXO VII. Equivalencias entre durezas brinell, rockwell, vickers y shore y la resistencia a la tracción.	79
ANEXO VIII. Cálculo del esfuerzo de tensión de material base (acero ASTM A572) en condición de recocido.	80
ANEXO IX. Informe técnico de espectrometría por chispa.	81
ANEXO X. Informe técnico del ensayo de tensión.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de esfuerzo vs deformación del acero ASTM A572 Gr50.....	4
Figura 1.2. Diagrama de flujo del proceso de mecanizado con CAD/CAM y CNC.	10
Figura 1.3. Regiones que se generan en una soldadura.....	12
Figura 1.6. Proceso de soldadura fuerte en horno.	18
Figura 1.7. Diagrama constitucional plata-cobre.	20
Figura 2.1. Diagrama de flujo que indica todo el proceso realizado necesario para el proceso de soldadura fuerte y el respectivo análisis realizado con los resultados obtenidos.....	24
Figura 2.2. Plancha de material base.....	26
Figura 2.3. Esquema de corte y obtención de muestras	26
Figura 2.4. Montaje de la plancha de acero ASTM A572	26
Figura 2.5. Corte de la plancha de acero ASTM A572	27
Figura 2.6. Muestras de acero ASTM A572 para el proceso de soldadura.....	27
Figura 2.7. Mecanizado longitudinal de la muestra	28
Figura 2.8. Mecanizado transversal de la muestra.....	28
Figura 2.11. Montaje de las muestras para la soldadura.....	31
Figura 2.13. Conjunto que muestra la parte inferior de la matriz de sujeción con sus pernos, placa de material base y material de aporte.....	34
(Fuente: Propia).....	34
Figura 2.14. Conjunto de placas montadas, matriz y pernos.....	34
Figura 2.15. Conjunto de placas montadas, matriz, pernos y resortes	35
Figura 2.16. Fundente y material de aporte colocado en el posicionamiento para la soldadura.....	35
Figura 2.17. Mufla eléctrica del laboratorio de metalografía desgaste y falla	36
Figura 2.18. Diagrama de escalas de temperaturas con las cuales trabaja la mufla ...	37
Figura 2.19. Posicionamiento con el cual se ingresará cada una de las placas a soldar	38

Figura 2.20. Placas después del proceso de soldadura, para el posterior enfriamiento al aire	38
Figura 2.21. Enfriamiento al aire de las placas soldadas	39
Figura 2.22. Extracción de probetas que fueron cortadas por chorro de agua	40
Figura 2.23. Junta soldada para la calificación del procedimiento.....	40
Figura 2.24. Probeta que muestra las zonas donde se tomaron las mediciones de durezas (puntos rojos)	41
Figura 2.25. De izquierda a derecha, material base, material de aporte. Antes del proceso de soldadura	41
Figura 2.26. Especificación de las dimensiones de la probeta para ensayos de tensión.	42
Figura 2.27. Especificación de las dimensiones de la probeta para ensayos de pelado.	43
Figura 2.28. Máquina de desbaste grueso Buehler.....	44
Figura 2.29. Plancha donde se colocan lijas de papel para desbaste fino.....	44
Figura 2.30. Lijas de papel para desbaste fino (240, 320, 400, 500).	45
Figura 2.31. Máquina de pulido de probetas Buehler.	45
Figura 2.32. Probetas pulidas y colocadas en un recipiente.....	46
Figura 2.33. Microscopio Olympus GX441F.....	46
Figura 2.34. Frascos de reactivos utilizados para cada una de las probetas.....	47
Figura 2.35. Probeta dividida para indicar las zonas de materia base y de aporte.	47
Figura 2.36. Probeta atacada por los reactivos químicos	48
Figura 3.1. Durezas de las probetas luego del proceso de soldadura y del material base y de aporte antes del proceso de soldadura	49
Figura 3.2. Probetas sometidas al ensayo de tracción en diferentes vistas. a) Vista superior, b) Vista lateral izquierda, c) Vista lateral derecha.....	51
Figura 3.3. Probetas ensayadas a tracción	52
Figura 3.4. Probetas ensayadas a tracción (acero A36).....	53
Figura 3.5. Probeta 1P del ensayo de pelado	54
Figura 3.6. Vista frontal de la zona fracturada de la probeta 1P del ensayo de pelado	55
Figura 3.7. Probeta 2P del ensayo de pelado	56

Figura 3.8. Probeta 2P del ensayo de pelado (separada) 56

Figura 3.9. Probetas del ensayo de pelado. De izquierda de derecha A36-B, A36-P .. 57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición química acero ASTM A572	5
Tabla 1.2. Características químicas del bórax	22
Tabla 2.1. Separación recomendada de la unión	30
Tabla 2.2. Características físicas de la Mufla.	36
Tabla 2.3. Características físicas de la Mufla.	39
Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción.....	50
Tabla 3.2. Esfuerzos de tracción de las probetas ensayadas.....	50
Tabla 3.3. Esfuerzos de tracción de las probetas ensayadas (Trabajo previo).....	52
Tabla 3.4. Resultados del ensayo de pelado.	53
Tabla 3.5. Áreas de las probetas ensayadas.	54
Tabla 3.6. Áreas de las probetas ensayadas (acero A36).....	57
Tabla 3.7. Resultados de la micrografía del material base (a) 100X, (b) 50X.	58
Tabla 3.8. Resultados de la micrografía del material de aporte (a) Micrografía 50X (antes del proceso de soldadura) (b) Micrografía 50X (después del proceso de soldadura). .	58
Tabla 3.9. Resultados de la macrografía de la zona de fusión del material de aporte con la cara (a) inferior del material base 100X (b) superior del material base 100X.....	59
Tabla 3.10. Resultados de la macrografía de la zona de la unión del material de aporte con la cara (a) inferior del material base 50X (b) superior del material base 50X.....	59
Tabla 3.11. Resultados de las micrografías de la soldadura de las caras del material base con el material de aporte 50X (a) cara superior 50X (b) cara inferior (c) cara superior 100X.	60
Tabla 3.12. Resultados de la micrografía de la separación entre placas soldadas (a) cara superior 50X (b) cara inferior 100X.	61
Tabla 3.13. Resultados de la micrografía de la distancia de separación (a) máxima (b) entre placas (unión soldada 1), (c) entre placas (unión soldada 2),	62
Tabla 3.14. Resultados del ensayo por espectrometría	63

RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo la caracterización de la soldadura indirecta en horno del Acero ASTM A572, donde este acero fue sometido a un proceso de fresado superficial CNC en forma de canales para analizar y comparar si el proceso de soldadura fue mucho más eficiente que el realizado en otro estudio al usar acero de bajo carbono y sin un proceso de mecanizado previo. El análisis realizado se basa en los ensayos de laboratorio como dureza, pelado y metalografías después del proceso de soldadura. Los resultados obtenidos en la investigación mostraron que al realizar un mecanizado superficial se requiere utilizar un mayor porcentaje de material de aporte, debido a este hecho, la resistencia mecánica no mostró incremento alguno, la fusión de los materiales fue muy alta y se lo pudo observar en el ensayo de pelado, pero al ser comparadas con otro estudio realizado, se llegó a la conclusión que el mecanizado superficial no ayudó a obtener mejores resultados para este proceso de soldadura.

Palabras clave: Acero, defectos, dureza, mecanizado, parámetros, soldadura.

ABSTRACT

This document aims to characterize the indirect furnace welding of ASTM A572 Steel, where this steel was subjected to a CNC surface milling process in the form of channels to analyze and compare if the welding process was much more efficient than the performed in another study using low carbon steel and without a prior machining process. The analysis carried out is based on laboratory tests such as hardness, peeling and metallography after the welding process. The results obtained in the investigation showed that when carrying out surface machining it is required to use a higher percentage of filler material, due to this fact, the mechanical resistance did not show any increase, the fusion of the materials was very high and it could be observed in the peeling test, but when compared with another study carried out, it was concluded that surface machining did not help to obtain better results for this welding process.

Keywords: Defects, hardness, machining, parameters, welding.

CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDADURA INDIRECTA (FUERTE) EN HORNO DEL ACERO ASTM A572 APLICANDO UN PROCESO DE FRESADO SUPERFICIAL PREVIO AL PROCESO DE SOLDADURA

INTRODUCCIÓN

El acero ASTM A572 es un material de alta resistencia y baja aleación, utilizado principalmente para aplicaciones estructurales, por ejemplo, construcción de puentes y estructuras en general. Las características principales de este acero es su facilidad para su soldadura a precios moderados y su buen manejo.

El proceso de soldadura indirecta (fuerte) en horno consiste en someter al metal base y metal de aporte a temperaturas superiores a 450°C, el punto de fusión del metal de aporte es menor que el del metal base por lo tanto este último no se va a fundir, mientras que el de aporte al hacerlo y con ayuda de la propiedad de capilaridad, va a producir la unión soldada entre placas de metal base.

Debido a que no existen estudios previos del comportamiento de este acero mecanizado (fresado superficial) y sometido a un proceso de soldadura fuerte en horno, la poca bibliografía existente y los escasos trabajos considerando la maquinabilidad de la zona de soldadura, ayudan a estudiar y analizar que los procesos de mecanizado pueden tener alguna incidencia con el proceso de soldadura fuerte y propiedades superficiales del material, por ello se realiza un estudio para elegir el material de aporte idóneo para el proceso de soldadura fuerte en horno y material base (acero ASTM A572), el cual garantizará que exista un gran resultado en la coalescencia y unión de los materiales soldados, esta parte del estudio se la realiza con la ayuda de la norma AWS A5.8. El fundente se lo elige según el material de aporte a usarse para realizar el proceso de soldadura fuerte, una mala elección del fundente puede provocar una junta soldada con una baja resistencia y mala calidad.

Los resultados de este estudio serán de gran ayuda para demostrar la influencia que tiene el arranque de viruta previo a la soldadura en horno, así como las ventajas y desventajas presentes en comparación con un estudio previamente realizado.

Objetivo general

Caracterizar la soldadura indirecta (fuerte) en horno del acero ASTM A572 aplicando un proceso de fresado superficial previo al proceso de soldadura.

Objetivos específicos

Obtener las superficies mecanizadas de las piezas.

Ejecutar la soldadura fuerte por horno y determinar que parámetros influyen en esta.

Realizar diferentes ensayos mecánicos para poder caracterizar al material empleado.

Comparar los resultados obtenidos de los diferentes ensayos con los datos del estudio previo de este proceso de soldadura realizado a diferentes materiales.

1. MARCO TEÓRICO

La columna vertebral del mundo de la industria lo constituyen los metales ferrosos. Al combinar hierro con diferentes metales y elementos, se obtienen distintas clases de aceros, de los cuales la mayoría son aceros al carbono, estos también contienen porcentajes de cobre (0.60% máx), manganeso (1.65% máx) y silicio (0.60% máx) [31]. Este tipo de aceros según su contenido de carbono se clasifican en: aceros de bajo, medio y alto contenido de carbono.

Los aceros con bajo contenido de carbono tienen un porcentaje de este elemento menor a 0.25% en su aleación. Son muy trabajables, es decir tienen una facilidad para ser deformados, cortados, maquinados y soldados. Pueden unirse con todo tipo de proceso de soldadura. La gran parte de estos aceros no responden a ser tratados térmicamente, salvo a los de endurecimientos superficial [47]. Entre sus aplicaciones están la fabricación de puertas y ventanas, bases de máquinas, partes de maquinaria y grandes porcentajes de tanques de agua. En gran parte de los casos se utilizan estos aceros de la misma forma que llegan desde las acerías, es decir sin realizarle ningún tratamiento térmico especial [13].

Los aceros con medio contenido de carbono contienen un porcentaje de este elemento entre 0.25% y 0.60% en su aleación, son fáciles de templar, y su dureza puede cambiar desde totalmente blandos, hasta una lectura Rockwell C de 25. Su microestructura generalmente es martensita. Para que las propiedades mecánicas de estos aceros sean mejoradas se realizan tratamientos térmicos. Se fabrican con estos aceros pernos pasantes, birlos, barras de conexión y ejes frontales [31].

Los aceros con un contenido alto de carbono, contienen entre 0.60% a 1.2% de este elemento en su aleación. Incluyen muchos aceros que generalmente se emplean templados con dureza que va desde 40 y 63 HRc hasta el temple completo. Con estos aceros se fabrican brocas, puntas de brocas, rejas de arado, ruedas para carros de ferrocarril, rodillos de laminación, y otros artículos que no necesitan ser soldados para su manufactura, pero estas piezas se reparan normalmente con soldadura. [31].

Para este trabajo se va a utilizar el acero de bajo contenido de carbono ASTM A572 como material base, las características de este acero se muestran en la siguiente sección.

1.1. Acero ASTM A572

El acero ASTM A572 es un acero estructural de baja aleación, alta resistencia, buena tenacidad y buena resistencia a la fatiga, se lo usa para aplicaciones estructurales como: construcciones remachadas, puentes, estructuras de antenas, construcciones atornilladas y soldadas [1], [2]. La microestructura de este acero principalmente consiste en perlita (P), y ferrita (F) con pequeñas cantidades de nitruros o carburos en función del tipo de proceso de fabricación recibido [3]. Existen 5 grados de aceros según su composición química y sus propiedades mecánicas (42, 50, 55, 60 y 65). Para el presente proyecto de investigación como material base se utiliza acero de grado 50.

Las propiedades de dureza y resistencia de este acero son altas, esto es porque se encuentran presentes y dispersas partículas de carburo en la microestructura de carbono y elementos aleantes como manganeso, fósforo y azufre. Elementos como el niobio y el vanadio originan una estructura cristalina más fina y un incremento en la tenacidad [4]. En la figura 1.1 se muestra una curva esfuerzo vs deformación típica para el acero ASTM A572 Gr50. Se puede observar que posee un módulo de elasticidad (E) de 200 GPa, una resistencia de fluencia mínima (F_y) de 345 MPa (50ksi) y una resistencia máxima (F_u) de 450 MPa (65ksi). La ductilidad medida como la máxima deformación unitaria es de 21% en espesores menores a 50mm. [1], [5]

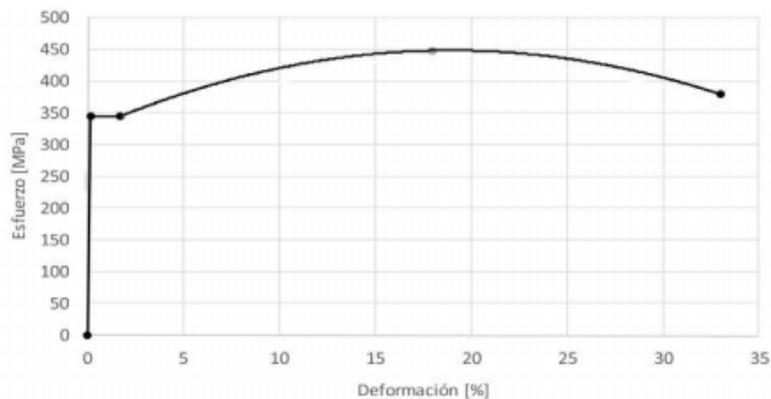


Figura 1.1. Diagrama de esfuerzo vs deformación del acero ASTM A572 Gr50.

(Fuente: Guía práctica para el diseño de estructuras de acero de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015)

1.2. Composición química del acero ASTM A572

Este acero contiene un bajo contenido en peso de carbono, 0.05 a 0.25 wt.%, y manganeso (Mn) en un rango de 0.75 a 1.35 wt.%, a estos aceros también se los denomina micro-aleados debido a que contienen elementos como titanio (Ti), niobio (Nb), vanadio (V) y otros, que están presentes en concentraciones bajas menores o

iguales a 0.1 wt.% y que se adicionan para obtener propiedades mecánicas específicas. [6], [7]

En la Tabla 1.1 se muestran los requerimientos químicos (composición química) obtenidos de la norma ASTM A572/A572-18.

Tabla 1.1. Composición química acero ASTM A572

Composición Química								
Elemento	% máx.							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Nb	V
ASTM A572 G50	0,23	1,60	0,04	0,05	0,40	0,06	0,005-0,05	0,01-0,15

(Fuente: http://www.acerosotero.cl/planchas_acero_carbono_astm_a572_gr50.html)

La inclusión de manganeso en su composición química es muy importante por su gran aporte a las propiedades y a su reducido costo, por esta razón este elemento es básico en los aceros comerciales, se lo agrega con el fin de que participe en la soldadura como agente de desulfuración, desoxidación y ayude a contrarrestar los efectos nocivos del azufre, con esto se reduce la tendencia a la fragilidad en caliente. [8]

El cromo es un elemento bien conocido por sus buenas características para resistir a la corrosión, esto es debido a que es un metal muy reactivo, en especial uno de sus productos, el óxido de Cr (Cr_2O_3). Este óxido es semiconductor y crece por difusión de los cationes del metal hacia la interfase metal/óxido y transporta estos cationes hasta los espacios vacantes. El uso de este elemento proporciona propiedades de resistencia a la tracción y dureza, además de inoxidable, entre otras. [9]

1.3. Maquinabilidad de los aceros

Es la capacidad que tienen los aceros para permitir cualquier proceso de arranque de viruta sobre su superficie, con la ayuda de máquinas herramientas. Para llevar a cabo este proceso, se siguen criterios como, la estructura del grano, el tipo de material, las características de la herramienta de corte, la operación y condiciones de mecanizado, la lubricación mediante el mecanizado, entre otros.

1.3.1. Estructura del grano

La maquinabilidad de un metal se ve afectada por su microestructura, y se modificará si el metal previamente ha sido recocido. La ductilidad y la resistencia al esfuerzo cortante de un metal pueden cambiarse en gran medida por operaciones como recocido, normalizado y alivio de esfuerzos. Ciertas modificaciones físicas y químicas del acero mejorarán su maquinabilidad. Los aceros de maquinado libre generalmente han sido

modificados mediante: adición de azufre, plomo, sulfito de plomo y trabajo en frío (modifica la ductilidad). Una vez realizadas estas modificaciones (de maquinado libre) al acero, aumenta la vida útil de la herramienta, se generan un mejor acabado superficial y requiere un menor consumo de energía para el proceso de maquinado. [11]

1.3.2. Características de trabajo de las herramientas de corte

La herramienta de corte por obvias razones debe tener mayor resistencia y dureza que el material que se va a mecanizar, también una alta resistencia al desgaste, buena tenacidad, conservación de la dureza a elevadas temperaturas, un reducido coeficiente de fricción, alta resistencia a rotura por compresión y a la rotura por flexión, estabilidad química y una apropiada conductividad térmica según las condiciones de uso. El material con el que estas herramientas de corte están fabricadas depende del tipo de máquina herramienta que se va a utilizar así como el tipo de material al cual se va a realizar el desprendimiento de viruta. [50]

1.3.3. Duración de la herramienta de corte

La duración de la herramienta de corte es valorada según el tiempo total de mecanizado la cantidad de material desprendido, cantidad de elementos maquinados, velocidad de corte expresada en tiempo efectivo y velocidad de corte relativa que es la velocidad que la herramienta tiene, tanto para el material que se ensaya como para el que se utiliza como referencia en condiciones de corte similares. [12]

1.3.4. Duración económica de la herramienta

Se la puede definir por la destrucción total del filo, las dimensiones preestablecidas de la franja de desgaste del cráter, el acabado superficial de la pieza y los cambios de las fuerzas de corte, debido a su variación por el desgaste. [12]

1.3.5. Velocidad de corte

Se mide en metros por minuto, y es la velocidad a la que la herramienta de corte realiza el arranque de viruta. Depende de la potencia de la máquina, las características de la herramienta y del material al cual se va a maquinar. Si el arranque de viruta se produce cuando el material está girando como en la fresadora o en el torno, la velocidad de corte será medida en revoluciones por minuto y estará en función del diámetro de la pieza o de la herramienta. [12]

1.3.6. Lubricantes

Una de las principales causas que producen el desgaste prematuro de las herramientas de corte es la elevación de la temperatura. Para evitar esto la herramienta y la pieza deben ser refrigeradas usando chorros de agua saturada de sosa.

Los lubricantes ayudan a disminuir el rozamiento entre la herramienta y la pieza, mantienen el filo a una temperatura inferior a la de pérdida de sus cualidades de corte, la velocidad de corte se incrementa en un 50%, protege a la pieza de la oxidación usando los lubricantes adecuados, limpia el material que se está mecanizando de partículas y arrastran la viruta. [12]

1.4. Procesos de maquinado

Existen varios procesos con los cuales se puede realizar el maquinado o mecanizado de diferentes materiales, entre los cuales tenemos: fresado, torneado, taladrado, brochado, mecanizado CNC, etc. Para el presente trabajo se utiliza únicamente del proceso de fresado CNC.

1.4.1. Proceso de fresado CNC

Es un proceso de arranque de viruta empleando una herramienta rotativa que posee varios dientes llamada fresa. Al ir girando las cuchillas en dicho proceso, se va a desprender material de la probeta base que está sujeta en la mesa horizontal al irse acercando la fresa hacia ella. En el mercado se puede encontrar una gran variedad de fresas de acuerdo con la forma de corte que se desea dar a la pieza de trabajo. Es uno de los procesos más comúnmente utilizados en los talleres e industrias de maquinaria para fabricar productos y piezas de alta precisión en distintas formas y tamaños. Dependiendo del tipo de maquinado o forma que se desea dar a la pieza se emplearán distintas velocidades de corte. Para materiales con una mayor dureza se emplea velocidades de corte bajas, mientras que para materiales más blandos se cortan a altas velocidades o velocidades más rápidas. [22]

De manera general, no existe mucha diferencia entre fresadoras convencionales y CNC, es así, que se puede transformar una fresadora manual en una CNC con la ayuda de Kits especiales. Ambos equipos, manuales como CNC, poseen partes móviles, como los carros de desplazamientos transversal y lateral, cabezal de corte, husillo y la mesa que son las mismas. La diferencia entre estos dos tipos de fresadoras es que en el CNC

los movimientos para realizar los mecanizados son de manera digital o computarizada por medio de un lenguaje llamado G&M y no por medio de accionadores móviles o palancas. [41]

Las siguientes operaciones son las más realizadas con una máquina fresadora convencional o CNC:

- Torno fresado: realiza agujeros y un fresado exterior al rodear la pieza.
- De ranurado de chaveteros: se realiza un ranurado trapezoidal asimétrica.
- Ranurado de forma: se realiza un ranurado con una disposición en T.
- De ranurado recto: produce ranuras lineales.
- Cubicaje: para crear piezas de forma cúbica.
- Escuadra: proceso para realizar una superficie escalonada.
- Planeado: sirve para aplanar la superficie.
- Fresado de corte: se da un corte o pulido previo en el material para que este se adapte a las necesidades de trabajo. [22]

1.4.2. Parámetros para el proceso de fresado CNC

A continuación, se indican los distintos parámetros para el proceso de fresado CNC:

- Velocidad de corte (V_c): es la velocidad superficial con la cual filo desprende material de la pieza.
- Velocidad del husillo (n): es el número de vueltas por minuto que realiza la fresa en el husillo.
- Avance por diente (f_z): en función del valor que recomiendan para el grosor de la viruta se puede calcular el valor del avance por diente
- Avance por revolución (f_n): al tener un desplazamiento de rotación completa de la herramienta se obtiene este valor auxiliar.
- Grosor de viruta máximo (h_{max}): este valor esta dado en función de (f_z), (a_e) y (k_r). Este valor ese de mucha importancia para el avance por diente.
- Régimen de arranque de viruta: volumen de material eliminado por unidad de tiempo.
- Fuerza de corte específica (k_{ct}): es una constante y es empleada para el cálculo de la potencia (N/mm^2).
- Tiempo de mecanizado (T_c): longitud de mecanizado (l_m) dividida entre en avance de la mesa (V_f). [23]

1.4.3. Función que cumple el CNC (control numérico computarizado)

La principal función del centro numérico computarizado en una fresadora es el control y monitoreo de los diferentes movimientos que se pueden realizar con dicha máquina herramienta (movimiento de la mesa, carros transversales, husillo), por medio de un lenguaje de programación. Esta tecnología cuenta con una amplia capacidad para realizar diseños desde los más básicos hasta los más complejos, además ofrece una mayor precisión respecto a las máquinas tradicionales debido a que la máquina realiza avances programados totalmente asistidos por computador. Los softwares de programación más utilizados y que se complementan para las distintas funciones necesarias en el CNC son el CAD (diseño asistido por computadora) y CAM (manufactura asistida por computadora) facilitando un diseño previo y una simulación del proceso de mecanizado que se desea realizar. [41]

El objetivo primordial del control numérico computarizado es incrementar la productividad, precisión, rapidez, y el menor uso de talento humano. El operario de la máquina CNC cuenta con el programa, parámetros y dimensiones para ser puesto en marcha n número de veces, después de ejecutar una simulación previa para observar si el lenguaje de programación se ejecuta de la manera correcta, se efectúa el mecanizado correspondiente. [24]

1.4.4. Programación

A través de un modelo realizado con la ayuda del CAM o software similar, se genera un archivo denominado PROGRAMA-PIEZA, el archivo es llevado directamente por una red compartida o con la ayuda de una unidad USB que se encuentra en el CNC y se lo puede ejecutar después en dicha máquina. Para que la máquina pueda leer toda la programación, el programa debe estar escrito en formato ISO (DIN 66025) por medio de una programación en código G (G-codes) siguiendo el estándar RS274D para que se ejecute de manera correcta. Además, realiza una simulación previa para poder observar si se ejecutan correctamente cada una de las líneas de programación evitando obtener errores previos que puedan ocasionar daños en la máquina y sus componentes. Solamente programas-piezas que tengan el formato correcto podrán ser ejecutados en el CNC. [25]

La Figura 1.2 muestra el diagrama de flujo del proceso de mecanizado mediante control numérico computarizado, mencionando todos los pasos que se deben seguir de inicio a fin, para obtener la pieza maquinada.

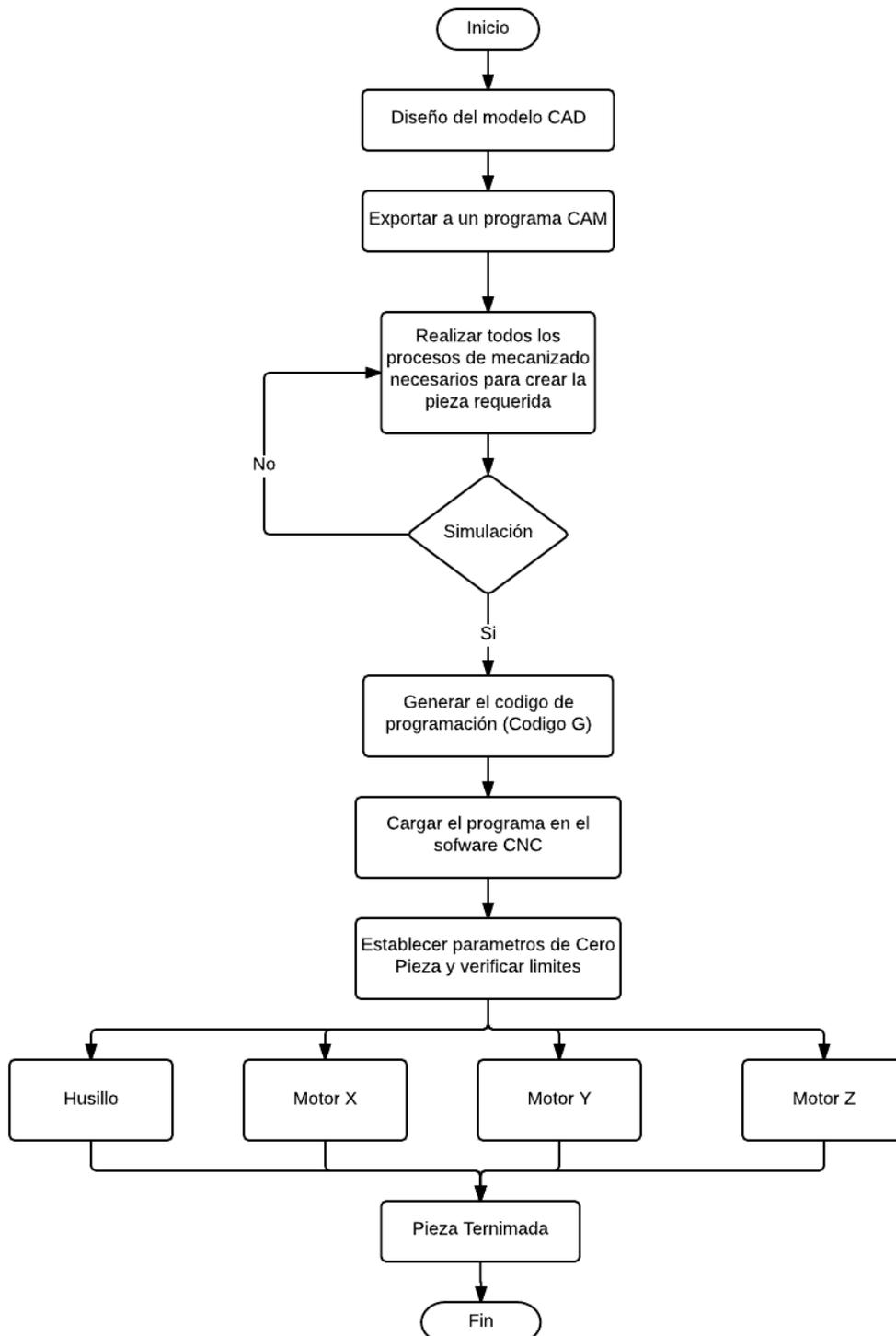


Figura 1.2. Diagrama de flujo del proceso de mecanizado con CAD/CAM y CNC.

(Fuente: <https://vdocuments.site/diagrama-de-flujo-fresadora-cnc.html>)

1.5. Soldabilidad de los aceros

Es la capacidad de los materiales de la misma o diferente naturaleza para ser unidos mediante procesos de soldadura, la unión soldada resultante debe satisfacer las necesidades para las que fue elaborada. Entonces, la soldabilidad tiene como objetivo alcanzar la continuidad de la junta soldada asegurando propiedades como resistencia mecánica, resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión, ductilidad, tenacidad y aspecto. [15]

Existe una gran variedad de tipos de soldadura, las más usadas en la industria y en tareas de construcción son: soldadura MIG, SMAW, TIG, que son procesos de soldadura por arco y soldadura blanda y fuerte cuya diferencia únicamente está en la temperatura de fusión de los materiales de aporte. Para el presente estudio se utilizará la soldadura fuerte y se usará un horno de mufla para llevarla a cabo.

1.5.1. Factores que afectan a la soldabilidad

Existen varios factores que influyen a la soldabilidad, y son:

- Tipo de material base.
- Influencia de los elementos aleantes.
- Transformaciones producidas en el material base.
- Tensiones residuales generadas durante la soldadura.
- Tipo de junta y procesos de soldadura.
- Velocidad de enfriamiento.
- Temperatura de precalentamiento.
- Calor entregado. [16]

1.5.2. Regiones presentes en la soldadura

1.5.2.1. Región fundida

Es la región donde se produce la fusión y posterior solidificación del material de aporte (si existe) el cual se genera con el metal base y se produce el metal de soldadura. [16]

1.5.2.2. Línea de fusión

Es la intersección entre la zona fundida y la que se encuentra en estado sólido. Debido a que en esta zona existen áreas con fusión parcial, es la región más propensa a inicio de fisuras. [16]

1.5.2.3. Zona afectada por el calor (ZAC o HAZ)

La ZAC, es el área de metal que no se funde, sin embargo, sus propiedades cambian debido a la exposición a elevadas temperaturas. Estas variantes en las propiedades del material comúnmente son el resultado del proceso de soldadura o el corte a altas temperaturas. La zona afectada por el calor representa el ciclo térmico de distintos puntos en una unión soldada, donde se indica el gradiente térmico entre dos puntos cualesquiera. [16]

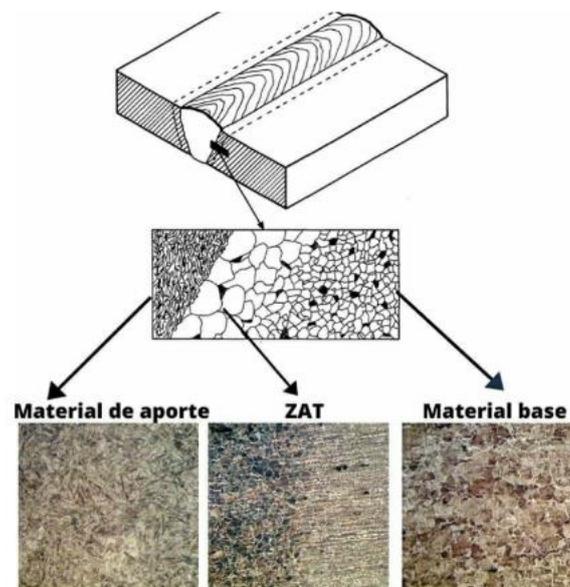


Figura 1.3. Regiones que se generan en una soldadura.

(Fuente: <https://n9.cl/m3n8y>)

1.6. Soldadura fuerte

La soldadura fuerte se encarga de unir materiales al calentarlos a una temperatura superior a 450°C, con la ayuda de un material de aporte cuyo punto de fusión debe ser menor que el del metal base, de modo que al ser sometidos a la temperatura mencionada, el material de aporte cambiará su estado sólido a líquido, mientras que el metal base mantendrá su estado sólido, de manera que el material de aporte se

distribuye homogéneamente entre las superficies de la junta de metal base correctamente ajustadas por acción de la atracción capilar. [31]

Existen tres criterios que se deben cumplir para que los resultados de la soldadura fuerte sean excelentes.

1. Los metales base no se deben fundir para que los elementos o piezas se unan.
2. La temperatura que debe tener el metal de aporte para su cambio de fase de sólido a líquido (temperatura de liquidus) debe ser mayor que 450°C (840°K)
3. La capilaridad debe permitir que el metal de aporte penetre o se mantenga en las superficies del metal base mojándolas por completo.

Además, las piezas a ser soldadas deben estar limpias y libres de cualquier tipo de impureza y se las debe proteger con una atmósfera inerte o fundente, esto es para evitar una excesiva oxidación mientras se procede con el calentamiento. El diseño que deben tener las piezas debe ser el adecuado, para permitir la acción capilar del material de aporte, a más de esto, hay que elegir un proceso de calentamiento conveniente, para que se mantenga la temperatura de soldadura indirecta y la distribución de calor sea la apropiada. [18]

1.6.1. Mojabilidad

La mojabilidad es el ángulo de contacto que existe entre un sólido y un líquido. La tensión superficial, conforme el material de aporte se desplaza por el material base va formando este ángulo (ángulo de mojabilidad o de contacto). Con ángulos menores a 90°, se dice que el material en estado líquido moja, por lo tanto se lo considera adhesivo. Se dice que el material de aporte ha mojado cuando este se extiende por la superficie del metal base dejando una película continua y permanente. [30], [34]

El mojado del material de aporte sobre el material base, depende de las propiedades de tensión superficial de los materiales en cuestión, del grado de aleación que tiene lugar durante el proceso de soldadura, de la temperatura, de la presencia o ausencia de fundentes y de la rugosidad del material sólido. [30], [34]

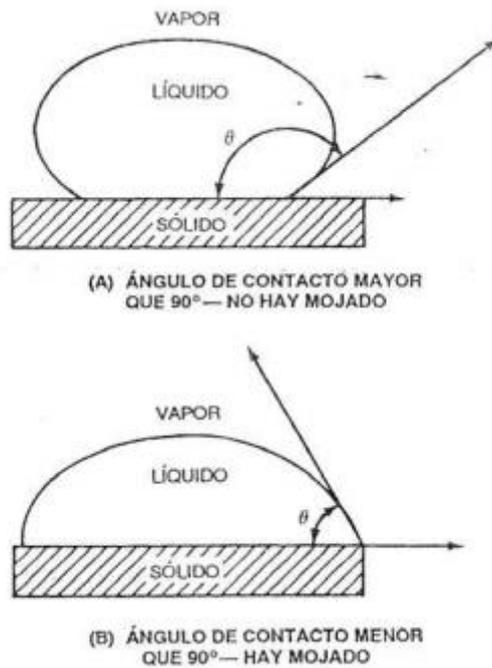


Figura 1.4. Ángulos de mojado de materiales de aporte para soldadura fuerte.

(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prenotase-Hall Hispanoamericano; México; 1996; p.p. 408)

1.6.2. Capilaridad

La capilaridad es la capacidad que tiene un tubo angosto para succionar un líquido en sentido contrario a la fuerza de gravedad, la altura a la que asciende el líquido depende de que tan angosto es el tubo, es decir, mientras más estrecho es, la altura a la que el líquido subirá será mayor y viceversa. El flujo capilar del metal de aporte depende de sus características de mojado, de su tensión superficial, de las reacciones metalúrgicas con los óxidos involucrados y el material base. [30], [34]

Uno de los factores que más influye en la altura de penetración de metal de aporte, es la holgura entre los metales que se van a soldar, así como también el ángulo de contacto entre el metal base y metal de aporte. Una característica necesaria que deben tener los materiales de aporte, es la elevada fluidez, ya que sería complicado para la acción capilar atraer un material de aporte viscoso, sin importar si la junta tiene una buena holgura. [30], [34]

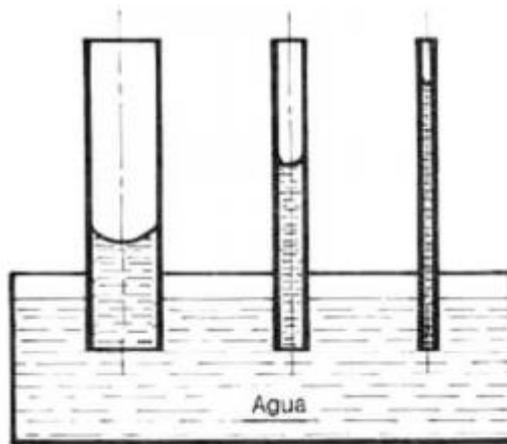


Figura 1.5. Efecto de la capilaridad, la superficie del líquido es cóncava.

(Fuente: <https://n9.cl/ovda0>)

1.6.3. Cohesión

En soldadura fuerte, lo que se desea es acercar las dos piezas metálicas que se van a unir, a una distancia en que las fuerzas de interacción interatómica ya tienen influencia, consiguiendo así las fuerzas de enlace entre los átomos constituyentes o también llamada cohesión. La unión entre una superficie sólida y un líquido dan como resultado estas fuerzas de enlace y son las mismas que en el proceso de soldadura en fase sólida, por lo que es necesario limpiar superficialmente los metales base y juntarlos lo más cerca posible para obtener un contacto completo y eficiente y así conseguir un enlace metálico entre ellos. [30], [34]

1.6.4. Aplicaciones

Este tipo de soldadura se utiliza para generar resultados que en ocasiones no se consiguen con otros procesos de soldadura. Este proceso es muy usado para reparar matrices, fabricar motores de aviones de alta calidad, realizar juntas múltiples e inaccesibles, para unir tubería de cobre, vehículos espaciales e incluso para la elaboración de juguetes baratos. [18]

1.6.5. Ventajas

Las ventajas del proceso de soldadura fuerte son:

- Permite hacer la soldadura de varias juntas a la vez
- Se usa esta soldadura para desensamblar las uniones posteriormente.

- Este proceso hace posible la unión de distintos metales sin la necesidad de que el metal base se funda, como sucede en otros procesos soldadura.
- La soldadura fuerte puede mantener tolerancias estrictas a lo largo de todo el proceso.
- Se pueden unir metales de diferentes espesores. [31]

1.6.6. Desventajas

La soldadura fuerte presenta las siguientes desventajas:

- Existe el peligro de explosión con partes húmedas.
- Se presenta cierta oxidación en el proceso de enfriamiento.
- Para lotes pequeños, el equipo resulta costoso.
- Las partes a unir deben estar completamente limpias y cubiertas con bastante fundente.
- Se requiere técnicos capacitados para algunos procesos de soldadura fuerte.
- Algunos procesos de soldadura fuerte resultan relativamente lentos.
- La erosión puede causar una debilidad en la unión y hacerla inapropiada para las aplicaciones propuestas. [31]

1.6.7. Principio de funcionamiento

Para la soldadura fuerte en su aplicación más simple, el metal base debe tener sus superficies limpias de cualquier tipo de óxido o agente contaminante, para posteriormente recubrirlo con un fundente. Luego el área a unir es calentada hasta que la atmósfera inerte (fundente) se derrite y elimina la mayor parte de impurezas que pueden estar presentes en el metal base, a más de esto, el fundente en estado líquido protege las superficies que se van a unir de una posible oxidación adicional que podría presentarse. Después, el material de aporte se derrite sobre las superficies del metal base a unirse, y ya que la atracción capilar entre el metal base y el fundente es menor que entre los metales base y de aporte, este último desplaza al fundente, de modo que después del proceso de enfriamiento hasta la temperatura ambiente, en la periferia de la unión se encontrará el fundente en estado sólido, mientras que la unión estará llena de material de aporte de igual manera en estado sólido. Las piezas o elementos que se van a soldar con este proceso normalmente se preparan con separaciones de 0.025 a 0.25mm; por este motivo la fluidez del metal de aporte es un factor importante. Con todo lo mencionado anteriormente se puede notar que la capilaridad tiene el papel más

importante en este proceso, de modo que si no se tiene la separación adecuada entre placas y si no se coloca el fundente apropiado, el flujo capilar no será el deseado, dando como resultado juntas soldadas defectuosas. [18]

La soldadura fuerte resulta un proceso económico para la producción de uniones metalúrgicas de alta resistencia mecánica en las que se conservan las propiedades deseables del metal base. [18]

1.6.8. Procesos de soldadura fuerte

Los métodos de calentamiento y los equipos utilizados, son los encargados de designar los procesos de soldadura fuerte, estos procesos se muestran a continuación:

- Soldadura fuerte con soplete.
- Soldadura fuerte en horno.
- Soldadura fuerte por inducción.
- Soldadura fuerte por resistencia.
- Soldadura fuerte por inmersión.
- Soldadura fuerte al infrarrojo. [18]

En el presente trabajo de investigación se la realiza el estudio específicamente para la soldadura fuerte en horno.

1.6.9. Soldadura fuerte en horno

La soldadura fuerte en horno es un proceso semiautomático por medio del cual los elementos metálicos (material base) se unen calentándolos y utilizando un material de aporte o relleno con un punto de fusión más bajo que él. Existe una relación entre la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima de soldadura, la atmósfera, los materiales seleccionados y el tiempo de proceso y cada una de las condiciones de este proceso debe ser controlado con precisión para obtener una unión soldada fiable. Para reducir la oxidación del metal se necesita tener una atmósfera inerte. Una característica muy importante que deben tener los hornos utilizados para soldadura fuerte es la de mantener la temperatura con una variación máxima de $\pm 60^{\circ}\text{C}$ ($\pm 140^{\circ}\text{F}$). [18]

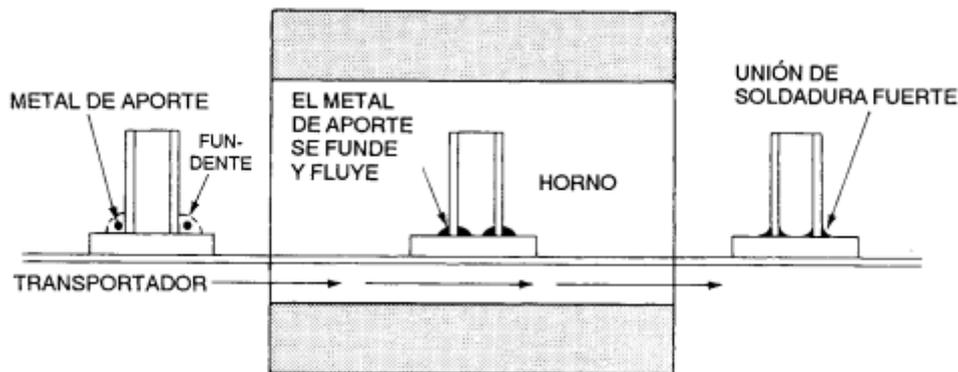


Figura 1.6. Proceso de soldadura fuerte en horno.

(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prenotase-Hall Hispanoamericano; México; 1996; p.p. 384)

1.6.9.1. Descripción del proceso

Las piezas a ser unidas deben estar limpias de cualquier tipo de impureza, luego se coloca el material de aporte sobre estas superficies y después el fundente, para luego posicionarlas dentro del horno. Una vez que el conjunto alcanza la temperatura de soldadura fuerte, el material de aporte cambia su estado de sólido a líquido, y debido a esto y con ayuda de la acción capilar este material se despliega por toda el área que se desea unir hasta llenarla por completo. Lo que no permite que el fundente salga de la junta son las fuerzas moleculares, mismas que lo introdujeron. Las fuerzas capilares son mayores mientras más pequeño es el espacio de separación entre ambas piezas. Si la separación entre las dos piezas es muy grande se puede interrumpir el flujo del fundente. En el horno se producen reacciones químicas entre el gas protector y las piezas a ser soldadas, lo que permite la eliminación de impurezas que pueden generarse en la superficie de las piezas y así evitar el riesgo de que el material de aporte en estado líquido sea obstaculizado. El espesor de los materiales a soldar y las matrices de fijación que se usan para posicionarlos de manera correcta, determinan hasta cierto punto el tiempo de soldadura, este tiempo debe ser el mínimo necesario para que con ayuda de la capilaridad el material de aporte fluya, mojando toda el área de la junta, evitando que el metal base y de aporte tengan una interacción excesiva. En casos en los que es necesario elevar el punto de refusión del material de aporte, un tiempo más largo a la temperatura de soldadura fuerte resultaría beneficioso. [18]

1.6.9.2. Material de aporte

Los materiales de aporte para soldadura fuerte son metales aleados o puros que penetran entre las superficies a unir y son el elemento de unión de las dos piezas. Debido a que cualquier tipo de impureza puede adherirse a estos materiales, es necesario mantenerlos guardados en sus recipientes originales, alejándolos de posibles agentes contaminantes y de la humedad, todo esto se hace para no obtener una junta soldada de mala calidad. Cuando se habla de temperatura de liquidus, se refiere a la mínima temperatura a la que este material está totalmente en estado líquido, mientras que la llamada temperatura de solidus se refiere la máxima temperatura a la cual este material se encuentra totalmente en estado sólido. Al encontrarse en la temperatura utilizada para soldadura fuerte, su capacidad para fluir entre el espaciamiento de los materiales base, debe ser la suficiente, tal que penetre esta holgura y logre distribuirse homogéneamente por toda el área que se desea mojar. [18]

1.6.9.2.1. Mojado y adhesión

Al momento en que el material de aporte se adhiera al metal base, este último no debe diluirse, el metal de relleno (aporte) no debe difundirse de manera indeseable al interior del metal base, ni causar erosión en este, tampoco debe formar compuestos demasiado frágiles. Lo mencionado anteriormente tiene relación directa con la capacidad del material de aporte de unirse (adherirse) al material base, el porcentaje de material de aporte utilizado para formar la unión y el tiempo de duración así como la temperatura al momento de la soldadura fuerte. Para que las características del metal base no sean modificadas, el metal de aporte no debe propagarse de manera excesiva sobre este. Para controlar la expansión hay que escoger un metal de aporte apropiado, no colocarlo en demasiada cantidad, y continuar con el proceso de soldadura fuerte adecuado. Para que la capilaridad mejore es necesario que el metal aporte moje la superficie del metal base. Si las vías capilares entre las piezas metálicas son largas, la solubilidad mutua puede cambiar la composición del material de aporte por aleación, por lo general, esto aumentará la temperatura de liquidus y hará que solidifique antes de mojar y llenar completamente la unión. [18]

1.6.9.2.2. Fusión y fluidez

En general los metales puros fluyen con facilidad y su fundición es a temperatura constante. Al realizar la composición de dos metales, según la cantidad de estos que se hayan utilizado, las características de la combinación van a variar. En la figura 1.5, se muestra el diagrama de fases plata-cobre, donde la temperatura de inicio de unión o fusión de las aleaciones está indicada por la línea de solidus, por otro lado, las temperaturas a las que las aleaciones se convierten por completo en líquidas, está indicada por la línea de liquidus. Se puede notar que en el punto C la línea de liquidus se une con la de solidus, esto quiere decir que a esa temperatura específica la aleación se va a fundir. Mientras más grande sea la separación entre las temperaturas de solidus y liquidus, habrá mayor dificultad para que la aleación fluya dentro de una unión capilar. La solución sólida de cobre en plata es la región α , y la región sólida de plata es la región β . Una mezcla de las dos soluciones α y β es el constituyente de la solución sólida central. Sobre la línea de cambio de fase líquida, se encuentra una distribución homogénea de átomos de cobre y plata en una solución líquida. [18]

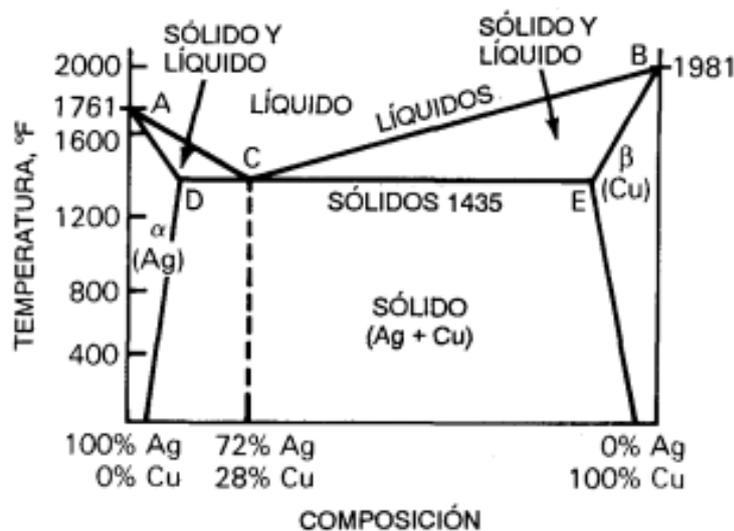


Figura 1.7. Diagrama constitucional plata-cobre.

(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentice-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 391.)

1.6.9.2.3. Licuación

Luego de que el material base alcance la temperatura de soldadura fuerte, los materiales de aporte que tienen un intervalo de fusión grande, deben posicionarse en la unión o calentarse de manera rápida, este procedimiento se lo realiza con el fin de disminuir la separación también conocida como licuación. Cuando un material de aporte es

propenso a la licuación, solo se introducen en juntas que están muy separadas, producen filetes grandes en las extremidades de las juntas y su manera de fluir es lenta. [18]

1.6.9.2.4. Selección del material de aporte

Gran parte de los metales de aporte son aleaciones, cuya fundición se produce a través de un rango de temperaturas, a diferencia de las eutécticas que lo hacen a una temperatura específica. En teoría, para que el material de aporte tenga una fusión completa, se debe mantenerlo a la temperatura de liquidus, sin embargo, las variables de producción no garantizan la fusión completa del material en la junta, por lo que se aumenta la temperatura entre 10°C y 40°C, para asegurar la fusión completa del metal de aporte. [19]

Para escoger correctamente el material de aporte para soldadura fuerte se debe tener en cuenta factores como: afinidad con el metal base y el diseño de la junta; su composición química debe cumplir con diferentes requisitos como: temperatura de servicio, vida útil, esfuerzos de carga, condiciones corrosivas, estabilidad de radiaciones y operación en vacío; generalmente se busca que la temperatura de la soldadura fuerte sea baja para poder dosificar la energía calorífica, bajar los efectos térmicos en el material base, disminuir la interrelación entre material de aporte con el material base, minimizar la interacción metal base-metal de aporte; y finalmente, al tener distintos materiales de aporte con rango de fusión menores a 28°C en la fase solidus y liquidus, se utilizará cualquiera de los métodos de calentamiento, donde se puede colocar previamente el material de aporte en la zona de la unión, entre los materiales para el proceso de soldadura fuerte. [19]

Con el fin de facilitar la selección del material de aporte, ANSI/AWS 5.8; Especificación para metales de aporte de soldadura fuerte, se encuentran 7 categorías y cada una de ellas tiene diferentes clasificaciones. Cabe recalcar que la mayoría de los materiales de aporte que se indican tienen disponibilidad comercial. En el ANEXO I, se puede observar una tabla con las diferentes combinaciones material base-material de aporte. [19]

1.6.9.3. Fundentes para soldadura fuerte

Los fundentes utilizados en soldadura fuerte son una combinación de compuestos químicos que pueden incluir sales orgánicas y ácidos débiles seleccionados por su capacidad de dar limpieza química o protección de las superficies adyacentes y el metal

de aporte durante la soldadura fuerte. Se usan fundentes para impedir cualquier clase de reacción mientras se lleva a cabo el proceso de soldadura fuerte, además, ciertas clases de fundentes permiten disminuir la presencia de óxidos que ya se encuentran en la unión, pero se debe tener en cuenta que el uso de fundente no garantiza que las piezas a soldar estén limpias por completo, por lo tanto, también se las debe limpiar antes del proceso de soldadura.

Los fundentes se diseñan solamente para eliminar las películas de óxido producidas durante la soldadura, cualquier otro contaminante como grasa, polvo, se lo debe eliminar con anterioridad. [20]

Para la soldadura fuerte, en muchos de los casos, es necesario utilizar un fundente adecuado que forme una capa atmosférica protectora para evitar cualquier reacción que no corresponda con la soldadura durante todo su proceso y evitar óxidos en los materiales. Los fundentes que se utilizan para cada uno de los procesos de soldadura fuerte están clasificados según el metal de aporte y de acuerdo a los rangos de temperatura que se emplean, como se muestra en el ANEXO II.

En esta clasificación de acuerdo con la AWS se puede observar que existen diferentes formas en las cuales se encuentran los fundentes (polvo, líquido y pasta).

Cada uno de los casos viene determinado para distintos procesos de soldadura fuerte, que fueron clasificados anteriormente, para este trabajo de investigación se escogió el FB3-J el cual contiene boratos complejos y compuestos de fluoruro más boro en polvo, el cual está diseñado para procesos de soldadura fuerte en horno, inducción y antorcha para aceros, níquel y aleaciones y carburos usando metales de aporte de alta temperatura, comercialmente se lo conoce como bórax. [18]

1.6.9.4. Bórax

Es uno de los fundentes que más se utiliza para este tipo de procesos de soldadura el cual tiene dos modos de uso, ya sea en polvo o en forma de pasta con la ayuda de un poco de agua, pero en cualquiera de los casos este siempre debe ir con una limpieza de la superficie antes de aplicarlo para que la soldadura sea muy efectiva, consistente, con alto grado de resistencia y que sea duradera. Es muy utilizado para la prevención de oxidación en las superficies de los materiales, además se lo usa como solvente y agente de limpieza [42].

Tabla 1.2. Características químicas del bórax

Fórmula química	Na ₂ B ₄ O ₇
Coloración	Incoloro, blanco
Propiedades	Soluble en agua
Punto de fusión	60°C
Densidad	1,71 g/cm ³

(Fuente: <https://spainproject.ru/es/otvety-na-voprosy/bura-tehnicheskaya-chto-takoe-bura/>)

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detallan los diferentes materiales utilizados para el proceso de soldadura, método de caracterización empleado para el material base, método de caracterización de las propiedades mecánicas en las uniones soldadas, procedimiento para el proceso de soldadura, variables que influyen en el proceso de soldadura.

En la Figura 2.1, se indica todo el proceso metodológico que se desarrolló para el presente estudio.

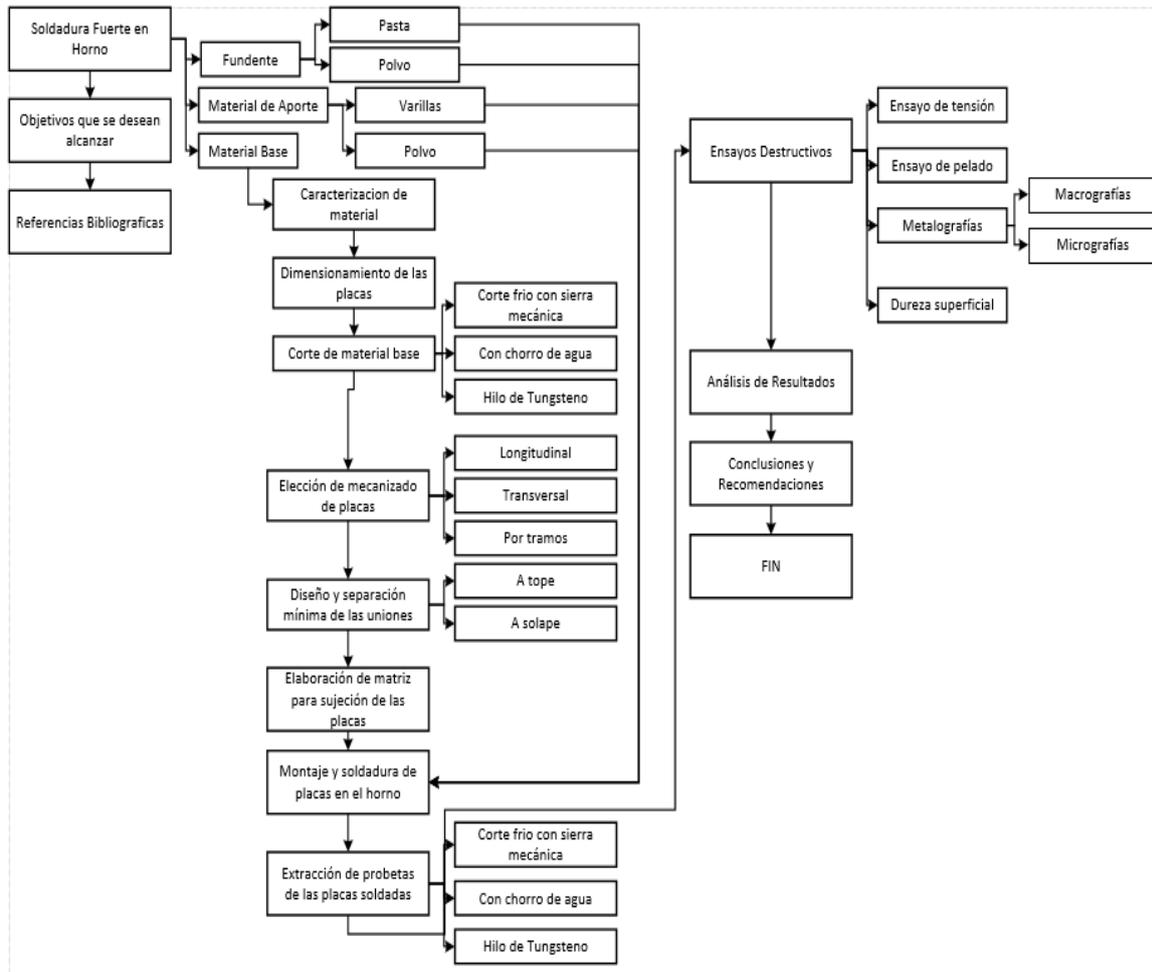


Figura 2.1. Diagrama de flujo que indica todo el proceso realizado necesario para el proceso de soldadura fuerte y el respectivo análisis realizado con los resultados obtenidos.

(Fuente: Propia.)

2.1. Caracterización del material base

Para realizar el análisis de la soldadura fuerte en horno, se tomó en cuenta los materiales existentes dentro del país de los cuales se escogió al acero ASTM A572 grado 50 como principal elemento por su composición (contenido de carbono), propiedades mecánicas, su uso y disponibilidad en el mercado. El acero estructural que

se adquirió cuenta con un espesor de 15mm. El corte se realizó con una máquina de corte por chorro de agua.

2.2. Análisis por espectrometría de chispa

Este método estándar se utiliza para el análisis directo de muestras metálicas, y se basa en la obtención de chispas entre dos electrodos produciendo un plasma de vapor en el cátodo (temperatura mayor a 10000°K). Con esta técnica se puede determinar rápida y simultáneamente muchos elementos químicos en aleaciones, incluyendo elementos ligeros como C, S, B y P. Además, las emisiones por arco son condiciones no controladas y por ende este es un análisis cualitativo [43]. El análisis químico del material base realizado en el Laboratorio de Fundición de la EPN, se basa en el Método de prueba estándar para el análisis de aceros al carbono y de baja aleación mediante espectrometría por emisión atómica de chispa de la ASTM E415-17.

El espesor de la muestra puede variar significativamente de acuerdo con el diseño de soporte del espectrómetro, pero lo más práctico para este proceso son espesores entre 10 mm y 38 mm.

Las dimensiones de la muestra utilizada fueron de 20x20mm y con un espesor de 15mm, la cual ingresó al laboratorio con el código de identificación Sample M1, y se tomaron 3 mediciones de un mismo punto. El equipo utilizado para el análisis por espectrometría por chispa fue el BRUKER modelo Q2 ION.

2.3. Obtención de las muestras

Para conseguir las muestras necesarias para realizar el proceso de soldadura y obtener las probetas para los ensayos posteriores, y realizar los análisis respectivos, se procedió de la siguiente manera:

- Conseguir el material base (Acero ASTM A572 450x350x15mm)

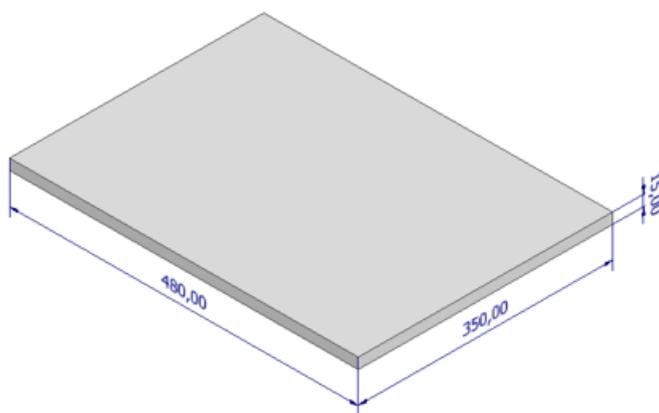


Figura 2.2. Plancha de material base

(Fuente: Propia)

- Trazar líneas de referencia sobre el material base para realizar los cortes respectivos para obtener las muestras necesarias para el proceso de soldadura.

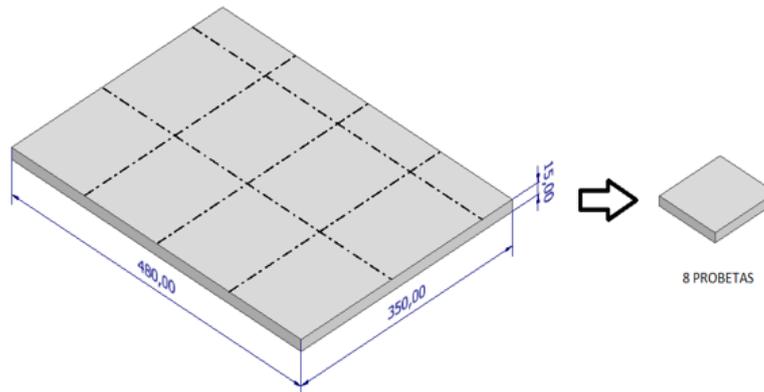


Figura 2.3. Esquema de corte y obtención de muestras

(Fuente: Propia)

- Montaje de la placa de acero en la mesa de trabajo con la ayuda de las mordazas de sujeción y apoyo con unos soportes debajo del material para lograr un correcto nivel para que el corte sea limpio.



Figura 2.4. Montaje de la plancha de acero ASTM A572

(Fuente: Propia)

- Corte del material con la máquina cortadora del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla en frío mediante chorro de agua.



Figura 2.5. Corte de la plancha de acero ASTM A572

(Fuente: Propia)

- Obtención de las muestras necesarias para el proceso de soldadura en horno (indirecta).



Figura 2.6. Muestras de acero ASTM A572 para el proceso de soldadura.

(Fuente: Propia)

2.4. Mecanizado por arranque de viruta del acero ASTM A572

El mecanizado es un proceso de fabricación, en el cual a la materia prima se le da una forma y acabado por medio de la eliminación de material con la ayuda de una herramienta de trabajo. Existen dos procesos de arranque de viruta:

- Desbaste: donde no se requiere de mucha precisión y existe mucho desprendimiento de material.
- Acabado: donde necesariamente existe precisión y la eliminación de material es mucho más baja.

La mayoría de los procesos de soldadura indirecta en horno utiliza diseños de uniones sin un proceso de mecanizado previo, con este proceso por arranque de viruta se busca

analizar qué garantías puede ofrecer a la soldadura y cuáles podrían ser sus desventajas con respecto a este mismo proceso de soldadura sin un mecanizado previo. Con lo anteriormente dicho se buscó diferentes alternativas de mecanizados los cuales se indican a continuación:

- Mecanizado longitudinal

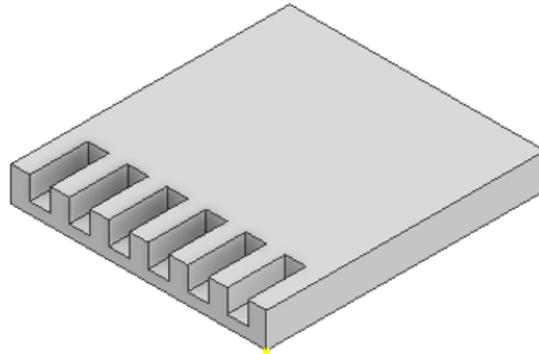


Figura 2.7. Mecanizado longitudinal de la muestra

(Fuente: Propia)

- Mecanizado transversal

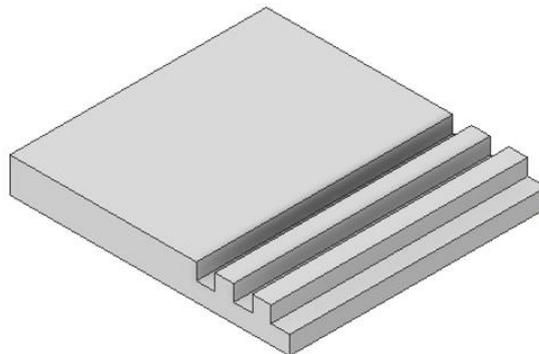


Figura 2.8. Mecanizado transversal de la muestra

(Fuente: Propia)

- Mecanizado en tramos

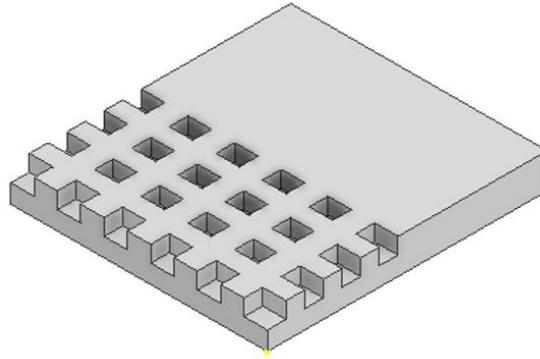


Figura 2.9. Mecanizado en tramos de la muestra

(Fuente: Propia)

Al analizar las tres opciones, se tomó como referencia la primera opción de mecanizado (mecanizado longitudinal), ya que en este se podría aprovechar de mejor manera la holgura que existe entre las dos piezas para realizar la soldadura y además se aprovecharía el efecto de la capilaridad para obtener un mejor proceso de soldadura.

2.5. Dimensionamiento y preparación de probetas

Para el proceso de soldadura fuerte en horno, la junta a traslape presenta una eficiencia elevada para la unión y además un diseño de fácil preparación y montaje. Para conocer la medida a la cual debe ser el traslape, se usa una regla general, que dice que la longitud de traslape será igual a 3 veces el espesor del material base más delgado. [51] Entonces tenemos la siguiente fórmula:

$$X = 3 * W$$

Donde:

X: longitud de traslape.

W: espesor del metal base.

$$X = 3 * 15\text{mm}$$

$$X = 45\text{mm}$$

Otro factor que influye en el desempeño mecánico de la unión soldada es la separación entre cada muestra. Los efectos que se ocasionen con una correcta separación garantizan una gran fluencia o mojado del material en todo el contorno que se vaya a soldar y que exista capilaridad apropiada. Además influye directamente a la resistencia del metal de aporte de la unión soldada como se muestra en la Figura 2.10.

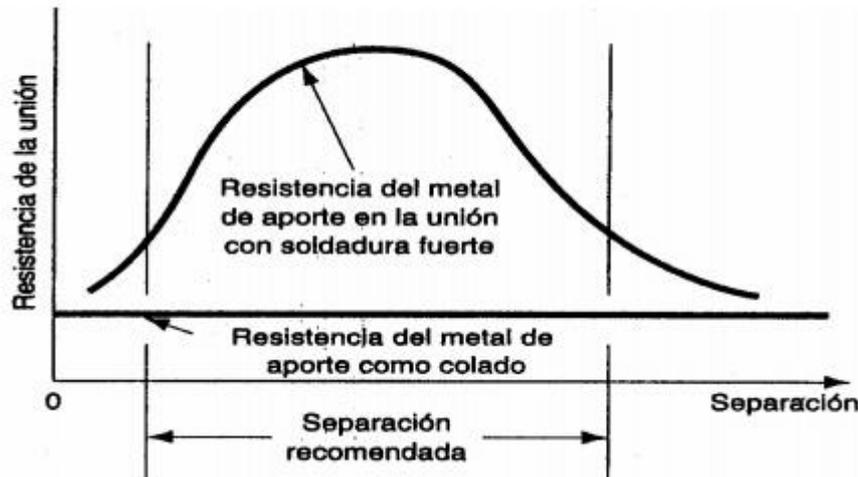


Figura 2.10. Resistencia de la unión vs separación recomendada de la unión.

(Fuente: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-44.pdf>)

Para soldadura fuerte, en el manual de soldadura AWS, se recomiendan las holguras dependiendo del metal de aporte que se va a utilizar. Entonces la separación recomendada de la unión para el presente trabajo, a la temperatura de soldadura fuerte se indica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Separación recomendada de la unión

Separación recomendada entre placas			
Clasificación del metal de aporte AWS	Separación recomendada		Separación de la unión
	pulg.	mm	
Grupo BCu	0.000-0.002	0,00-0,05	Fundente fase gaseosa
Grupo BCuZn	0,002-0,005	0,05-0,12	Fundente mineral

(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996)

La AWS recomienda este tipo de separación entre placas para este proceso de soldadura, en la cual se genera una gran capilaridad y eso conlleva a que la unión soldada tenga mayor eficiencia.

Como se puede observar en la Figura 2.11, las placas necesitan una matriz de sujeción para poder obtener una adecuada separación y estabilidad. Se utilizará dos placas con pernos de sujeción las cuales van a ayudar a mantener la distancia entre placas que se recomienda para realizar este proceso de soldadura, además se podrá depositar el material de aporte con facilidad. A continuación, se indica gráficamente como quedarían las planchas de acero cortadas y acopladas en conjunto con los accesorios de sujeción.

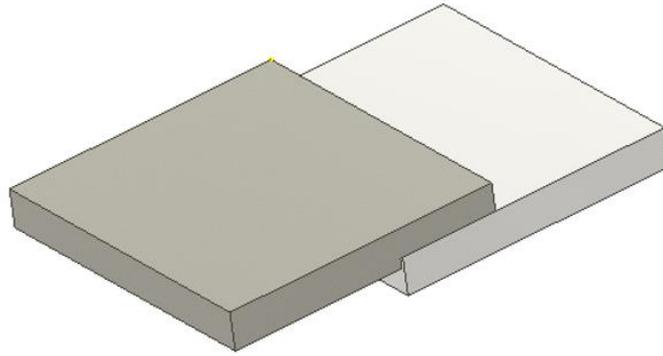


Figura 2.11. Montaje de las muestras para la soldadura

(Fuente: Propia)

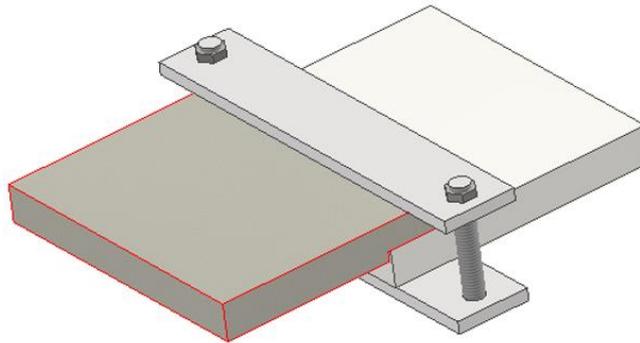


Figura 2.12. Accesorios acoplados a las muestras para ajuste

(Fuente: Propia)

2.6. Soldadura en el horno (mufla)

El proceso de soldadura fuerte se lo designa de acuerdo con el método o las fuentes de calentamiento. Este proceso de soldadura fuerte se lo realiza en un horno que cuenta con sistemas automáticos para elevar los ciclos de temperatura. Dichos ciclos están dados tanto en rangos como en escalones, cada uno dependiendo del tipo de trabajo, aumentos de temperatura y tiempos de permanencia en dichos rangos para generar la soldadura.

Para realizar el proceso de soldadura en el horno se procede con los siguientes pasos:

- Limpieza de las placas a soldar.
- Selección de material de aporte y fundente.
- Montaje de placas a soldar y colocación de material de aporte y fundente.
- Preparación del horno (mufla).
- Ingreso de placas en el horno y mantención.
- Extracción de placas soldadas.
- Enfriamiento de placas soldadas.

2.6.1. Limpieza de placas a soldar

Antes de realizar la soldadura fuerte en horno es necesario inspeccionar que las placas se encuentren en un estado óptimo para realizar su proceso, y que no existan inconvenientes durante o después de la soldadura en el horno, para lo cual es de gran importancia la limpieza superficial del material base ya que en muchos de los casos no se conoce la procedencia o en qué estado se encontraban almacenados los materiales, y esto podría ocasionar las fallas en la soldadura.

La existencia de impurezas, aceites o cualquier otra suciedad al momento de unir los materiales, provocaría que no se dé una acción capilar correcta, para lo cual se tiene en consideración dos tipos de limpiezas para el material base:

2.6.1.1. Limpieza mecánica

Este método de limpieza utiliza diferentes herramientas manuales o eléctricas con las cuales se remueve cualquier tipo de incrustaciones, impurezas o defectos que se puedan observar en el material base, para dar una fluencia homogénea del material de aporte. Se utilizan diferentes tipos de herramientas para realizar estos procesos de limpieza, tales como cepillos con alambre de acero inoxidable, lijas, discos abrasivos.

2.6.2. Selección de material de aporte y fundente

Al seleccionar el material base para el proceso de soldadura, se toma en cuenta con qué tipo de materiales este puede interactuar o es semejante para realizar el proceso de soldadura. La norma ANSI/AWS A5.8 (Especificaciones para metales de aporte de soldadura fuerte), indica diferentes categorías de los metales de aporte que se pueden relacionar con los materiales bases y seleccionarlos para diferentes tipos de aplicaciones.

En el Anexo I se pueden observar las combinaciones entre material base y material de aporte, se seleccionó el RBCuZn como material de aporte para el proceso de soldadura con el Acero ASTM A572 como material base. Las varillas de RbCuZn-C contienen Cu (56-60%), Sn (0,8-1,1%) y el resto Zn. Además, la temperatura de fusión de las varillas esta entre los 940°C.

La capilaridad cumple un papel muy importante en el proceso de soldadura, y para ayudar a que esta cumpla su propósito, se utilizó una sustancia llamada fundente o flux, misma que genera una capa atmosférica protectora para evitar óxidos en los materiales y facilitar que el material de aporte fluya entre las placas generando una soldadura más eficiente [45].

Existe una gran variedad de fundentes en función de los materiales a unir, condiciones ambientales y temperatura que necesite alcanzar.

El fundente escogido de acuerdo con la clasificación AWS es el FB3-J (Bórax), que contiene boratos complejos y compuestos de fluoruro más boro en polvo, diseñado para procesos de soldadura fuerte en horno, inducción y antorcha. Dentro del mercado el Bórax es uno de los más comunes y utilizados para distintos procesos de soldadura y que se lo puede manejar para este proceso de soldadura fuerte en horno.

2.6.3. Montaje de placas, colocación de material de aporte y fundente

El montaje de todos los elementos que se van a utilizar para desarrollar el proceso de soldadura fuerte en horno va a estar dado de la siguiente manera:

Sobre la placa con pernos (parte inferior de la matriz de sujeción), como se muestra en la Figura 2.13, se coloca la placa hembra y se añade un retazo de material de aporte en cada canal mecanizado (la medida del retazo de material de aporte es igual a la longitud del canal). Después se coloca la placa macho a traslape sobre la placa hembra como se observa en la Figura 2.14, y con la separación determinada, se garantiza que tenga una holgura, en la cual, el material de aporte va a fluir por la capilaridad como indica la Figura 2.15.

Con la ayuda de la placa superior (parte superior de la matriz de sujeción), resortes, arandelas y pernos, se fija todo el montaje de las placas a traslape que van a ingresar al horno.

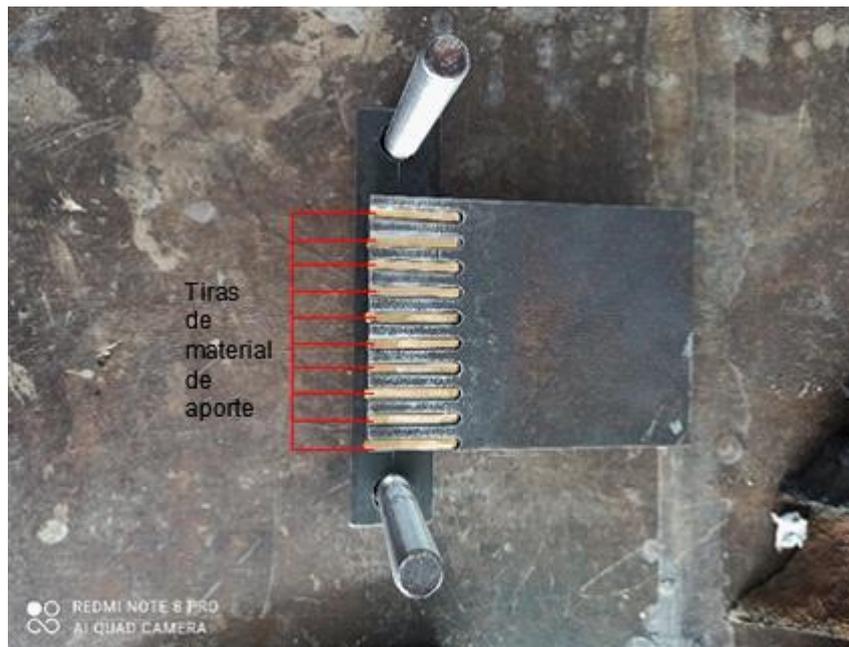


Figura 2.13. Conjunto que muestra la parte inferior de la matriz de sujeción con sus pernos, placa de material base y material de aporte

(Fuente: Propia)

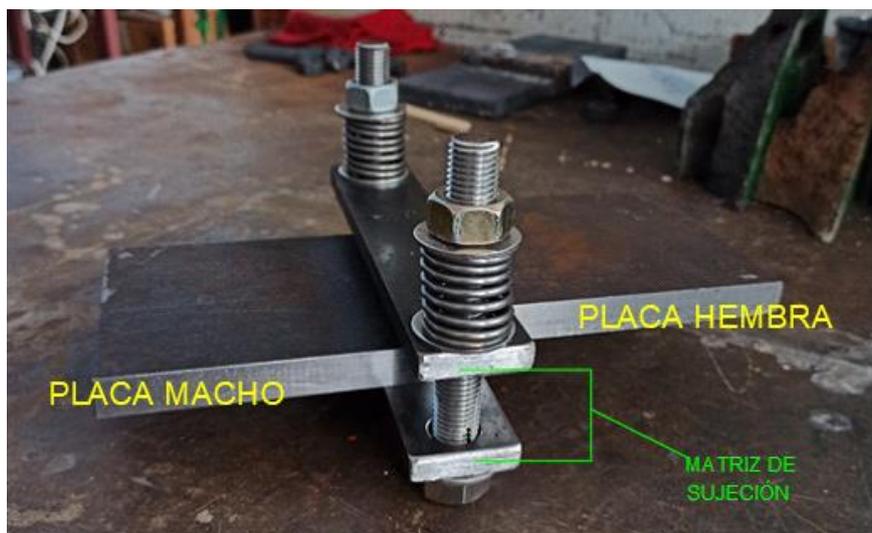


Figura 2.14. Conjunto de placas montadas, matriz y pernos

(Fuente: Propia)



Figura 2.15. Conjunto de placas montadas, matriz, pernos y resortes

(Fuente: Propia)

Con las placas totalmente montadas, con la holgura adecuada y fijo el conjunto, se coloca más material de aporte donde las dos placas se juntan. La inclinación de las placas genera que el material de aporte no se quede estancado en una posición y este pueda fluir por toda la superficie del material base, para que se genere la unión entre los materiales como se indica en la Figura 2.16.



Figura 2.16. Fundente y material de aporte colocado en el posicionamiento para la soldadura

(Fuente: Propia)

Se aplica fundente en polvo en todo el contorno donde se encuentra ubicado el material de aporte que se mencionó en el párrafo anterior, hasta que no se lo pueda observar,

este va a generar una protección eficiente para el proceso de soldadura. Se debe verificar que no quede ninguna de estas zonas sin fundente, debido que al esparcirse muchas de las veces se “riega” a los costados o puede introducirse por los canales que se realizaron por el maquinado.

2.6.4. Preparación del horno(mufla)

Las muflas con las que cuenta el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla utilizan resistencias eléctricas que alcanzan un rango de temperatura de 1000°C, en su interior tienen una cobertura de fibra de cerámica de coloración blanca con la cual se da el aislamiento del calor y con ello evita que se dé disipación de calor al exterior.

La mufla cuenta con un sistema de control automatizado para el encendido, puesta en marcha, finalización del proceso de calentamiento y control de temperatura por medio de una termocupla tipo K.



Figura 2.17. Mufla eléctrica del laboratorio de metalografía desgaste y falla

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.2, se indica las características con las que cuenta el horno mufla del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla:

Tabla 2.2. Características físicas de la Mufla.

Modelo	Lindberg 51828
Fabricado	1981
Temperatura de Operación	110°C
Voltaje	220-240 VAC

Potencia Máxima	5600W
Frecuencia	50/60Hz
Altura	31,5 cm
Profundidad	45,0 cm
Ancho	31,5 cm
Volumen	44651,2 cm ³

(Fuente: Propia).

La mufla cuenta con dos modos de calentamiento, como son: rampa y escalonamiento. Los dos procesos parten desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de trabajo, determinados por una pendiente, pero el escalonamiento es un subproceso del calentamiento en forma de rampa, es decir, llega a una temperatura, se mantiene por un tiempo y continúa hasta llegar a la temperatura de trabajo.

En la Figura 2.18, se muestra la diferencia entre estos dos tipos de calentamientos con los que cuenta el horno:

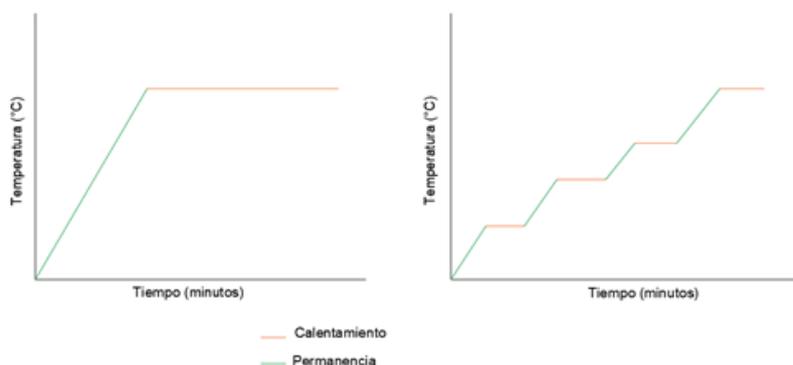


Figura 2.18. Diagrama de escalas de temperaturas con las cuales trabaja la mufla

(Fuente: Propia)

Para que se genere la soldadura, se necesita alcanzar la temperatura en la cual el material de aporte pase de fase sólida a fase líquida y se pueda producir la fusión con el material base.

Se introduce el conjunto a soldar cuando se observa que se alcanza la temperatura de apertura. Sobre los ladrillos refractarios que fueron colocados con anterioridad, como se observa en la Figura 2.19, se coloca el conjunto, garantizando su inclinación y estabilidad para que el material de aporte no se “derrame” por los costados. Al abrir la compuerta se producirá un descenso de temperatura o temperatura de caída en un tiempo determinado, este proceso se debe hacer de manera rápida, para que no se pierda mucho calor, después de introducir el conjunto se cierra la compuerta y se debe esperar a que llegue a la temperatura de trabajo y se mantenga por un tiempo muy corto

para que se produzca la fusión de los materiales generando la soldadura entre los mismos.



Figura 2.19. Posicionamiento con el cual se ingresará cada una de las placas a soldar

(Fuente: Propia)

Cuando pasa el tiempo de mantención en la temperatura de trabajo, se abre la compuerta, se observa que se haya generado la soldadura como se muestra en la Figura 2.20, y se retira el conjunto con los respectivos implementos de seguridad. Este tipo de material no necesita tener un control en su enfriamiento, entonces el enfriamiento será lento al aire colocando el conjunto en una superficie plana y libre.



Figura 2.20. Placas después del proceso de soldadura, para el posterior enfriamiento al aire

(Fuente: Propia)

Se observa que el material se encuentra totalmente frío y se realiza una limpieza superficial para quitar impurezas, escorias, residuos del fundente que se pudieron haber generado cuando se dio la fusión de los materiales. El uso de un cepillo de alambres es una de las mejores opciones de limpieza superficial previo o posterior a cada proceso de soldadura eliminando salpicaduras u otros contaminantes que se generen.



Figura 2.21. Enfriamiento al aire de las placas soldadas

(Fuente: Propia)

Los siguientes parámetros fueron tomados en cuenta durante el proceso de soldadura:

Tabla 2.3. Características físicas de la Mufla.

Variab les	Placa 0	Placa 1	Placa 2
Metal base	Acero ASTM A572 G50	Acero ASTM A572 G50	Acero ASTM A572 G50
Metal de Aporte	RBCuZN-C	RBCuZN-C	RBCuZN-C
Fundente	Bórax	Bórax	Bórax
Holgura (mm)	0.12	0.12	0.12
T _{inicial} (°C)	28	28	28
T _{final} (°C)	940	940	940
T _{apertura} (°C)	765	540	600
T _{caída} (°C)	680	485	545
t _{pc} (min)	8	6	6
t _{tcaída} (min)	45	33	37
t _{tfinal} (min)	90	93	93
t _{perm} (min)	5	5	5

t_{pc}: duración mientras cae la temperatura al ingresar las placas.

t_{tcaída}: tiempo total hasta el cual se abrió la compuerta para ingresar las placas a soldar.

t_{tfinal}: duración de tiempo hasta llegar a la temperatura en la cual el material de aporte de funde.

t_{perm}: tiempo de permanencia después de llegar a la temperatura final y hasta sacar las placas soldadas.

NOTA: se tomó en cuenta una placa como sujeto de prueba para el proceso de soldadura con la cual se procedió a realizar un estimado de tiempo de permanencia, tiempo final, tiempo de caída y observar los cambios o suceso que se generan al introducirlo y mantenerlos por dicho tiempo para poder obtener soldaduras con una gran adherencia y fusión respectiva de cada una de las siguientes placas que fueron introducidas.

(Fuente: Propia)

2.7. Corte de probetas normalizadas por chorro de agua

Para poder realizar un análisis a las probetas soldadas con los distintos ensayos, estas necesitan de un determinado diseño. Las propiedades de los materiales soldados no deben tener cambios microestructurales, para lo cual el método de corte mecánico por chorro de agua es muy utilizado en materiales en los cuales su geometría no es homogénea. Este tipo de corte es automático donde el operador necesita tener un plano, posicionar las muestras, verificar la programación y recoger las probetas cortadas.



Figura 2.22. Extracción de probetas que fueron cortadas por chorro de agua

(Fuente: Propia)

Para realizar los diferentes análisis a las placas soldadas se tomó como referencia la siguiente división en tres zonas para el corte como se indica en la Figura 2.23.

Espécimen		de Pelado
Espécimen		de Tracción
Espécimen		Metalográfico

Figura 2.23. Junta soldada para la calificación del procedimiento

(Fuente: Guamangallo, J., Villaroel, E. (2012))

2.8. Ensayos destructivos

Este tipo de ensayos se utilizan para verificar que las propiedades de los materiales cumplan con las especificaciones de diseño. Los ensayos destructivos para realizar el análisis de soldadura se basan con respecto a la Sección IX del Código de Calderas y Recipiente Sujetos a Presión de la ASME para saber si las muestras cumplen con los requisitos mínimos.

2.8.1. Ensayo de durezas.

Para realizar este ensayo, se tomaron las mediciones a cinco probetas en los puntos que se muestran en la figura 2.24.

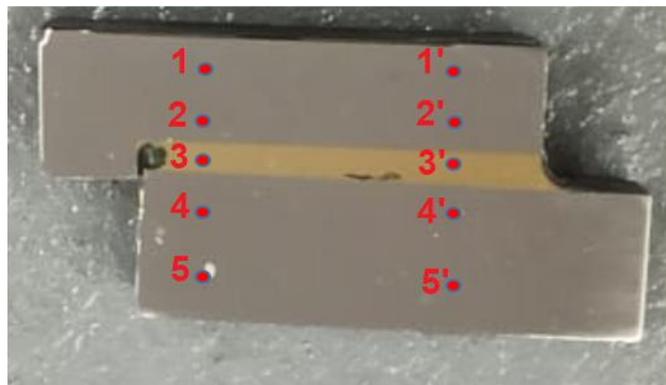


Figura 2.24. Probeta que muestra las zonas donde se tomaron las mediciones de durezas (puntos rojos)

(Fuente: Propia)

También se tomaron mediciones de durezas al material base y material de aporte antes del proceso de soldadura, la numeración en color rojo que se muestra en la figura 2.25, indica los puntos donde se tomaron estas mediciones.



Figura 2.25. De izquierda a derecha, material base, material de aporte. Antes del proceso de soldadura

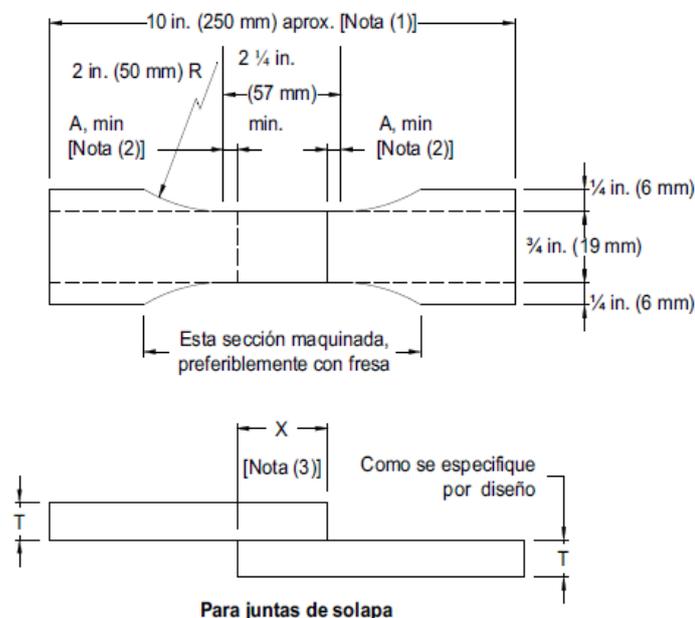
(Fuente: Propia)

2.8.2. Ensayo de tensión

El ensayo de tensión es utilizado para medir la resistencia de un material al aplicar una fuerza externa. En este ensayo se observa cómo se va a alargar la probeta de ensayo por la fuerza de tensión que se le aplica gradualmente hasta que se genere una fractura, con el fin de conocer propiedades mecánicas del material [46].

Para realizar el análisis a cada probeta se toma en cuenta la Sección IX de la ASME (QB-462- Especímenes de Prueba) bajo el punto QB-150 prueba de tensión para determinar la resistencia última de las juntas solapadas.

A continuación, se indica el plano de la probeta de ensayos según el punto QB-462 de la Sección IX de la ASME:



Notas:

- (1) La longitud puede variar para adaptarse a la máquina de pruebas.
- (2) A=mayor de 1/4 in. (6mm) o 2T.
- (3) X=traslape del espécimen de prueba.

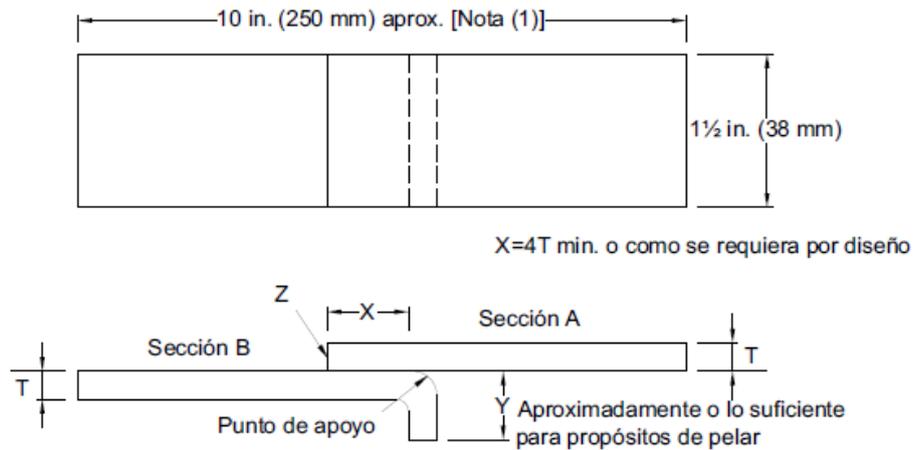
Figura 2.26. Especificación de las dimensiones de la probeta para ensayos de tensión.

(Fuente: Normas ASME Sección IX (QB-462))

2.8.3. Ensayo de pelado

Este ensayo ayuda a determinar la resistencia de la unión entre las láminas al someterle a esfuerzos de pelados. Se sujeta en los extremos de las placas soldadas unas mordazas de una máquina multiensayos sometiendo a esfuerzos de tracción a una velocidad constante [47].

Las dimensiones y la preparación de las muestras para el ensayo de pelado están dados según la sección IX de la ASME (QB-462.3) como se indica en la Figura 2.27:



NOTAS GENERALES:

- (a) El reborde Y se puede omitir de la Sección B cuando la "peladura" se puede lograr en una máquina de tensión conveniente.
- (b) el espécimen se soldará en fuerte por el lado marcado con Z.

NOTA:

- (1) La longitud puede variar para adaptarse a la máquina de pruebas.

Figura 2.27. Especificación de las dimensiones de la probeta para ensayos de pelado.

(Fuente: Normas ASME Sección IX (QB-462.3).)

2.9. Metalografía

Con la metalografía se analiza si se obtuvo una soldadura adecuada, con la micrografía se busca observar los cambios microestructurales del material base como también del material de aporte y en la parte de la macrografía las variaciones con el tamaño de grano, impurezas, inclusiones, variación de la composición química de los materiales, falta de penetración del material soldado, difusión de material, entre otros.

Para poder realizar cada uno de estos ensayos se debe proceder de la siguiente manera:

Se realiza la inspección visual a cada una de las probetas que se extrajeron de las placas. Se observa si existe algún defecto, como pueden ser, rechupe, falta de penetración o inclusión que se haya formado en la zona de la soldadura.

Se lleva las probetas a la zona de desbaste grueso, donde se realizará un desbastado de las caras hasta que se encuentren paralelas, se eliminan las zonas irregulares por medio de un equipo de desbaste grueso como se indica en la Figura 2.28.



Figura 2.28. Máquina de desbaste grueso Buehler.

(Fuente: Propia)

La zona representativa analizada es la cual está en contacto el material base con el material de aporte. Para tener dicha zona apta para la visualización con el microscopio electrónico, es necesario que las probetas continúen con un proceso de desbastado fino.

En el desbastado fino se utilizan distintos tipos de papeles de lijas abrasivas (Figura 2.29). Se frota la probeta en una misma dirección, aplicando una ligera presión de esta sobre la lija para eliminar líneas de rayadura en su superficie, luego se debe rotar la probeta 90° para cambiar al siguiente papel de lija abrasiva y se continua con el mismo proceso hasta que la muestra haya pasado por las 4 lijas. Cada uno de los papeles de lijas abrasivas se colocan en moldes como se muestra en la Figura 2.30, además, estas deben permanecer húmedas durante todo el proceso de pulido.



Figura 2.29. Plancha donde se colocan lijas de papel para desbaste fino.

(Fuente: Propia)



Figura 2.30. Lijas de papel para desbaste fino (240, 320, 400, 500).

(Fuente: Propia)

El pulido final se lo realiza de manera mecánica, se emplea un disco giratorio liso o tambor, al cual se le coloca un paño y se lo humedece por medio del sistema de agua con el que cuenta dicha máquina. Se aplica alúmina en el tambor en todo momento, se coloca la probeta sobre el paño húmedo manteniendo un movimiento giratorio contrario al giro del tambor, aplicando una presión suave para eliminar las llamadas colas de cometa y evitar que se redondeen las mismas, además de quitar todo tipo de manchas o rayas que todavía no se eliminaron con el desbaste fino hasta que se visualice una superficie como espejo.



Figura 2.31. Máquina de pulido de probetas Buehler.

(Fuente: Propia)

Al finalizar el pulido se necesita limpiar la probeta, con la ayuda de un poco de algodón con agua se frota la superficie pulida, luego se enjuaga con alcohol toda la superficie y se secan con ayuda de un secador eléctrico para que las superficies no se oxiden, y se guardan en un recipiente aislado.



Figura 2.32. Probetas pulidas y colocadas en un recipiente.

(Fuente: Propia)

Las probetas son llevadas a la zona de análisis donde por medio del microscopio se toman fotos para poder visualizar cómo se encuentra la fusión entre el material de aporte y el material base, además, observar los cambios en la estructura del grano, evidencia de segregación de carburos y ferrita, inclusiones y distanciamiento real entre el material base y material de aporte producido después de la soldadura. En la Figura 2.33 se muestra el microscopio utilizado para realizar estos ensayos:



Figura 2.33. Microscopio Olympus GX441F.

(Fuente: Propia)

En la parte micrográfica se realiza un ataque químico con el objetivo de poder visualizar las fases presentes de cada una de las muestras. Para estos materiales se utiliza el Nital (10% Ácido Nítrico y 90% Alcohol etílico) de la siguiente manera:

- En un recipiente de vidrio se coloca un porcentaje de Nital y en otro recipiente otro reactivo (colocarse guantes quirúrgicos al momento de utilizar cualquier compuesto químico para evitar accidentes durante todo el ataque químico).



Figura 2.34. Frascos de reactivos utilizados para cada una de las probetas.

(Fuente: Propia)

- Se ataca primero la zona del material base y después la zona del material de aporte

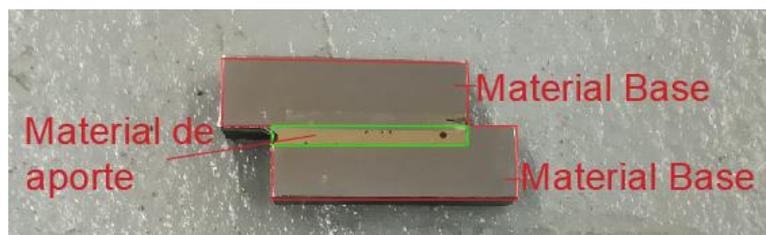


Figura 2.35. Probeta dividida para indicar las zonas de materia base y de aporte.

(Fuente: Propia)

- Se sumerge una parte de un cotonete en el reactivo, se lo saca y se comienza a frotar la primera zona del material base durante un corto tiempo, hasta observar que haya cambiado su coloración, se procede a limpiarlo con agua, se esparce alcohol en toda la zona y se lo seca.
- Después se realiza el mismo proceso con la otra cara del material base con mucho cuidado de manera homogénea.
- Por último, se ataca la zona del material de aporte con el otro reactivo de la misma manera hasta observar que se haya dado un cambio en su coloración y después se realiza la limpieza respectiva de toda la probeta. Si se observa que no se atacó correctamente, se procede a realizar nuevamente los mismos pasos hasta cumplir con el objetivo.



Figura 2.36. Probeta atacada por los reactivos químicos
(Fuente: Propia)

3.2. Resultados del ensayo de tracción

Este ensayo se lo realizó a dos probetas como lo indica el código ASME Sección IX (parte QB soldadura fuerte 451.1) y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción.

Probeta	Metal Base		Material de aporte	Carga máxima registrada		Observaciones
	Norma	Denominación comercial		lbf	N	
1T	ASTM A572	A572	RBCuZn-C	15325	68168	Falla en la junta soldada
2T	ASTM A572	A572	RBCuZn-C	15251	67840	Falla en la junta soldada

(Fuente: Propia.)

La falla se dio por corte en la zona donde se encuentra la soldadura, esto quiere decir que solo soporta cargas cortantes. Entonces, para obtener el esfuerzo de tracción (esfuerzo cortante) se divide la carga máxima soportada para el área de mojado.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (\text{EC. 3.1.})$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante (MPa).

F: Fuerza (N).

A: Área de mojado (mm^2)

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 3.2. Esfuerzos de tracción de las probetas ensayadas.

Probeta	Metal Base		Material de aporte	Carga (N)	Área (mm^2)	Esfuerzo de tracción (MPa)
	Norma	Denominación comercial				
1T	ASTM A572	A572	RBCuZn-C	68168	1215	56,11

2T	ASTM A572	A572	RBCuZn- C	67840	1100	61,67
----	--------------	------	--------------	-------	------	-------

(Fuente: Propia.)

En la Figura 3.2, se observan las dos probetas antes de ser sometidas al ensayo de tracción, mismas que se encuentran en distintas posiciones para que la parte soldada se pueda ver de mejor manera. Mediante inspección visual, se nota que la muestra 2T no posee una penetración total de material de aporte, como se puede observar de forma más clara en la vista lateral derecha, en la parte que está marcada con rojo.



Figura 3.2. Probetas sometidas al ensayo de tracción en diferentes vistas. a) Vista superior, b) Vista lateral izquierda, c) Vista lateral derecha.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.3 se encuentran las probetas 1T y 2T luego de ser sometidas al ensayo de tracción, se observa que la falla fue por desgarre del material de aporte en la parte soldada de la junta, también se nota en la probeta 1T que el material de aporte cubre casi todas las zonas en donde se lo colocó, llenando los canales mecanizados y

proporcionando un mojado uniforme, pero en la probeta 2T existe la falta de material de aporte, en ese lugar se puede ver que el mojado no es muy uniforme y hay espacios opacos, sin embargo, gran cantidad del material de aporte que falta en una parte de la junta quedó adherido a la otra parte de la junta. La zona de color opaco que se mencionó está marcada con rojo.



Figura 3.3. Probetas ensayadas a tracción

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.3 están los resultados del ensayo de tracción que se obtuvieron en el trabajo previo a este, en el cual se utilizó probetas sin mecanizado antes del proceso de soldadura. Se puede observar una diferencia muy notoria en los resultados de esfuerzo de tracción.

Tabla 3.3. Esfuerzos de tracción de las probetas ensayadas (Trabajo previo)

Probeta	Metal Base		Material de aporte	Carga (N)	Área (mm^2)	Esfuerzo de tracción (MPa)
	Norma	Denominación comercial				
A36-B	ASTM A36	A36	RBCuZn-C	129888,07	774,19	167,77
A36-P	ASTM A36	A36	RBCuZn-C	14234,31	1032,26	13,78

(Fuente: Guamangallo, J., Villaroel, E. (2012))

En la Figura 3.4 se muestran las probetas luego de ser ensayadas a tracción del trabajo previo a este, se puede observar que en el espécimen A36-B no tiene un área de mojado uniforme contrario al área de mojado que se presenta en el espécimen A36-P.

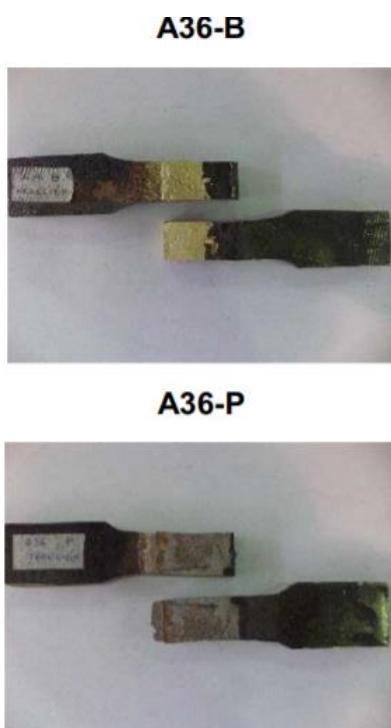


Figura 3.4. Probetas ensayadas a tracción (acero A36)

(Fuente: Guamangallo, J., Villaroel, E. (2012))

3.3. Resultados del ensayo de pelado.

Se prepararon dos probetas como lo indica el código ASME Sección IX (QB 451.2) y los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 3.4. El área de traslape se obtiene con la ayuda de un calibrador pie de rey.

Tabla 3.4. Resultados del ensayo de pelado.

Probeta	Metal Base		Material de aporte	Área de traslape (mm ²)
	Norma	Denominación comercial		
1P	ASTM A572	A572	RBCuZn- C	1710,96
2P	ASTM A572	A572	RBCuZn- C	1754,98

(Fuente: Propia.)

En la Tabla 3.5 se muestran las diferentes áreas medidas para así obtener el porcentaje de área de mojado de las probetas, y como se puede notar en la figura 3.5 el espécimen 1P sufrió la fractura del material base antes que la soldadura falle, por lo tanto, se realizó inspección visual de las partes fracturadas de esta probeta y en los lugares que son visibles (Figura 3.7.) es muy notorio que el material de aporte cubre todos los espacios del mecanizado y toda esa área se encuentra mojada de este material, además, también se tomó como referencia la probeta 1T usada para el ensayo de tracción cuyo mojado es homogéneo, ya que ambas salieron de la misma placa por lo tanto el mojado del material de aporte es el mismo. Con todo lo mencionado y para conocer el área total de defectos se restó un 5% del área soldada debido a posibles poros, inclusiones, etc., obteniendo así un porcentaje de área de mojado casi perfecto.

Tabla 3.5. Áreas de las probetas ensayadas.

Probeta	Metal Base		Material de aporte	Área de traslape (mm ²)	Área soldada (mm ²)	Área total de defectos (mm ²)	Área de mojado (%)
	Norma	Denominación comercial					
1P	ASTM A572	A572	RBCuZn-C	1710,96	1691,33	78,89	95
2P	ASTM A572	A572	RBCuZn-C	1754,98	1616,68	912,08	43,58

(Fuente: Propia)

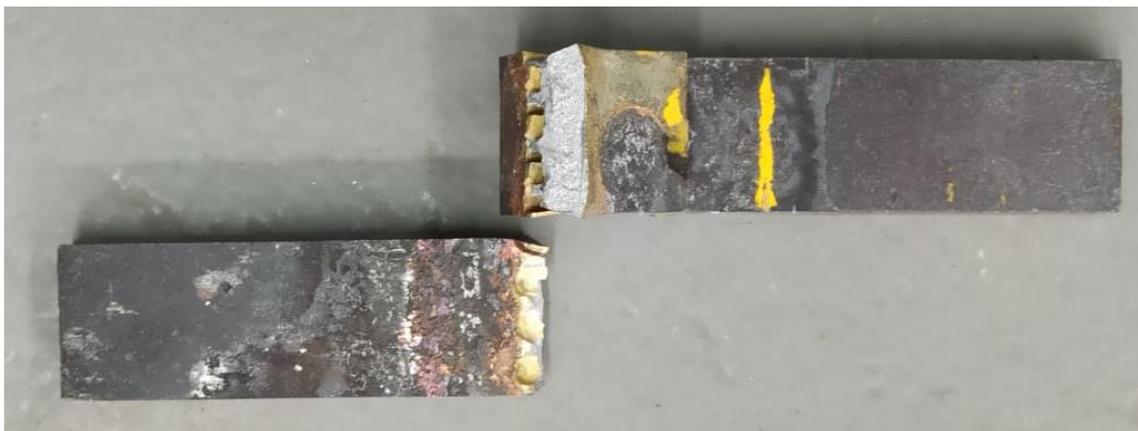


Figura 3.5. Probeta 1P del ensayo de pelado

(Fuente: Propia)



Figura 3.6. Vista frontal de la zona fracturada de la probeta 1P del ensayo de pelado

(Fuente: Propia)

Mientras que en la probeta 2P que se encuentra en las Figuras 3.7 y 3.8, se observa que hay muchas zonas de color opaco y varios defectos en la soldadura, esta muestra se la sacó de la misma placa donde se obtuvo la probeta 2T para tracción que también presentó el mismo problema de falta de material de aporte.



Figura 3.7. Probeta 2P del ensayo de pelado

Fuente: Propia



Figura 3.8. Probeta 2P del ensayo de pelado (separada)

Fuente: Propia

En la Tabla 3.6, se encuentran los resultados que se obtuvieron en el trabajo previo a este, además en la Figura 3.9 se observa que las probetas ensayadas en dicho trabajo tienen un área de mojado incompleto siendo más notorio en la probeta A36-P.

Tabla 3.6. Áreas de las probetas ensayadas (acero A36).

Probeta	Metal Base		Material de aporte	Área de traslape (mm ²)	Área soldada (mm ²)	Área total de defectos (mm ²)	Área de mojado (%)
	Norma	Denominación comercial					
A36-B	ASTM A36	A36	RBCuZn-C	2128,9	1300,2	828,7	61,1
A36-P	ASTM A36	A36	RBCuZn-C	2379,5	1199,4	1180,1	50,4

(Fuente: Guamangallo, J., Villaroel, E. (2012))

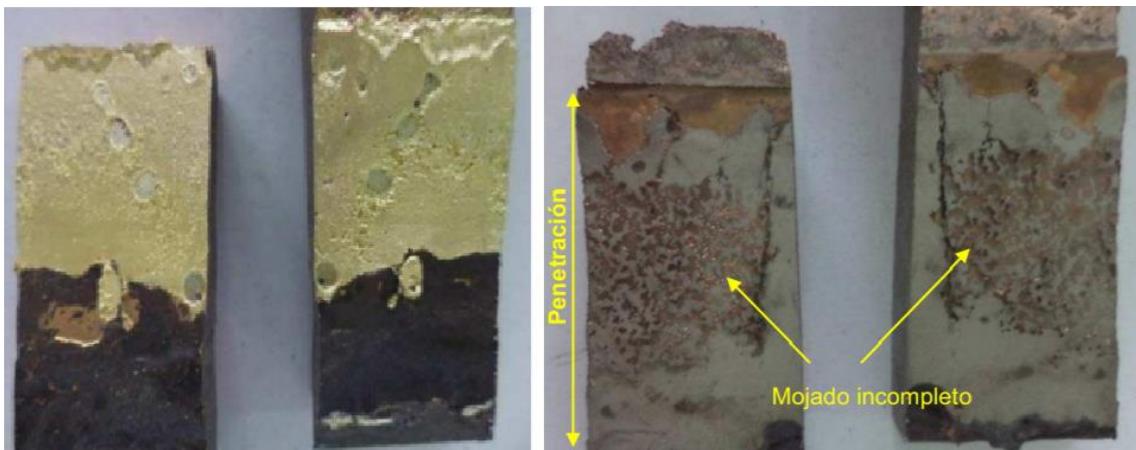


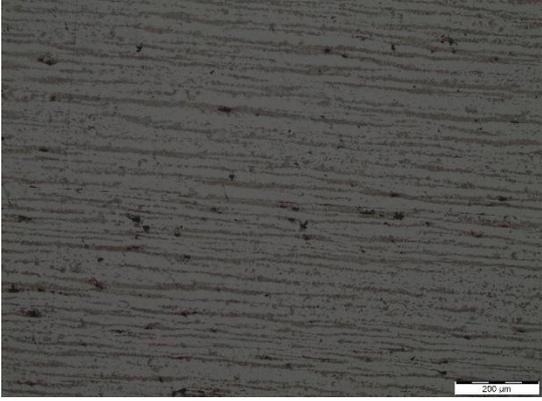
Figura 3.9. Probetas del ensayo de pelado. De izquierda de derecha A36-B, A36-P

(Fuente: Guamangallo, J., Villaroel, E. 2012)

3.4. Resultados de las metalografías de las probetas soldadas

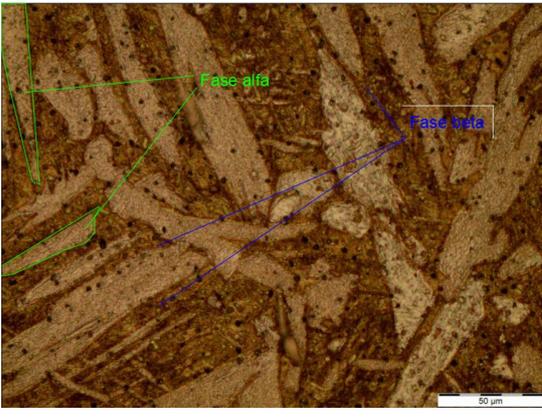
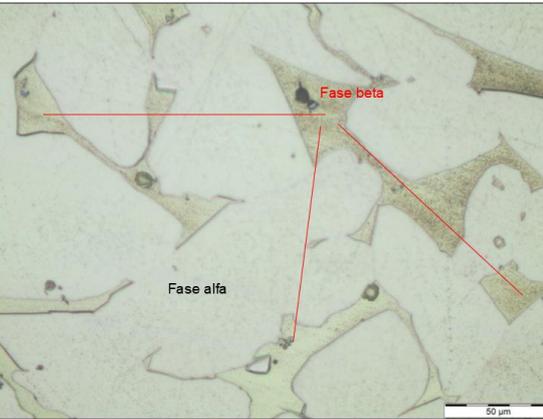
A continuación, se muestran las imágenes metalográficas obtenidas de las probetas para identificar las zonas donde se dio el proceso de soldadura, fusión completa del material, zonas que podrían no haber llegado a tener una fusión completa y distanciamiento total de la soldadura.

Tabla 3.7. Resultados de la micrografía del material base (a) 100X, (b) 50X.

 <p style="text-align: center;">(a)</p>	 <p style="text-align: center;">(b)</p>
<p>Se observa la zona del material base con estructuras de granos alineados, en donde se encuentra una estructura perlítica en la matriz ferrítica. La orientación que se observa en la parte (a) se debe a que en el proceso de fabricación del material, este fue laminado en caliente.</p>	

(Fuente: Propia)

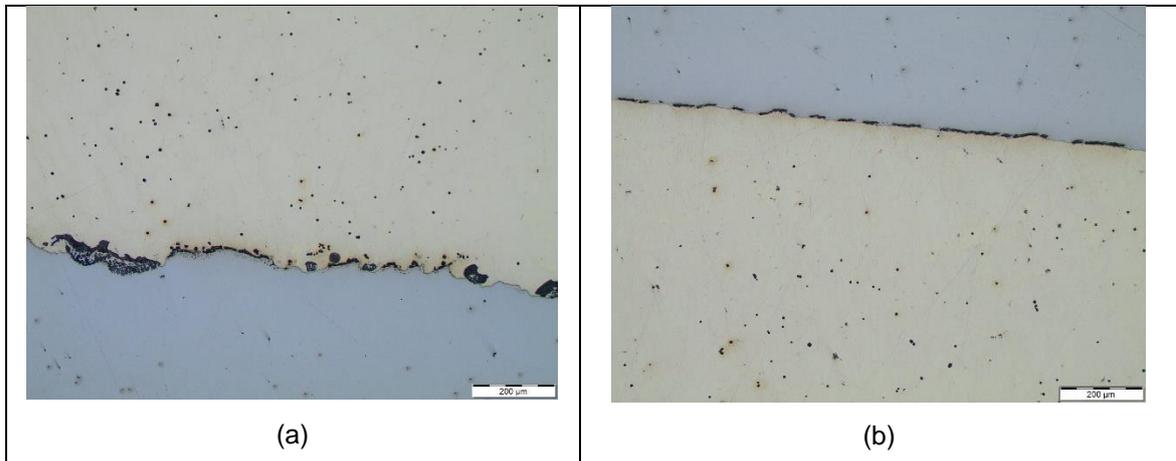
Tabla 3.8. Resultados de la micrografía del material de aporte (a) Micrografía 50X (antes del proceso de soldadura) (b) Micrografía 50X (después del proceso de soldadura).

 <p style="text-align: center;">(a)</p>	 <p style="text-align: center;">(b)</p>
<p>Se observa la metalografía del material de aporte (RBCuZn-C) cuya estructura tiene forma dendrítica y en el cual están presentes la fase beta dentro de un matriz de fase alfa.</p>	<p>Se observa el material de aporte (RBCuZn-C) después del proceso de soldadura en el cual se da un mayor crecimiento en el tamaño de la forma dendrítica en la fase alfa.</p>

(Fuente Propia)

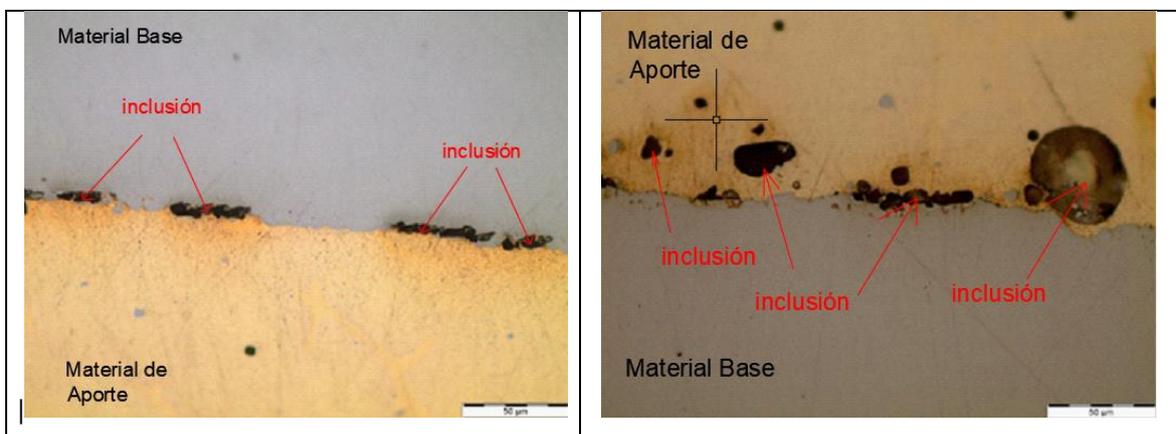
En la Tabla 3.9. se observa unión homogénea entre el material de aporte y las dos caras del material base antes de ser atacado, además se puede observar unas pequeñas inclusiones que se han generado en el material de aporte.

Tabla 3.9. Resultados de la macrografía de la zona de fusión del material de aporte con la cara (a) inferior del material base 100X (b) superior del material base 100X.



(Fuente: Propia)

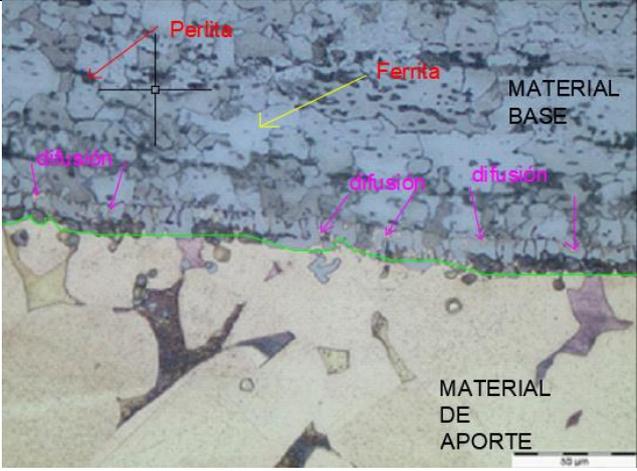
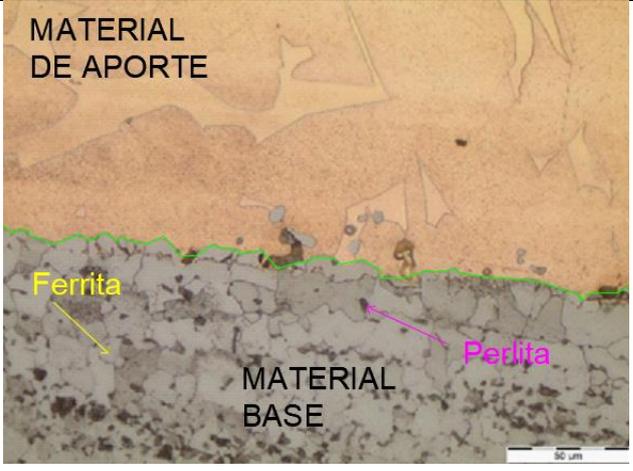
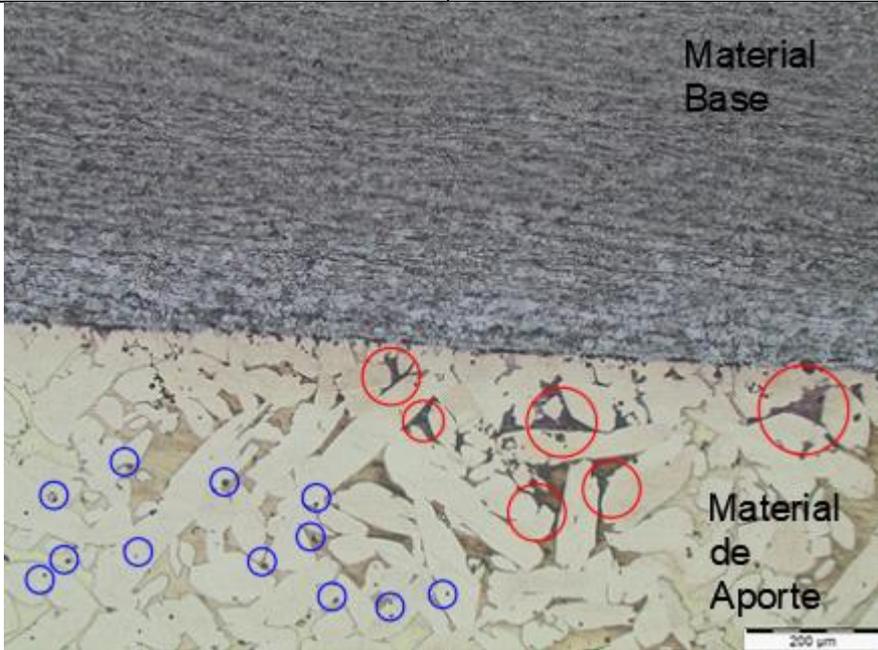
Tabla 3.10. Resultados de la macrografía de la zona de la unión del material de aporte con la cara (a) inferior del material base 50X (b) superior del material base 50X.



Se observan las inclusiones generadas en el borde de cada una de las caras de la probeta del material base y unas pequeñas zonas de difusión del material de aporte.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Resultados de las micrografías de la soldadura de las caras del material base con el material de aporte 50X (a) cara superior 50X (b) cara inferior 50X (c) cara superior 100X.

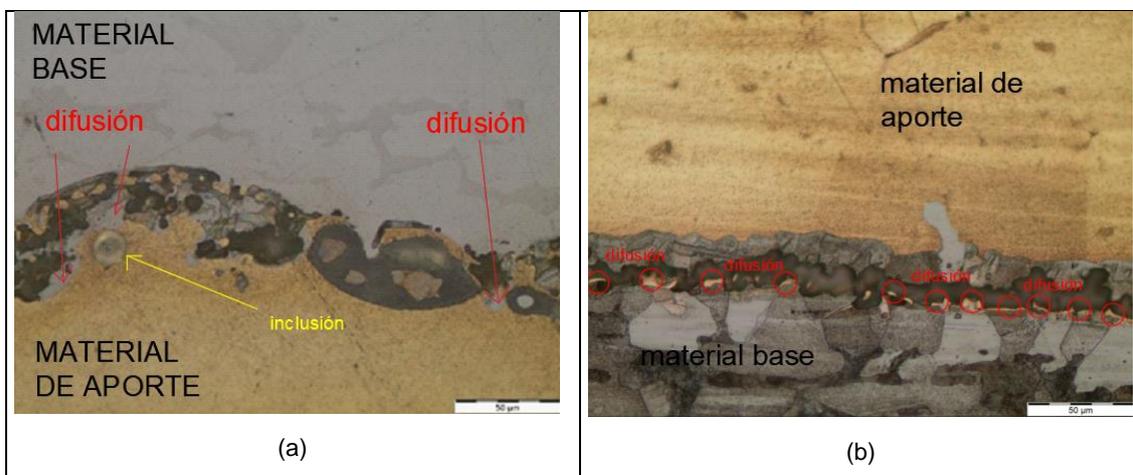
 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>
<p>Se observa la transición entre el material de aporte y el material base después de que la probeta fue atacada. Además, se puede visualizar los granos de ferrita y perlita (zona oscura)</p>	<p>En la zona del material base se observa que se generó un crecimiento equiaxial del tamaño de grano.</p>
 <p>(c)</p>	

Se observa una forma de la alineación que tienen los granos del material base. También se observa una pequeña zona donde se da difusión del material de aporte. Las zonas marcadas con azul se identificarían como pequeñas inclusiones o porosidades.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.12, se observa la metalografía de la zona de holgura entre el material de aporte con el material base, se encuentran pequeñas zonas de difusión del material de aporte y una pequeña inclusión.

Tabla 3.12. Resultados de la micrografía de la separación entre placas soldadas (a) cara superior 50X (b) cara inferior 100X.

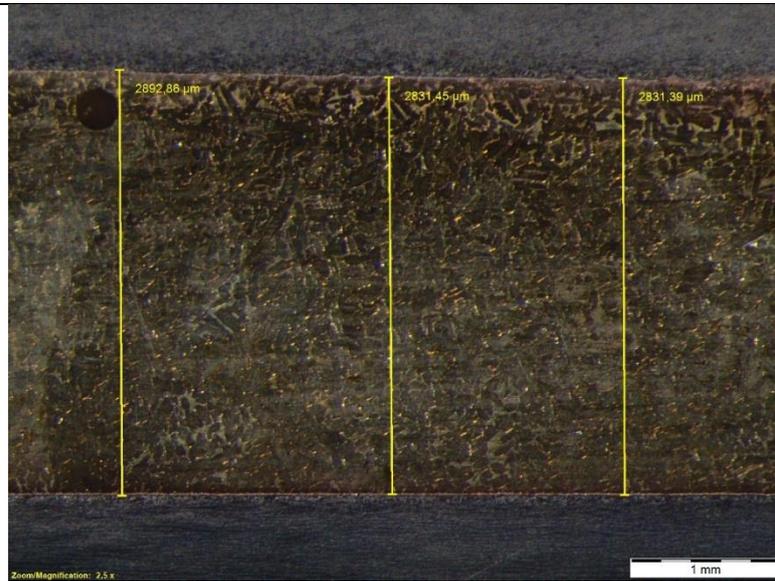


Fuente: (Propia)

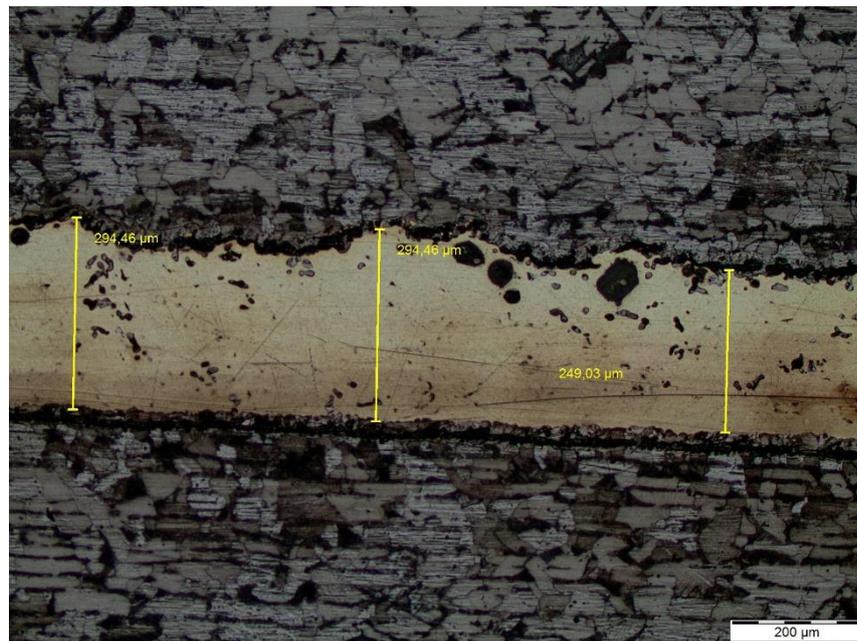
En la Tabla 3.13. (a) se observa la metalografía de la muestra tomada la unión soldada 1, se tomó esta muestra con el fin de hacer notar el espesor del mecanizado realizado, más la holgura para que se produzca la soldadura, se observa un espaciamiento homogéneo a lo largo de donde se produjo la unión de los materiales. También se puede notar una zona en la cual se ha generado una pequeña inclusión.

La metalografía que se encuentra en la Tabla 3.13. (b) corresponde a la unión soldada 1, de donde se obtuvieron las probetas 1T y 1P y la metalografía del literal (c) corresponde a la unión soldada 2, de donde se obtuvieron las probetas 2T y 2P, en estas, se puede observar únicamente las holguras obtenidas luego del proceso de soldadura y se visualiza que toda su extensión no es homogénea, presentan mayores puntos de inclusiones y pequeñas zonas de difusión de material, además no se presentan bordes definidos como en el caso de las metalografías obtenidas en los resultados de la Tabla 3.11.

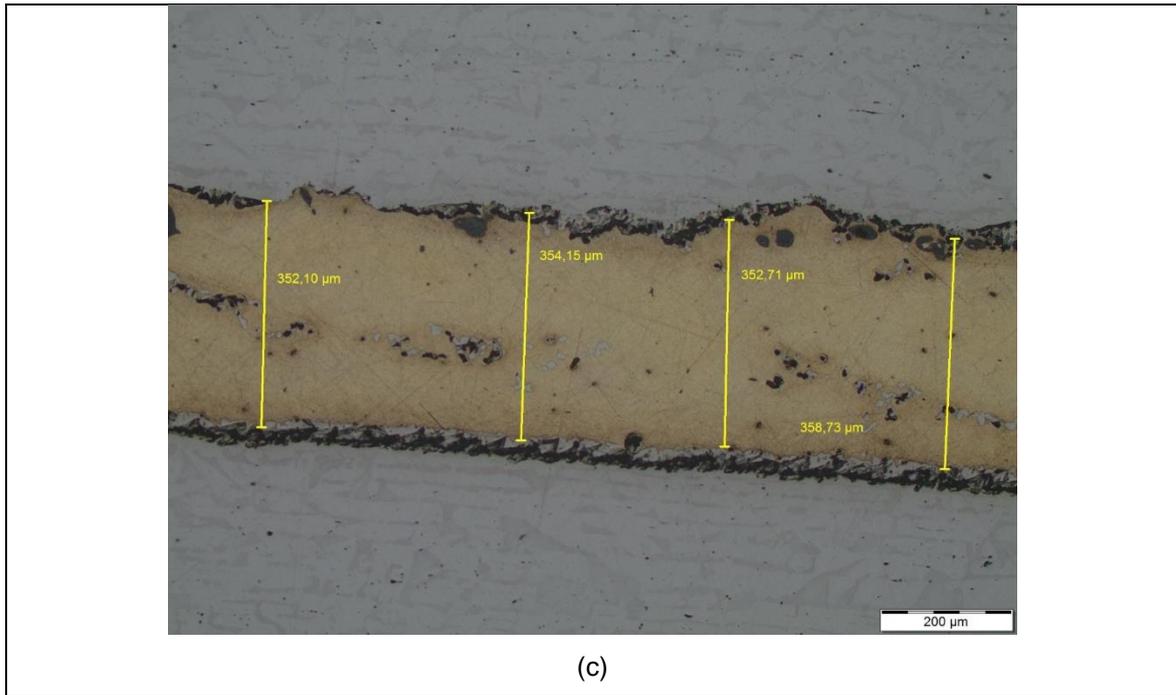
Tabla 3.13. Resultados de la micrografía de la distancia de separación (a) máxima (b) entre placas (unión soldada 1), 100X, (c) entre placas (unión soldada 2), 100X.



(a)



(b)



(Fuente: Propia)

3.5. Resultados del análisis químico

Los resultados obtenidos de la caracterización al Acero ASTM A572 por espectrometría se observan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Resultados del ensayo por espectrometría

Elemento	Valor (%)
Carbono	0,139
Silicio	0,130
Manganeso	1,307
Fosforo	0,021
Cromo	0,296
Níquel	0,022
Aluminio	0,019
Cobalto	0,0068
Niobio	0,015
Hierro	98,03
Total	99,99

(Fuente: Propia)

3.6. Discusión de resultados de los ensayos realizados.

A partir de la composición química se determina que el metal base usado para este trabajo corresponde a un acero ASTM A572, ya que los porcentajes de los elementos que lo componen están dentro de los rangos que requiere la norma ASTM A572 y A6. Como resultado de someter las placas a temperaturas elevadas para realizar el proceso de soldadura fuerte en horno, se puede observar en los resultados de la Tabla 3.8 de las micrografías, la distorsión de la fase alfa de la estructura de forma dendrítica, mostrando un mayor crecimiento, este efecto conlleva a una disminución de sus propiedades mecánicas, obteniendo resultados no deseados en los ensayos de tracción y dureza de las muestras ensayadas, mientras que en las Tablas 3.10, 3.11 (c) y 3.13, se observan la presencia de pequeños puntos que se presumen son inclusiones generadas, debido a que el fundente no ayudó a generar una capa protectora apropiada en la zona de mecanizado donde se encontraba el material de aporte, estas inclusiones afectan a los resultados de ensayos de pelado.

Como se puede observar en la Figura 3.1, las durezas de las muestras disminuyen, siendo más notable en el material de aporte, y como se ve en el ANEXO VI, la dureza tiene una relación directa con la resistencia a la tracción, a más de esto, en la metalografía de la Tabla 3.13 (b) y (c), se observa que la holgura es mayor que la recomendada en un 59% para la unión soldada 1 y 66% para la unión soldada 2, y la holgura es inversamente proporcional con la resistencia del metal de aporte en la unión soldada (ver Figura 2.10), entonces, debido a estos aspectos los resultados de esfuerzo de tracción obtenidos (Tabla 3.2.) fueron afectados negativamente, ya que para ser aceptados por el código ASME Sección IX (QB-153.1), estos no deben ser menores que el esfuerzo de tracción del metal base en condición de recocido (ver anexo VI y VIII), pero los resultados muestran que son un 82% menor al metal base recocido, por lo tanto, las muestras no son aceptadas.

Mientras que para el ensayo de pelado se puede observar en las figuras 3.5 y 3.6 que la muestra 1P presenta un área de mojado casi completa (95%), sin embargo, la muestra 2P presenta un porcentaje de área de defectos de 56% y según el criterio del código ASME Sección IX (QB-172) el área de defectos de las muestras no debe superar el 25% del área total de cualquier superficie individual que empata, por lo tanto, esta probeta no cumple con la norma. El mayor problema en la muestra 2P se debe a la mala sujeción de las matrices y debido a esto, las placas se separaron lo suficiente como para provocar que el material de aporte se “derrame” por los lados de la placa, y esto provocó que la zona de traslape no sea mojada por completo de material de aporte.

Para realizar la comparación entre este trabajo (placas mecanizadas) y un trabajo previo (placas sin mecanizar), se tomaron los mejores resultados de ambos en los ensayos de tracción y pelado. El resultado de esfuerzo de tracción del trabajo previo es un 63% mayor que el esfuerzo a tracción de este trabajo. Para el ensayo de pelado, el área de mojado del trabajo previo es un 34% menor que el área de mojado de este trabajo, sin embargo, las probetas de ambos no cumplen con la norma y cabe mencionar que los dos trabajos tuvieron problemas con el “derrame” de material de aporte en una de sus probetas.

Al tener placas mecanizadas, aumentan las áreas de contacto en la zona de traslape y se supondría que con esto, los resultados de ensayo de tracción y pelado serían mejores que en una placa sin mecanizar, sin embargo, no todo depende de este factor, ya que se requiere de otros factores de suma importancia que deben estar siempre controlados durante el proceso de soldadura fuerte, como son: el ajuste de las placas (para controlar la holgura y capilaridad), el ángulo de inclinación al cual se van a colocar las placas dentro del horno y el tiempo de permanencia a la temperatura de soldadura fuerte. A simple vista el ajuste de las placas fue bueno ya que la holgura parecía tener la dimensión que se esperaba después de la soldadura en horno, pero luego de observar las metalografías, esta distancia fue mucho mayor que la recomendada, esto es debido que al tener que utilizar mayor cantidad de material de aporte que en placas sin mecanizar, este material al pasar de estado sólido a líquido, provocó un desplazamiento de las placas de metal base, por lo tanto, se necesita de otro tipo de mecanismo de ajuste que garantice que el conjunto a soldar se va a mantener completamente fijo, otro aspecto que afectó a los resultados, fue que las placas se encontraban dentro del horno a un ángulo que permitió que el material de aporte fluya sin tener un control adecuado y finalmente el tiempo dentro del horno fue el correcto, pero al no tener los otros dos factores siempre controlados, se obtuvo una holgura demasiado grande, y con el ángulo de posicionamiento de las placas incorrecto, provocó que en unos casos no se mojaran todas las áreas de contacto y exista pérdida excesiva de material de aporte, y como se mencionó en los párrafos anteriores, todo esto tiene relación con los ensayos de tracción y pelado, afectando negativamente a los resultados finales.

4. CONCLUSIONES

- Se cumplieron con los objetivos propuestos, pero debido a los todos los factores explicados en este trabajo, los resultados no fueron los esperados, de manera que las probetas no se aceptan de acuerdo al código ASME Sección IX (soldadura fuerte).
- El uso de matrices de sujeción es primordial para que las placas a soldar no se separen y la holgura sea la correcta.
- La holgura es crítica para determinar el flujo capilar del metal de aporte y con ello la calidad de la unión soldada.
- El mejor resultado obtenido en el ensayo a tracción de las placas sin mecanizar es un 63% mayor que el mejor resultado del ensayo de tracción de las placas mecanizadas.
- El mejor resultado obtenido del ensayo de pelado de las placas mecanizadas es un 34% mayor que el mejor resultado del ensayo de pelado de las placas sin mecanizar del trabajo previo.
- Si la holgura es demasiado grande, el material de aporte no alcanzaría a mojar toda la superficie del metal base.
- Si la holgura es demasiado pequeña, el metal de aporte no podría entrar con facilidad, dando como resultado una soldadura con defectos.
- La dureza del material de aporte disminuye significativamente después del proceso de soldadura fuerte, debido a que luego de ser sometido a altas temperaturas la fase alfa de la estructura dendrítica crece.
- Las metalografías permiten observar que la separación entre las placas son mucho mayores de lo recomendado.
- El ángulo de posicionamiento de las placas dentro del horno y su mala sujeción provocó que el metal de aporte se “derrame”
- El fundente utilizado no protegió de manera adecuada al metal de aporte, esto se puede visualizar en los resultados de las metalografías en los cuales se identifican pequeñas inclusiones debido a que no se formó una gran capa de protección durante el proceso de soldadura.

5. RECOMENDACIONES

- Para que las placas a soldar no se separen cuando se las posicionen en el horno de mufla, es recomendable colocar ladrillos refractarios que actuarán como topes en sus extremos y de esta manera se mantendrán fijas al momento que el material de aporte cambie de estado sólido a líquido.
- Para realizar ensayos de dureza las superficies de las muestras deben estar completamente lisas, caso contrario los resultados van a variar significativamente.
- La limpieza de los materiales que van a ingresar al horno es primordial ya que puede existir algún elemento inflamable que una vez sometido a altas temperaturas provoque un incendio dentro del horno de mufla.
- Muchas probetas de acero que son soldadas en mufla ocupan altas temperaturas, mayores a 500°C por lo cual es necesario que los operadores o personas que estén usando estos hornos utilicen equipos de protección en todo el cuerpo para que les ocurra lesiones o quemaduras al momento de ingresar las probetas al horno.
- Utilizar materiales similares que soporten altas temperaturas para que sean usados como mordazas o elementos de sujeción que ayuden a mantener la posición u holgura entre las placas para el proceso de soldadura en el horno.
- Verificar que la puerta del horno este bien cerrada durante todo el proceso de soldadura fuerte.
- Para colocar las placas dentro del horno, es recomendable hacerlo entre dos personas, una se encarga de abrir y cerrar la puerta del horno y la otra de introducir las placas.
- Se recomienda realizar estudios posteriores, poniendo mayor énfasis en los elementos que van a sujetar a las placas que se soldarán y de esta manera evitar que la holgura sobrepase los límites establecidos y provoque una pérdida excesiva de material de aporte o caso contrario no alcance a llenar toda la zona de traslape y esto afecte a los resultados de los ensayos, también se podrían realizar otros tipos de mecanizado al material base, y de esta manera poder asegurar si un maquinado previo al proceso de soldadura fuerte en horno resulta eficaz.

Referencias Bibliográficas

- [1] AHMSA, (2013). "Manual de Diseño para la Construcción con Acero". Altos Hornos de Méjico, pp. 1-31.
- [2] Norma Ecuatoriana de la Construcción, Estructuras De Acero, (2015).
- [3] ASM International. (2004) "Metallography and Microstructures Handbook", vol. 9.
- [4] NEC. (2014) "Guía de prácticas para el diseño de estructuras de acero de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015," Estructuras de acero, vol. 1, pp. 52.
- [5] D. C. P. Chicaiza, "Estudio de la velocidad de corrosión de tres aceros comerciales".
- [6] ASTM International. (2003). "ASTM A572/A572M-15 Standard SPecification for High-Strength Low-Allow Columbium-Vanadium Structural," vol. 01. pp. 4-7.
- [7] Amanie, J. (2012) "Effect of submerged arc welding parameters on microstructure of SA516 steel Weld metal".
- [8] Colpaert, H. (2005). Metalografía Dos Productos Siderurgicos Comuns. Brasil.
- [9] Beverskog, B. (1997). Revised Pourbaix diagrams for chromium at 25-300 °C. Corrosion Science 43-57.
- [10] Calvo, F., Rodriguez, C. (2014). "Una Metodología Para El Estudio De La Maquinabilidad De Aleaciones De Aluminio-Cobre". Madrid, pp.2-3.
- [11] Nouari, M., List, G., Girot, F. & Géhin, D. (2005). International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, research and aplication. "Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminum alloys."
- [12] Aguilar, J. (2017). "Mecánica de corte". Obtenido de: http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/14.pdf
- [13] Peña, A. & Rendón, H. (2013). "Guía y Tablas Técnicas de los Aceros". Medellín, pp.24.
- [14] Castro, G. (2009). "Historia y evolución del acero. Proceso de producción del acero. Aceros especiales". Buenos Aires, pp. 7, 8, 9.
- [15] Welding Handbook. (1991). AWS. "Materials and applications". Eighth edition, vol. 4.
- [16] Zalazar, M. (1995). Cuaderno Facultad de ingeniería. "Introducción a los aceros HSLA". Universidad Nacional del Comahue, pp. 1-30.
- [17] Seferian, D. (1981). "Las Soldaduras: Técnica-Control Soldabilidad de los Metales". Primera Edición; Editorial URMO S.A; España.
- [18] AMERICAN WELDING SOCIETY. (1996). Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México, pp. 379-421
- [19] Kalpakjian, S. (2015). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. "Soldadura Fuerte".

- [20] AWS A5.31:2003, "Especificación para Fundentes para Soldadura Fuerte."
- [21] SISA. "Brazing Consejos para Soldadura". Recuperado de: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14758952/brazing-consejos-para-la-soldadura-sisa-brazing>
- [22] Universidad del País Vasco, Dpto. de Ingeniería Mecánica. (2016). "Mecanizado por Arranque de Viruta". Módulo III.
- [23] Sandvik Coromant. "Fórmulas y Definiciones de Fresado". Obtenido de: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [24] Ruiz, L. (2006). "El Control Numérico Computarizado en el Desarrollo Industrial". México D.F: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.
- [25] Sáenz, A. (2017). "Automatización de Procesos mediante Sistemas de Control de Movimientos Basados en CNC". pp. 17-18.
- [26] Guamangallo, J., Villaroel, E. (2012). "Análisis De La Soldadura Indirecta Por Horno (FB) En Aceros Al Carbono". Quito. pp. 165.
- [27] GH Inducción. (2018). Recuperado de: <http://www.ghinduction.com/process/soldadura-fuerte/?lang=es>
- [28] Acuña M., Lozada M. (2019). "Estudio de la influencia de la incorporación de arenas ferrosas como parte del fundente utilizado en el proceso de soldadura por arco sumergido sobre las propiedades mecánicas y microestructura de juntas soldadas de acero ASTM A572". Ecuador: Escuela Politécnica Nacional
- [29] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME. (2004). "Boiler and Pressure Vessel Code , Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators". Estados Unidos. Braising Data.
- [30] AMERICAN WELDING SOCIETY (1996). Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentice-Hall Hispanoamérica; México, 1996
- [31] Horwitz H. (1997). Soldadura: aplicación y práctica. Ed Alfaomega. Mexico.
- [32] AMERICAN WELDING SOCIETY. SFA AWS A5.8/A5.8M. (2004) Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding. Estados Unidos.
- [33] FLINN S.H. Y TROJAN P. K. (1991). Materiales de ingeniería y sus aplicaciones. 3º Ed. Mc Graw Hill.
- [34] AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). (1993) Handbook. Volumen 6. Welding, Brazing and Soldering. Octava Edición. Estados Unidos, 1993
- [35] VAN VLACK. (1961). "Elementos de la Ciencia de los Materiales. Editorial continental". México.
- [36] INDURA GRUPO AIR PRODUCTS. "Catálogo de procesos y productos". Recuperado de: <https://n9.cl/9a3v>

- [37] ARGENTA LTDA. (2005). SOLDADURAS ESPECIALES. “Materiales de aportación para soldadura de todos los metales”. Chile. Recuperado de: www.argenta.cl
- [38] MEDASA S.A. (2006). “Metales de aportación. Aleaciones de soldadura fuerte y fundentes”. España. Recuperado de: www.medasa.com
- [39] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME. Boiler and pressure vessel code SECTION IX: qualification standart for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators.
- [40] LUCASMILHAUPT. “Principios básicos de la soldadura fuerte: cómo realizar una soldadura fuerte en seis pasos”. Recuperado de: <https://lucasmilhaupt.com/ES/Brazing-Academy/Brazing-Fundamentals.htm>
- [41] STANSER MAQUINARIA CNC. “¿Cómo funcionan las fresadoras CNC?”. Recuperado de: <https://www.stanser.com/como-funcionan-las-fresadoras-cnc/>
- [42] PROINCO. Bote de polvos bórax 100 gr. Recuperado de: <https://n9.cl/y9jcm>
- [43] Universidad Politécnica de Cartagena, “Espectrometría de emisión por chispa” 2012. Recuperado de: <https://www.upct.es/sait/es/tecnicas-espectrometricas-y-afines/espectrometro-de-emision-por-chispa///>
- [44] Acerind, “Limpieza de las superficies de acero inoxidable” 2020. Recuperado de: <https://inoxidable.com/limpieza.htm>
- [45] Ingemecánica, “Fundamentos de la soldadura fuerte y blanda” 2020. Recuperado de: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn49.html>
- [46] Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, “Ensayo de tension” 2019. Recuperado de: https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/9026_tension.pdf
- [47] Laborcontrol Geosintéticos SL, “Ensayos en Laboratorios” 2015. Recuperado de: <http://es.laborcontrol.es/ensayos-y-servicios-parent/ensayos-en-laboratorio/resistencia-de-la-soldadura-por-pelado/>
- [48] Giachino, J & Weeks, W. (2007) “Técnica y práctica de la soldadura”. Barcelona, Bogotá, Buenos Aires, Caracas, Mexico, pp.20-33
- [49] Hayden. H, Moffat. W & Wulff. J. (1965): “The structure and properties of materials”. Volumen 3. Reimpreso con permiso de Wiley & Sons, Inc . pp. 37.
- [50] Schvab. (2011). “Máquinas y herramientas”. Colección encuentro Inet. Pp. 9-24
- [51] Lucas Milhaupt. Principios básicos de la soldadura fuerte. Recuperado de: <https://lucasmilhaupt.com/ES/Brazing-Academy/Brazing-Fundamentals.htm>

ANEXOS

ANEXO I. Combinaciones metal base-metal de aporte para soldadura fuerte.

	Al y sus aleaciones	Mg y sus aleaciones	Cu y sus aleaciones	Aceros al carbono y de baja aleación	Hierro colado	Acero inoxidable	Ni y sus aleaciones	Ti y sus aleaciones	Be, Zr y aleaciones (metales reactivos)	W, Mo, Ta, Cb y aleaciones (metales refractarios)	Aceros de herramientas
Al y sus aleaciones	BAISi										
Mg y sus aleaciones	X	BMg									
Cu y sus aleaciones	X	X	BAG, BAu, BCuP, RBCuZn	BNI							
Aceros al carbono y de baja aleación	BAISi	X	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNI							
Hierro colado	X	X	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, RBCuZn, BNI	BAG, RBCuZn, BNI						
Acero inoxidable	BAISi	X	BAG, BAu	BAG, BAu, BCu, BNI	BAG, BAu, BCu, BNI	BAG, BAu, BCu, BNI					
Ni y sus aleaciones	X	X	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNI	BAG, BCu, RBCuZn	BAG, BAu, BCu, BNI	BAG, BAu, BCu, BNI				
Ti y sus aleaciones	BAISi	X	BAG	BAG	BAG	BAG	BAG	Y			
Be, Zr y aleaciones (metales reactivos)	X BAISi (Be)	X	BAG	BAG, BNI*	BAG, BNI*	BAG, BNI*	BAG, BNI*	Y	Y		
W, Mo, Ta, Cb y aleaciones (metales refractarios)	X	X	BAG, BNI	BAG, BCu, BNI*	BAG, BCu, BNI*	BAG, BCu, BNI*	BAG, BCu, BNI*	Y	Y	Y	
Aceros de herramientas	X	X	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, RBCuZn, BNI	BAG, BAu, BCu, BNI	BAG, BAu, BCu, BNI	X	X	X	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNI

Nota: Consulte la especificación AWS A5.8 si desea información sobre composiciones específicas dentro de cada clasificación.
X - No se recomienda, aunque se puede usar con técnicas especiales para ciertas combinaciones de materiales disímiles.
Y - No es posible hacer generalizaciones sobre estas combinaciones. Consulte el manual de soldadura fuerte para averiguar cuáles metales de aporte se puede usar
* - Existen metales de aporte de soldadura fuerte especiales y se usan con éxito con combinaciones de metales específicos.

Metales de aporte:
BAISi Aluminio
BAG Base de plata
BAu Base de oro
BCu Cobre
BCuP Cobre fósforo
RBCuZn Cobre zinc
BMg Base de magnesio
BNI Base de níquel

(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY; Manual de Soldadura; Octava Edición; Tomo II; Editorial Prentize-Hall Hispanoamérica; México; 1996; Pág. 393)

ANEXO II. Clasificación de los fundentes de soldadura fuerte con materiales de aporte de soldadura fuerte.

Tabla 1 — Clasificación de fundentes de soldadura fuerte con materiales de aporte de soldadura fuerte.

Clasificación AWS*	Forma	Tipo de Metal de Aporte	Rango de Temperatura de Actividad	
			°F	°C
B1-A	Polvo	BAlSi	1080-1140	580-615
FB1-B	Polvo	BAlSi	1040-1140	560-615
FB1-C	Polvo	BAlSi	1000-1140	540-615
FB2-A	Polvo	BMg	900-1150	480-620
FB3-A	Pasta	B _{Ag} & B _{CuP}	1050-1600	565-870
FB3-C	Pasta	B _{Ag} & B _{CuP}	1050-1700	565-925
FB3-D	Pasta	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Ni} , B _{Au} & R _B C _u Z _n	1400-2200	760-1205
FB3-E	Líquido	B _{Ag} , & B _{CuP}	1050-1600	565-870
FB3-F	Polvo	B _{Ag} , & B _{CuP}	1200-1600	650-870
FB3-G	Papilla	B _{Ag} , & B _{CuP}	1050-1600	565-870
FB3-H	Papilla	B _{Ag}	1050-1700	565-925
FB3-I	Papilla	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Ni} , B _{Au} , R _B C _u Z _n	1400-2200	760-1205
FB3-J	Polvo	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Ni} , B _{Au} , & R _B C _u Z _n	1400-2200	760-1205
FB3-K	Líquido	B _{Ag} & R _B C _u Z _n	1400-2200	760-1205
FB4-A	Pasta	B _{Ag} & B _{CuP}	1100-1600	595-870

(Fuente: ANSI/AWS A5.31-92R Specification for Fluxes for Brazing and Braze Welding.)

ANEXO III. Durezas y cálculo de desviación estándar de las probetas en las zonas de soldadura

Puntos de medición	Zonas de soldadura	Probetas				
		1	2	3	4	5
		DUREZAS (HRB)				
1	Metal base	76	75	79	70	78
1'	Metal base	78	78	79	74	79
5	Metal base	80	81	78	81	71
5'	Metal base	80	82	78	82	79
Promedio	Metal base	79	79	79	77	77
2	ZAC	80	74	80	79	55
2'	ZAC	80	72	80	77	65
4	ZAC	78	81	72	81	68
4'	ZAC	74	82	76	82	78
Promedio	ZAC	78	77	77	80	67
3	Material de aporte	33	37	25	43	35
3'	Material de aporte	36	35	37	40	42
Promedio	Material de aporte	35	36	31	42	39

(Fuente: Propia)

Cálculo de desviación estándar de las durezas.

Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3		Probeta 4		Probeta 5	
Metal base		Metal base		Metal base		Metal base		Metal base	
Promedio	78,5	Promedio	79,0	Promedio	78,50	Promedio	76,75	Promedio	76,8
Desviación Estándar	1,9	Desviación Estándar	3,2	Desviación Estándar	0,58	Desviación Estándar	5,74	Desviación Estándar	3,9
Límite máximo	80,4	Límite máximo	82,2	Límite máximo	79,08	Límite máximo	82,49	Límite máximo	80,6
Límite mínimo	76,6	Límite mínimo	75,8	Límite mínimo	77,92	Límite mínimo	71,01	Límite mínimo	72,9
ZAC		ZAC		ZAC		ZAC		ZAC	
Promedio	78,0	Promedio	77,3	Promedio	77,00	Promedio	79,75	Promedio	66,5
Desviación Estándar	2,8	Desviación Estándar	5,0	Desviación Estándar	3,83	Desviación Estándar	2,22	Desviación Estándar	9,5
Límite máximo	80,8	Límite máximo	82,2	Límite máximo	80,83	Límite máximo	81,97	Límite máximo	76,0
Límite mínimo	75,2	Límite mínimo	72,3	Límite mínimo	73,17	Límite mínimo	77,53	Límite mínimo	57,0
Material de aporte		Material de aporte		Material de aporte		Material de aporte		Material de aporte	
Promedio	34,5	Promedio	36,0	Promedio	31,00	Promedio	41,50	Promedio	38,5
Desviación Estándar	2,1	Desviación Estándar	1,4	Desviación Estándar	8,49	Desviación Estándar	2,12	Desviación Estándar	4,9
Límite máximo	36,6	Límite máximo	37,4	Límite máximo	39,49	Límite máximo	43,62	Límite máximo	43,4
Límite mínimo	32,4	Límite mínimo	34,6	Límite mínimo	22,51	Límite mínimo	39,38	Límite mínimo	33,6

(Fuente: Propia)

ANEXO IV. Durezas y cálculo de desviación estándar de los materiales base y de aporte antes del proceso de soldadura.

Punto de medición	Material	Dureza (HRB)
1	Material base	81
2	Material base	81
3	Material base	83
4	Material base	83
5	Material base	82
6	Material base	83
7	Material base	83
Promedio	Material base	82
1	Material de aporte	89
2	Material de aporte	88
Promedio	Material de aporte	89

(Fuente: Propia)

Cálculo de la desviación estándar

Metal base	
Promedio	82,29
Desv. Estándar	0,95
límite máximo	83,24
límite mínimo	81,33
Metal de aporte	
Promedio	88,50
Desv. Estándar	0,71
límite máximo	89,21
límite mínimo	87,79

(Fuente: Propia)

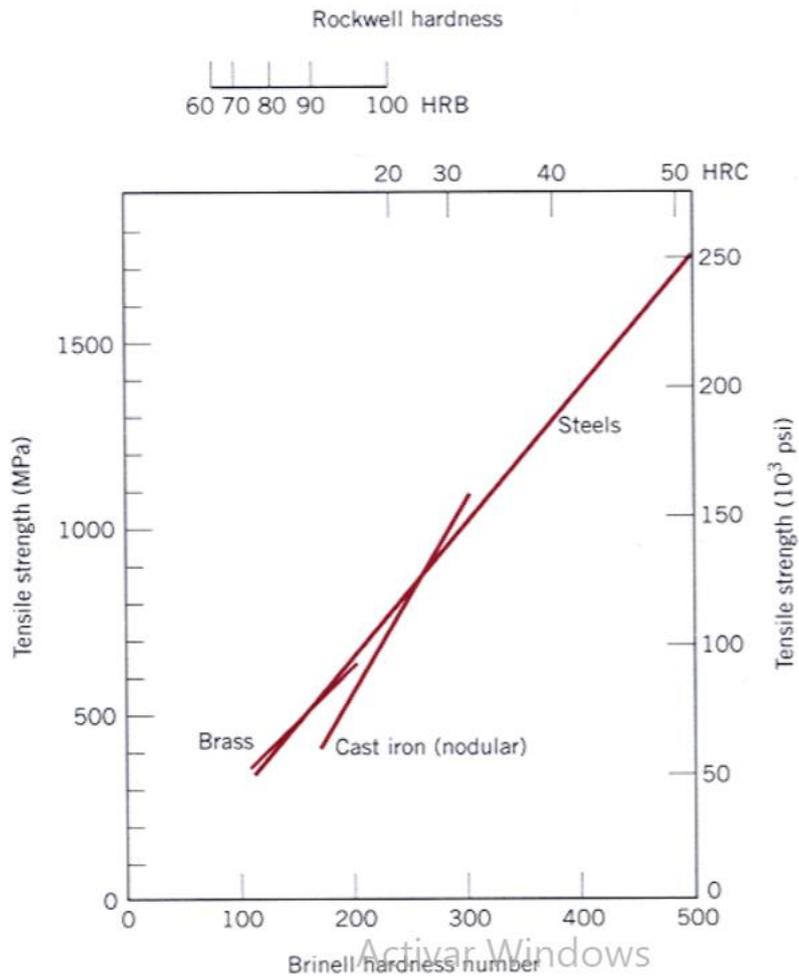
ANEXO V. Registro de procedimiento de calificación (PQR)

PQR REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN								
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO								
Norma: ASME IX Nombre de la compañía: TESIS-EPN Nº de identificación: 01 Especificación del material: ASTM A572 Proceso de soldadura: Brazing Posición de soldadura: 1G Especificación metal de aporte: AWS RBCuZn-C				Fundente: Bórax Pase: Simple <input checked="" type="checkbox"/> Múltiple <input type="checkbox"/> O Temperatura de soldadura: 940°C				
INSPECCION VISUAL								
Apariencia: Buena Porosidades: Poca porosidad Capilaridad: Buena								
PRUEBA DE TRACCIÓN								
Probeta Nº	Designación	Metal Base		Ancho (mm)	Area (mm ²)	Carga (N)	Esfuerzo (MPa)	Característica de falla
		Norma	Denominación comercial					
1	1A	ASTM A572	A572	19	1090	68168	62,53	En la soldadura
2	2B	ASTM A572	A572	19	974	67840	69,65	En la soldadura
PRUEBA DE PELAR								
Probeta Nº	Designación	Metal base		Ancho (mm)	Área soldada (mm ²)	Área de mojado (%)	Observaciones	
		Norma	Designación comercial					
1	1A	ASTM A572	A572	38	1577,96	95	Mojado completo	
2	2B	ASTM A572	A572	38	1516,68	41,34	Falta de mojado	
Realizado por:		Revisado por:			Aprobado por:			

 <hr/> <p>Gualotuña Diego</p>  <hr/> <p>Tufiño Alexander</p>	Msc. Carlos Díaz	<hr/> <p>Msc. Carlos Díaz</p>
--	------------------	-------------------------------

(Fuente: Propia)

ANEXO VI. Relación entre dureza y esfuerzo de tensión.



$$TS(\text{psi}) = 500 * HB$$

$$TS(\text{MPa}) = 3.45 * HB$$

(Fuente: Hayden. H, Moffat. W & Wulff. J. (1965): "The structure and properties of materials". Volumen 3.

Reimpreso con permiso de Wiley & Sons, Inc . pp. 37.)

ANEXO VII. Equivalencias entre durezas brinell, rockwell, vickers y shore y la resistencia a la tracción.

Brinell Diámetro Huella	Brinell Dureza HB	Rockwell Dureza Ha	Rockwell Dureza HRb	Rockwell Dureza HRc	Vickers Dureza HV	Shore	Resistencia a la tracción Kg/mm ²
2.35	682	64.0	-	65	885	91.0	232.9
2.40	652	83.0	-	63	820	87.2	221.5
2.45	627	81.5	-	61	765	84.8	213.5
2.5	600	80.5	-	59	633	76.5	188.7
2.55	578	79.5	-	59	717	81.5	204.0
2.60	555	79.0	120	57	675	78.5	195.1
2.65	534	78.0	119	54	598	73.5	181.3
2.70	514	77.0	119	52	567	71.0	174.9
2.75	495	76.5	117	51	540	68.5	168.0
2.80	477	75.5	117	49	515	66.7	162.2
2.85	461	74.4	116	48	494	65.0	157.0
2.90	444	73.5	115	46	472	63.0	150.6
2.95	429	73.0	115	45	454	61.0	145.6
3.00	415	72.5	114	44	437	59.0	140.0
3.05	401	71.5	113	42	420	57.2	136.0
3.10	388	71.0	112	41	404	65.8	132.0
3.15	375	70.5	112	40	389	54.0	127.5
3.20	363	70.0	110	39	375	52.2	123.4
3.25	352	69.5	110	38	363	50.5	120.0
3.30	341	68.5	109	36	350	49.2	115.9
3.35	331	68.0	109	35	339	48.0	112.4
3.40	321	67.5	108	34	327	46.7	109.1
3.45	311	67.0	108	33	316	45.2	105.6
3.50	302	66.5	107	32	305	44.5	102.7
3.55	293	66.0	106	31	296	43.2	99.6
3.60	285	65.5	105	30	287	42.0	96.9
3.65	277	65.0	104	29	279	41.0	94.2
3.70	269	64.5	104	28	270	40.0	91.5
3.75	262	64.0	103	27	263	39.2	89.1
3.80	255	63.0	102	25	256	38.5	86.7
3.85	248	62.5	102	24	248	37.5	84.3
3.90	241	62.0	100	23	241	36.5	81.9
3.95	235	61.5	100	22	235	35.7	79.9
4.00	229	61.0	99	21	229	35.0	77.9
4.05	223	60.5	98	20	223	34.0	75.8
4.10	217	-	97	18	217	33.0	73.8
4.15	212	-	96	17	212	32.5	72.1
4.20	207	-	96	16	207	32.0	70.4
4.25	202	-	95	15	202	31.2	68.7
4.30	197	-	94	14	197	30.2	67.0
4.35	192	-	93	13	192	29.5	65.3
4.40	187	-	92	11	187	29.0	63.6
4.45	183	-	91	10	183	28.5	62.2
4.50	179	-	90	9	179	28.0	60.9
4.55	174	-	89	7	174	27.5	59.2
4.60	170	-	88	6	170	26.5	57.8
4.65	166	-	87	4	166	25.5	56.3
4.70	163	-	86	3	163	25.0	55.4
4.75	159	-	85	1	159	24.5	54.0
4.80	156	-	84	0	156	24.0	53.0
4.85	153	-	82	-	153	23.0	52.0
4.90	149	-	81	-	149	23.0	50.7
4.95	146	-	80	-	146	22.0	49.6
5.00	143	-	79	-	143	22.0	48.6
5.05	140	-	78	-	140	21.0	47.6
5.10	137	-	77	-	137	21.0	46.6
5.15	134	-	76	-	134	21.0	45.6
5.20	131	-	74	-	131	20.0	44.5
5.25	128	-	73	-	128	20.0	43.5
5.30	126	-	72	-	126	-	42.8
5.35	124	-	71	-	124	-	42.2
5.40	121	-	70	-	121	-	41.2
5.45	118	-	69	-	118	-	40.1
4.50	116	-	68	-	116	-	39.4
5.55	114	-	67	-	114	-	38.8
5.60	112	-	66	-	112	-	38.0
5.65	109	-	65	-	109	-	37.1
5.70	107	-	64	-	107	-	36.4
5.75	105	-	62	-	105	-	35.7
5.80	103	-	61	-	103	-	35.0

(Fuente: <https://n9.cl/sqn8l>)

ANEXO VIII. Cálculo del esfuerzo de tensión de material base (acero ASTM A572) en condición de recocido.

- Dureza del acero ASTM A572 en condición de recocido = 62 HRB
- Equivalencia de durezas (Anexo VII): 62 HRB = 105 HB
- Cálculo de esfuerzo de tensión en psi, con ayuda de las fórmulas del ANEXO VI:

$$TS = 3,45 * HB$$

$$TS = 3,45 * 105$$

$$TS = 362 \text{ MPa}$$

ANEXO IX. Informe técnico de espectrometría por chispa.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO



Solicitado por: Ing. Carlos Wime Díaz Msc

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 24 de noviembre del 2020

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestra de material metálico

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de material metálico.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Identificación Gráfica
MUESTRA METÁLICA	Sample M1	

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. Método: Fe 110 Low alloy

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 3 mediciones en el mismo punto y finalmente se promedió su valor.

		Muestra M1
Elemento		Valor [%]
Carbono	[C]	0,139
Silicio	[Si]	0,130
Manganeso	[Mn]	1,307
Fósforo	[P]	0,021
Cromo	[Cr]	0,296
Níquel	[Ni]	0,022
Aluminio	[Al]	0,019
Cobalto	[Co]	0,0068
Niobio	[Nb]	0,015
Hierro	[Fe]	98,03
Total		99,99



Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

**Jefe del Laboratorio de
Fundición.**



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 24.11.2020 08:00:58

Method: Fe110

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
Ø	0,139	0,130	1,307	0,021	<0,0030
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
Ø	0,296	<0,0050	0,022	0,0061	0,019
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	W [%]
Ø	0,0068	0,015	<0,0020	<0,0030	<0,020
	B [%]	Sn [%]	Fe [%]		
Ø	0,0027	<0,0020	98,03		

ANEXO X. Informe técnico del ensayo de tensión.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M20.069

Quito, 24 de noviembre de 2020

Solicitado por: Msc. Carlos Díaz
Persona de contacto: Diego Gualotuña, Alexander Tufiño
Teléfono: 0992320138
Correo: diego.gualotuna01@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 19/11/2020
Fecha de ejecución: 20/11/2020

ORDEN DE TRABAJO N°: DM-OTI0086-2020

1. **MUESTRAS:** Dos (2) probetas metálicas soldadas para ensayo de carga.
2. **GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDADURA INDIRECTA EN HORNO DEL ACERO ASTM A572 APLICANDO UN PROCESO DE FRESADO SUPERFICIAL PREVIO AL PROCESO DE SOLDADURA

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras

Id. cliente	Id. LAEV
1A	M20.069.01
2B	M20.069.02

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $17,2 \pm 0,3$ °C

Humedad relativa: $73,1 \pm 1,2$ %

4. ENSAYO DE CARGA EN JUNTAS SOLDADAS

Tabla 2. Carga máxima registrada.

Id. LAEV	Carga máxima registrada		Observaciones
	lbf	N	
M20.069.01	15 325	68 168	FJS
M20.069.02	15 251	67 840	FJS

FJS: Falla en la junta soldada

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:	 <small>firmado electrónicamente por:</small> JONATHAN FERNANDO CASTRO REVELO	
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamín
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		