



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA JUNTA SOLDADA DE UN ACERO ESTRUCTURAL (A588) CON EL PROCESO GMAW MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE TAGUCHI

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

CATOTA VELOZ THALIA VALERIA
thalia.catota@epn.edu.ec

ZAMBRANO BRAVO ENRY SIDNEY
enry.zambrano@epn.edu.ec

DIRECTOR:
Ing. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME M.Sc.
carlos.diaz@epn.edu.ec

CODIRECTOR:
Ing. BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO M.Sc.
homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **CATOTA VELOZ THALIA VALERIA** y **ZAMBRANO BRAVO ENRY SIDNEY**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Homero Barragán M.Sc.

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Catota Veloz Thalia Valeria** y **Zambrano Bravo Enry Sidney**, 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.

Catota Veloz Thalia Valeria

Zambrano Bravo Enry Sidney

DEDICATORIA

A mi amada mamita, Romina

A mis abuelitos, Manuel y Zoila

A mis hermanos, Ruth y Miguel

A mis sobrinos, Elías y Paula

Con todo el amor del mundo, a mi dulce y preciosa Julieta

Thalia Catota

A mi madre Estela por su entrega y valor.

A mi padre Julio por su cariño y apoyo.

A Julieta por ser mi sueño.

Enry Zambrano

AGRADECIMIENTO

A la vida, por lo bueno y lo malo, por toda las enseñanzas y las aventuras, por llenarme de tantas cosas buenas.

A mi mami, a quien amo y admiro profundamente, por ser quien durante toda mi vida me dio lo necesario para llegar hasta aquí, por alimentar mis sueños y apoyarme para hacerlos realidad, por confiar en mí y siempre demostrarme su amor permaneciendo a mi lado, por enseñarme a ser valiente y ser mi ejemplo para seguir, por no rendirse nunca y darme todo lo que ahora soy.

A mis hermanos, quienes son parte fundamental de mi vida, por ser un ejemplo de superación y estar ahí para festejar las alegrías y enfrentar adversidades, por motivarme siempre para continuar esforzándome para lograr mis metas.

A Enry, por caminar a mi lado todos estos años, por apoyarme incondicionalmente en cada situación, por animarme e impulsarme a perseguir todas mis metas, por amarme sin importar las circunstancias, por compartir su vida conmigo, por emprender el viaje más hermoso de nuestras vidas.

Al Ing. Carlos Díaz, por habernos direccionado en este trabajo, por brindarnos siempre atención con amabilidad, respeto y confianza, haber sido su estudiante y conocerlo es un honor.

Al Ing. Homero Barragán y al Ing. Gabriel Velastegui por brindarnos apoyo durante este trabajo, por ayudarnos con sus conocimientos.

Al LMDF, a la Ing. Patricia Proaño, por mostrar dominio de sus conocimientos e impartirlos a quienes acuden a ella, al sr. Rene Jame, por la apertura a brindarnos ayuda, por toda su gentileza y amistad.

Al sr. Jorge Guzmán, por colaborarnos con su profesionalismo al soldar nuestras placas.

A la Metalmecánica San Bartolo, por brindarnos soporte al prestarnos sus máquinas y herramientas para el maquinado de nuestras probetas.

A Santiago Camacho, del Laboratorio de Ensayos No Destructivos, por ayudarnos con el ensayo radiográfico con tanta amabilidad.

A la Escuela Politécnica Nacional y la Facultad de Ingeniería Mecánica, por abrirme sus puertas, porque ha sido una gran experiencia haber estudiado aquí, porque he encontrado amigos maravillosos quienes se han convertido en mi familia, porque siempre estaré orgullosa de haber pasado por estas aulas.

Thalia Catota

A mis padres por estar a mi lado aun en los momentos más complicados, apoyarme incondicionalmente, enseñarme el valor de la familia y siempre estar conmigo para levantarme de cada fracaso.

A Thalia por seguir el camino a mi lado y descubrir cada día la ilusión de una vida por delante, juntos y fuertes.

Al Ing. Carlos Díaz que brindo su excelente guía en la dirección de este trabajo y siempre supo apoyar con paciencia todas las dudas que se presentaron.

A los ingenieros Homero Barragán y Gabriel Velastegui por la buena disposición y apertura para guiar y resolver los diferentes problemas que surgieron en el proceso.

A Don René por el soporte que nos brindó desde el primer momento y con el que nos sentimos honrados de haber mantenido una amistad.

A la ingeniera Patricia Proaño que con gentileza nos permitió realizar lo ensayos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

Al señor Jorge Guzmán que colaboro en la soldadura de las probetas y demostró gran calidad humana y profesional en el trabajo.

Al ingeniero Santiago Camacho que con generosidad nos prestó todas las facilidades para el ensayo radiográfico.

Al equipo técnico de la metalmecánica de San Bartolo que nos facilitaron las máquinas y herramientas necesarias para el mecanizado de diferentes probetas.

A la mejor universidad del país, la grandiosa Escuela Politécnica Nacional por permitirme ser parte de esta comunidad privilegiada, por entregarme los años más memorables de la vida, donde tuve gratas experiencias y conocí muchas personas entrañables y enseñarme que existen muchos caminos, pero lo importante es siempre salir adelante sin importar los obstáculos.

Enry Zambrano

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Acero ASTM A588.....	3
1.1.1. Soldabilidad del acero A588.....	3
1.1.2. Composición química del acero A588.....	4
1.2. Proceso de soldadura GMAW.....	4
1.2.1. Modos de transferencia del metal de aporte.....	5
1.2.2. Parámetros del proceso de soldadura GMAW.....	7
1.2.3. Gas de protección.....	8
1.2.4. Electrodo.....	8
1.3. Diseño de parámetros de Taguchi.....	9
1.3.1. Etapas de Taguchi.....	10
1.3.2. Robustez.....	10
1.3.3. Factores de ruido.....	11
1.3.4. Arreglos ortogonales.....	11
1.3.5. Razón señal/ruido.....	12
1.3.6. Gráfica de efectos principales.....	13
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. Metodología de Taguchi.....	16
2.1.1. Factores y niveles.....	16
2.1.2. Diseño de arreglo ortogonal.....	16
2.2. Ensayos al material base.....	17
2.2.1. Ensayo de composición química.....	17
2.2.2. Ensayo de micrografía.....	18
2.2.2.1. Procedimiento.....	18
2.2.2.2. Equipos.....	18
2.2.3. Ensayo de dureza.....	19
2.2.3.1. Preparación de probetas.....	20
2.2.3.2. Procedimiento.....	21

2.2.3.3. Equipo	21
2.3. Procedimiento de Soldadura	21
2.3.1. Preparación de placas.....	22
2.3.2. Equipo	23
2.4. Ensayos a las juntas soldadas	23
2.4.1. Ensayo radiográfico.....	23
2.4.1.1. Preparación de probetas	24
2.4.1.2. Procedimiento.....	26
2.4.1.3. Equipos.....	27
2.4.2. Ensayo de doblado.....	27
2.4.2.1. Probetas	27
2.4.2.2. Procedimiento.....	28
2.2.4.3. Equipo	28
2.4.3. Ensayo de tensión	29
2.4.3.1. Probetas	29
2.4.3.2. Procedimiento.....	30
2.4.3.3. Equipo	30
2.4.4. Ensayo de Charpy	31
2.4.4.1. Procedimiento.....	31
2.4.4.2. Equipo	32
2.4.5. Ensayo metalográfico.....	32
2.4.6. Ensayo de dureza.....	33
2.5. Procedimiento de análisis de método de Taguchi en Minitab 18	33
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
3.1. Resultados.....	39
3.1.1. Composición química del material base.....	39
3.1.2. Cordones de soldadura	40
3.1.2.1. Aspecto físico	40
3.1.2.2. Ensayo de radiografía	42
3.1.2.3. Ensayo de doblado.....	46
3.1.2.4. Ensayo de tensión.....	48
3.1.2.5. Ensayo Charpy	49
3.1.2.6. Ensayo metalografico.....	51
3.1.2.7. Macrografías.....	56
3.1.2.8. Ensayo de dureza.....	62
3.1.3. Gráficas de efectos principales	65
3.1.3.1. Tensión.....	65

3.1.3.2. Dureza	66
3.1.3.3. Charpy	66
3.1.3.4. Modelo combinado	67
3.2. Discusión	68
3.2.1 Comportamiento químico-metalúrgico del material base.	68
3.2.2. Ensayo de doblado	68
3.2.3. Comportamiento mecánico de las juntas soldadas	69
3.2.3.1. Muestra P1	69
3.2.3.2. Muestra P2	71
3.2.3.3. Muestra P3	71
3.2.3.4. Muestra P4	72
3.2.3.5. Muestra P5	73
3.2.3.6. Muestra P6	73
3.2.3.7. Muestra P7	74
3.2.3.8. Muestra P8	75
3.2.3.9. Muestra P9	76
3.2.3.10. Muestra CN	76
3.2.4. Efectos principales señal/ruido	77
4. CONCLUSIONES	79
Referencias Bibliográficas	81
Anexos	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Elementos que componen la soldadura por arco con gas de protección.....	5
Figura 1.2. Denominación del alambre ER-70S-6 para GMAW.	9
Figura 1.3: Grafica de efectos principales de dos niveles para cinco parámetros.	14
Figura 2.1. Diagrama de la metodología del proyecto.....	15
Figura 2.2. Diseño de la junta para soldadura con medidas en milímetros.	23
Figura 2.3. Espécimen de soldadura siendo medido para la preparación del ensayo de radiografía.....	24
Figura 2.4. Diagrama de operación del equipo de radiografía.	25
Figura 2.5. Dimensiones para las probetas de doblado de cara y de raíz.	28
Figura 2.6. Probetas de ensayo de tensión por sección reducida según AWS.	29
Figura 2.7. Dimensiones de las probetas en función del espesor de la placa de material base.....	30
Figura 2.8. Dimensiones para la probeta del ensayo Charpy.....	31
Figura 2.9. Probeta lista para realizar el ensayo de metalografía.	32
Figura 2.10. Pasos para crear un diseño de Taguchi en Minitab 18.	33
Figura 2.11. Selección de factores y de niveles en el software.....	34
Figura 2.12. Diseños disponibles para el caso de tres factores con tres niveles en un diseño de Taguchi.	34
Figura 2.13. Asignación de factores y los valores de los niveles.	35
Figura 2.14. Definición del diseño de Taguchi.....	36
Figura 2.15. Pasos para realizar el análisis del diseño de Taguchi.....	36
Figura 2.16. Determinar los datos de respuesta según la propiedad que se quiera analizar.	37
Figura 2.17. Generación de graficas de efectos principales para relaciones de señal a ruido.....	37
Figura 2.18. Análisis de tablas para señal a ruido y medias.	38
Figura 2.19. Se realiza el análisis de señal a ruido con la opción Más grande es mejor.	38
Figura 3.1. Análisis comparativo de la resistencia a la tensión de las diferentes juntas soldadas.	49
Figura 3.2. Análisis comparativo de la energía de impacto de las diferentes juntas soldadas.	50
Figura 3.3. Macrografía de la muestra en condiciones normales (CN).	57
Figura 3.4. Macrografía de la muestra P1.	57

Figura 3.5. Macrografía de la muestra P2.	58
Figura 3.6. Macrografía de la muestra P3.	58
Figura 3.7. Macrografía de la muestra P4.	59
Figura 3.8. Macrografía de la muestra P5.	59
Figura 3.9. Macrografía de la muestra P6.	60
Figura 3.10. Macrografía de la muestra P7.	60
Figura 3.11. Macrografía de la muestra P8.	61
Figura 3.12. Macrografía de la muestra P9.	61
Figura 3.13. Probeta utilizada para medición de dureza.	62
Figura 3.14. Análisis comparativo del promedio de las durezas obtenidas de cada muestra. Gráfico Dureza vs Distancia de cada junta soldada.	64
Figura 3.15. Gráfica de efectos principales para relaciones señal a ruido en el caso de la tensión.	65
Figura 3.16. Gráfica de efectos principales para relaciones señal a ruido para el caso de la dureza.	66
Figura 3.17. Gráfica de efectos principales para relaciones señal a ruido en el caso del ensayo de impacto.....	67
Figura 3.18. Gráfica de efectos principales para relaciones señal a ruido para el modelo óptimo del proceso estudiado.	67
Figura 3.19: Superficie de fractura de la probeta P1.	70
Figura 3.20: Superficie de fractura de la P7.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Requerimientos de tensión del acero A588.....	3
Tabla 1.2. Composición química del acero según norma ASTM A588	4
Tabla 1.3. Cuadro Comparativo de los modos de transferencia.	6
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas mínimas del electrodo ER 70S – 6.....	9
Tabla 1.5. Arreglo ortogonal L ₄ para corridas experimentales de tres factores con dos niveles cada uno.....	12
Tabla 1.6. Tipos de estudio de robustez.....	13
Tabla 2.1. Factores del proceso de soldadura GMAW y los niveles que se usaran en la experimentación.	16
Tabla 2.2. Matriz de experimentos basada en el arreglo ortogonal L ₉ de Taguchi.	17
Tabla 2.3. Equipo de desbaste grueso para la preparación de las probetas de metalografías.	19
Tabla 2.4. Especificaciones de la maquina pulidora semiautomática.	19
Tabla 2.5. Especificaciones de microscopio de metalografías.	19
Tabla 2.6. Características de las escalas de dureza Rockwell.....	20
Tabla 2.7. Especificaciones de durómetro Rockwell	21
Tabla 2.8. Configuración obtenida del arreglo ortogonal L ₉ para la realización de los experimentos.	22
Tabla 2.9. Parámetros de soldadura del espécimen de prueba	22
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de la máquina de soldadura.	23
Tabla 2.11. Tiempo de exposición de cada espécimen.....	25
Tabla 2.12. Tamaños de los IQI de hilo.....	26
Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del equipo de radiografía.	27
Tabla 2.14. Especificaciones técnicas de la dobladora hidráulica.....	29
Tabla 2.15. Especificaciones técnicas de la máquina del ensayo de tensión.	30
Tabla 2.16. Especificaciones técnicas de la máquina de impacto tipo péndulo.	32
Tabla 2.17. Tabla expuesta en la hoja de trabajo con el arreglo ortogonal junto a los resultados obtenidos de los diferentes ensayos mecánicos.....	35
Tabla 3.1. Resultados de la composición química del material de ensayo.	39
Tabla 3.2. Aspecto físico de las juntas soldadas.....	42
Tabla 3.3. Resumen de los resultados del ensayo de radiografía.....	43
Tabla 3.4. Resultados de los ensayos de doblado.	47
Tabla 3.5. Resumen del ensayo de tensión.	48
Tabla 3.6. Resultados ensayo Charpy.....	50

Tabla 3.7: Resultados del ensayo metalográfico de las juntas soldadas.	51
Tabla 3.8: Tamaño de las ZAC obtenidas de las macrografías de cada junta soldada.	62
Tabla 3.9. Valores de dureza medidos en cada probeta.	63
Tabla 3.10. Valores promedio de las durezas medidas.....	63

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo aplicar el método de Taguchi a un proceso de soldadura GMAW en un acero estructural A588, de tal manera que se realizará una variación en los parámetros de soldadura para realizar experimentación y obtener diferentes especímenes soldados. Se realiza un análisis químico por medio de espectrometría de emisión atómica de chispa con el objeto de comprobar la composición química del material base. En las diferentes juntas soldadas se les realizó ensayos de tensión, dureza y de impacto para determinar las propiedades mecánicas de cada cordón de soldadura. Y también se llevaron a cabo ensayos de doblado y radiografía industrial para determinar discontinuidades o defectos presentes en la soldadura. Adicionalmente se realizó un análisis de micrografía de cada muestra experimental con el fin de completar la interpretación de los resultados obtenidos con la experimentación. Los datos obtenidos a partir de los ensayos sirvieron para realizar el análisis utilizando el método de Taguchi del que se pudo obtener las gráficas de efectos principales, en la cuales se puede identificar los valores de los parámetros, que fueron 25 voltios, 225 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre y velocidad de avance de soldadura de 133 mm/min, brindan las mejores propiedades mecánicas y de esta manera encontrar la mejor junta soldada que corresponde a la probeta P5. Las gráficas mencionadas también muestran que el voltaje fue la variable que más influye sobre las propiedades mecánicas de la soldadura.

Palabras clave: Acero estructural, parámetros de soldadura, calidad, método de Taguchi, propiedades mecánicas, ensayos mecánicos

ABSTRACT

The present work aims to apply the Taguchi method to a GMAW welding process on a structural steel A588, in such a way that a variation in the welding parameters will be carried out in order to perform experimentation and obtain different welded specimens. A chemical analysis is performed by spark atomic emission spectrometry in order to check the chemical composition of the base material. In the different welded joints, stress, hardness and impact tests were performed to determine the mechanical properties of each weld. Also bending tests and industrial radiography were performed to determine discontinuities or defects in the weld. Additionally, a micrograph analysis of each experimental sample was performed in order to complete the interpretation of the results obtained with the experimentation. The data obtained from the tests served to perform the analysis using the Taguchi method from which the main effects graphs were obtained, in which the values of the parameters that provide the best mechanical properties were 25 volts, 225 [in/min] of wire feed speed and welding speed of 133 mm/min provided and find the best welded joint that corresponds to the sample P5. The mentioned graphs can also show that the voltage was the variable that most influences the mechanical properties of the weld.

Keywords: Structural Steel, welding parameters, quality, Taguchi method, mechanical properties, mechanical test

“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA JUNTA SOLDADA DE UN ACERO ESTRUCTURAL (A588) CON EL PROCESO GMAW MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE TAGUCHI”

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador el sector de la construcción es de vital importancia pues es el responsable de generar un valor agregado imprescindible a la economía nacional ya que se estima que tiene un aporte del 11.6% del PIB del país y representa el 8% del total de ingresos de las empresas nacionales. Sin embargo, la situación compleja por la que pasa la economía del país ha provocado una reducción progresiva de la inversión pública que impactó al sector.

En medio de esta situación adversa el sector de la construcción debe encontrar la manera de sobreponerse y en ese sentido las estrategias que desarrolle serán vitales para que se pueda mantener un crecimiento y desarrollo. Por lo que existe la necesidad de plantear sistemas y estudios que beneficien al sector productivo del país, ya que difícilmente se encuentran trabajos acerca de la aplicación de métodos para la mejora de la calidad de productos y estructuras soldados en general.

Según la filosofía de Taguchi, la calidad puede ser medida en función del costo que un producto genera a la sociedad y es por esta razón que se debe plantear tácticas y empezar estudios acerca de cómo mejorar la calidad y reducir ese costo. El método de Taguchi plantea una estrategia experimental que permite determinar los niveles de los diferentes factores de diseño de un proceso, lo que permite entender la relación de los factores en la afectación de la calidad.

Este trabajo busca iniciar el estudio de la metodología de Taguchi aplicado en el análisis de las propiedades mecánicas de una junta soldada de un acero estructural. De esta manera se espera establecer una apertura al conjunto de técnicas que permitan obtener una mejora de la calidad de los procesos productivos del país y una reducción del costo que estos producen a la industria.

Objetivo general

Analizar las propiedades mecánicas de la junta soldada de un acero estructural (A588) con el proceso GMAW mediante la implementación del método de Taguchi

Objetivos específicos

- Establecer las variables del proceso de soldadura GMAW del acero estructural que se usarán para la aplicación del método de Taguchi para realizar las juntas soldadas
- Ejecutar la soldadura y ensayos mecánicos de diferentes juntas soldadas que se utilizarán para aplicar el método de Taguchi
- Analizar e interpretar los resultados de los ensayos realizados a las juntas soldadas mediante el método de Taguchi
- Analizar en base a los resultados de los ensayos realizados las características de la unión obtenida de acuerdo con cada parámetro establecido, y obtener valores óptimos para encontrar la junta con las mejores propiedades mecánicas

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Acero ASTM A588

El acero ASTM A588 es un acero estructural al carbono de alta resistencia y baja aleación, para aplicaciones a la intemperie, debido a que posee buena resistencia a la corrosión atmosférica y es utilizado principalmente en estructuras soldadas o atornilladas. Las aplicaciones más importantes son puentes soldados y edificios. Según la norma que refiere a este acero, la ASTM A588, la resistencia a la corrosión atmosférica de este acero es mejor que en los aceros al carbono por lo que se le puede diferenciar por una capa de óxido bien adherida de tono rojizo que le da una apariencia característica a este acero. Según la norma que describe a este acero este debe tener requerimientos mínimos de tensión que se detallan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Requerimientos de tensión del acero A588.

Resistencia mínima a la tensión, ksi [MPa]	Límite de elasticidad mínimo, ksi [MPa]	% Elongación mínima en 200 mm	% Elongación mínima en 50 mm
70 [485]	50[345]	18	21

(Fuente: ASTM A588A/588M - 15)

1.1.1. Soldabilidad del acero A588

La soldabilidad es un término que se refiere a la capacidad de un metal o varios metales para soldarse de manera conveniente y que la unión soldada posea las propiedades mecánicas deseadas para que cumpla de manera satisfactoria con el uso o servicio requeridos. La soldabilidad se caracteriza por la facilidad con la que se realiza una soldadura ya que los factores que afectan son principalmente el proceso de soldadura, las propiedades del metal base, el metal de aporte y las condiciones de la superficie. La medida de la soldabilidad está ligada a la determinación del carbono equivalente, que es un concepto que se utiliza para determinar la tendencia que puede tener un material a fisurarse durante o después de la soldadura y se calcula por medio de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4. Para el presente trabajo se tendrá en cuenta la Ecuación 1.

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Ecuación 1. CE según el código de soldadura AWS D1.1.

(Fuente: AWS D1.1, 2015)

$$CE = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{7Mo}{90} + \frac{Ni}{18}$$

Ecuación 2. CE por el método de Seferian.

(Fuente: Hidalgo, 2007)

$$CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr + Mo + V}{10} + \frac{Ni}{15}$$

Ecuación 3. CE por el método de Bradstreet

(Fuente: Sierra, 2018)

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

Ecuación 4. CE por el método de

(Fuente: Cevallos & Cineros, 2013)

1.1.2. Composición química del acero A588

Desde la norma ASTM A588 se extrae la composición química que clasifica al acero en función de los compuestos aleantes presentes en el mismo, en la Tabla 1.2 se observa los grados de acero según lo antes mencionado. Para este trabajo de titulación se utilizó un acero ASTM A 588 Grado A.

Tabla 1.2. Composición química del acero según norma ASTM A588

Elemento	Grado A	Grado B	Grado K
Carbono	0,19 máx.	0,20 máx.	0,17 máx.
Manganeso	0,80-1,25	0,75-1,35	0,50-1,20
Fósforo	0,03-máx.	0,03-máx.	0,03-máx.
Azufre	0,03 máx.	0,03-máx.	0,03-máx.
Silicio	0,30-0,65	0,15-0,50	0,25-0,50
Níquel	0,40 máx.	0,50 máx.	0,40 máx.
Cromo	0,40-0,64	0,40-0,70	0,40-0,70
Molibdeno	-	-	0,10 máx.
Cobre	0,25-0,40	0,20-0,40	0,30-0,50
Vanadio	0,02-0,10	0,01-0,10	-
Columbio	-	-	0,01-0,05

(Fuente: ASTM A588A588M - 15)

1.2. Proceso de soldadura GMAW

El proceso de soldadura GMAW es un proceso de soldadura con protección gaseosa en el cual el electrodo es un alambre metálico consumible y la protección se obtiene mediante

una atmósfera de gas suministrado externamente tal como se observa en la Figura 1.1. Los gases utilizados para protección incluyen gases inertes como el argón y el helio, en cuyo caso se denomina al proceso con las siglas MIG (Metal Inert Gas), o gases activos como el dióxido de carbono que se usa básicamente para materiales ferrosos como aceros al bajo y mediano carbono.

El proceso GMAW puede ser operado de forma manual, semiautomática o automática lo que le brinda versatilidad al proceso y en la industria se lo usa generalmente para soldar material de espesor delgado ya que se obtiene una soldadura con buena velocidad de deposición y apta para cualquier posición de soldadura. (Lincoln Electric , 2012)

Entre las ventajas más destacables del proceso se encuentra que se puede ajustar para soldar en cualquier posición, además de que se puede realizar soldaduras largas sin que existan empalmes entre los cordones de soldadura y que no se requiere de limpieza o eliminación de escoria lo que lo hace útil cuando se hacen varios pases en la misma unión.

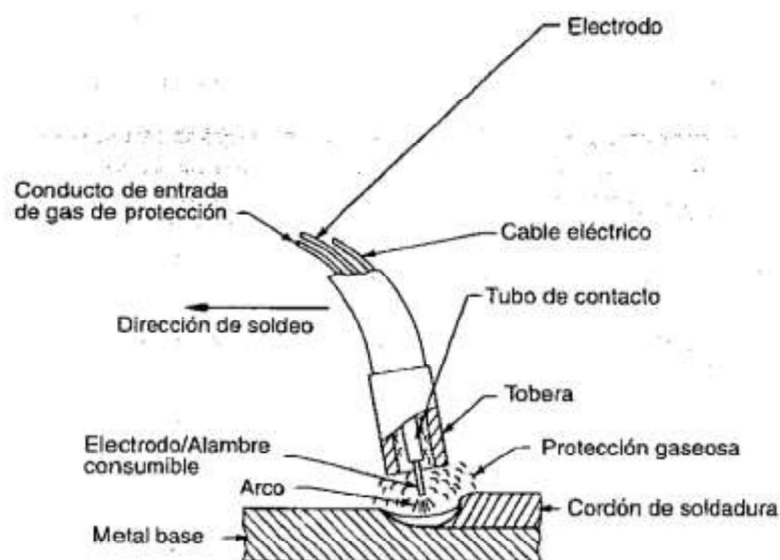


Figura 1.1. Elementos que componen la soldadura por arco con gas de protección.

(Fuente: Lincoln Electric, 2012)

1.2.1. Modos de transferencia del metal de aporte

Existen varios mecanismos mediante los cuales se transfiere el metal de aporte al material base durante la soldadura, los tipos principales de transferencia son: transferencia en cortocircuito, transferencia globular, transferencia axial tipo spray. El tipo de transferencia se determina de acuerdo con varios factores que influyen directamente. Entre ellos se tiene: magnitud y tipo de corriente de soldadura, diámetro, composición y extensión del electrodo, y el tipo de gas protector.

1.2.1.1. Transferencia por cortocircuito

Este tipo de transferencia se produce cuando hay contacto del alambre con el metal depositado. Este tipo de transferencia se obtiene cuando la tensión y la intensidad de soldadura son bajas por lo que se puede usar en varias posiciones como vertical y sobre cabeza y para espesores delgados. Los valores para este tipo de transferencia son: voltaje entre 16 a 22 voltios e intensidad de corriente de 50 a 150 A.

1.2.1.2. Transferencia globular

Este tipo de transferencia tiene por característica la formación de una gota relativamente grande de metal fundido en el extremo del alambre, esta gota se va formando hasta que por efecto de su propio peso cae al baño fundido. Los parámetros típicos son: voltaje de 20 a 35 voltios y corriente de 70 a 255 A.

1.2.1.3. Transferencia axial tipo spray

Este tipo de transferencia es de mayor energía que las anteriores y se forma con gotas iguales o menores al diámetro del electrodo. Los valores para este tipo de transferencia son: voltaje de 28 a 40 V, intensidad de corriente de 200 a 500 A y se puede conseguir únicamente con la utilización de gases inertes a diferencia de las transferencias globular y cortocircuito que funcionan adecuadamente con CO₂. Se puede aplicar sobre cualquier tipo de material, pero no en espesores delgados ni en cualquier posición de soldadura ya que tiene grandes tasas de deposición. (Lincoln Electric, 2019). En la Tabla 1.3 se resume los parámetros, el tipo de gas o mezcla de gases y las aplicaciones para cada tipo de transferencia.

Tabla 1.3. Cuadro Comparativo de los modos de transferencia.

Transferencia	Gas de protección	Parámetros de voltaje[V] amperaje[A]	Aplicación
Corto circuito	CO ₂ o Argón/ CO ₂	16/22 40/150	Espesores finos Pasadas de raíz en cualquier espesor Soldadura en todas las posiciones
Globular	CO ₂	20/35 70/255	Espesores medianos y gruesos Aceros al carbono Soldadura en posición horizontal solamente
Spray	Argón o Argón/ CO ₂	28/40 200/500	Aceros inoxidables Aluminio Soldadura en posición horizontal solamente

(Fuente: Lincoln Electric , 2012)

1.2.2. Parámetros del proceso de soldadura GMAW

Existen parámetros fundamentales que determinan las características de soldadura por lo tanto afectan también su calidad. Estos parámetros de soldadura se relacionan entre sí, por lo tanto, no son independientes ya que el cambio de uno de estos implica cambio sobre otras variables o parámetros.

Existen tres grupos de parámetros que son los preestablecidos, los parámetros primarios y los parámetros secundarios. Las variables preestablecidas o preseleccionadas son aquellas que se fijan antes de iniciar la soldadura y estas son el diámetro del alambre del electrodo, tipo de gas de protección, caudal de gas de protección, composición química del alambre. Las variables primarias son las que controlan el proceso, en el caso de la soldadura GMAW las variables primarias controlan la forma del cordón, la cantidad de material depositado y la estabilidad del arco. Los parámetros principales son:

1.2.2.1. Voltaje

El voltaje o tensión se mide en voltios y es regulable. Se transmite de manera regular desde la fuente al alambre y tiene una relación directa sobre la longitud del arco de soldadura ya que mientras mayor sea la tensión mayor será la longitud de arco.

1.2.2.2. Corriente

Esta variable se relaciona directamente con la velocidad de alimentación del alambre. Se puede establecer que mientras mayor sea la corriente mayor será la velocidad de alimentación de alambre ya que la fusión se producirá rápidamente y la tasa de deposición aumenta.

1.2.2.3. Velocidad de desplazamiento

Esta variable tiene efectos sobre la penetración. Cuanto menor sea la velocidad de desplazamiento mayor será la penetración, a mayor velocidad de desplazamiento se tendrá como resultado un cordón de soldadura irregular.

Están por último las variables secundarias que son las que no afectan de forma directa la forma del cordón, más bien actúan sobre las variables principales. Los más destacados son:

1.2.2.4. Stick-out

Se conoce al stick-out como la distancia desde la tobera hasta el extremo del alambre. Esta variable tiene efectos sobre la penetración de soldadura y sobre la calidad de la soldadura

ya que a mayor stick-out menor será la protección del gas y esto puede resultar en porosidad y contaminación excesiva.

1.2.2.5. Polaridad

En soldadura GMAW generalmente se utiliza polaridad inversa (DC+) ya que permite obtener un arco de soldadura estable con buena transferencia de metal de aporte y gran penetración. La polaridad directa (DC-) no se usa con regularidad ya que la tasa de deposición es mayor pero solamente con transferencia globular. Mientras que la corriente alterna hace que el arco sea inestable y tienda a extinguirse por lo que no se usa en MIG/MAG.

1.2.3. Gas de protección

El gas de protección para el proceso GMAW puede ser gas inerte, argón o helio, o un gas reactivo como el CO₂, también se puede usar una mezcla de ambos tipos de gases. En algunos casos y con el fin de agregarle características al cordón de soldadura se le puede agregar oxígeno e hidrógeno. La selección del gas de protección se basa en el material que se va a soldar y el tipo de transferencia de metal que se empleará para la soldadura. En el caso del dióxido de carbono, es ampliamente usado ya que sirve para aceros al carbono de baja aleación, y sobre todo se obtienen resultados aceptables en cuanto a penetración y geometría de cordón a un bajo costo. Además de que al trabajar con este gas se tiene cierta resistencia a las corrientes de aire si se trabaja al descubierto y se suele usar este gas para trabajar con electrodos de diámetro pequeño, de entre 0.8 a 1 mm de diámetro.

1.2.4. Electrodo

En GMAW los alambres que se usan son de diámetros pequeños desde 0.6 mm hasta 3.2mm y se suministran desde bobinas que se colocan directamente en el sistema de alimentación. Los alambres de acero reciben a menudo un recubrimiento de cobre que mejora el contacto eléctrico, la resistencia a la corrosión y ayuda a disminuir el rozamiento en los sistemas de alimentación. Por lo general el material de aporte debe ser similar en composición química a la del metal base. Algunos criterios que se deben tener en cuenta para selección de un alambre electrodo son:

- Metal base, sus propiedades mecánicas y composición del metal base
- El espesor y diseño de la junta
- Condiciones de servicio o especificaciones

El Laboratorio de Soldadura de la FIM-EPN dispone del alambre electrodo ER 70S – 6 que se usa para soldar aceros al carbono de baja aleación, la norma AWS A5.18 establece el sistema de identificación para este alambre, tal como se ve en la Figura 1.2. Este alambre electrodo utiliza CO₂ como gas de protección con polaridad inversa DC⁺ y composición de 0,06- 0,15 %C; 1,4-1,85 % Mn y 0,80- 1,15 %Si, 0,025 %P, 0,035 %S. (AWS A5.18-93, 1993)

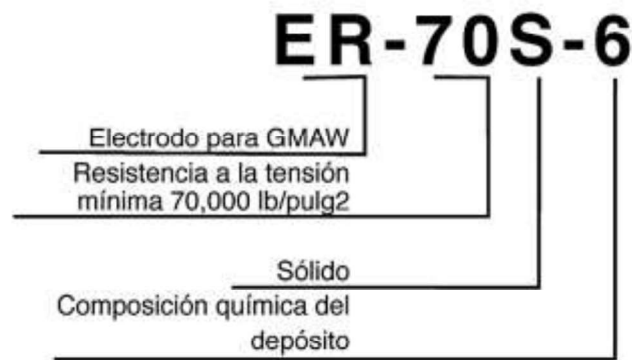


Figura 1.2. Denominación del alambre ER-70S-6 para GMAW.

(Fuente: Electrodo Infra, 2007)

En la Tabla 1.4 se tiene las especificaciones mecánicas mínimas para el alambre electrodo ER 70S – 6.

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas mínimas del electrodo ER 70S – 6.

Alambre	Resistencia la tensión MPa	Limite elástico MPa	Elongación %
ER 70S - 6	480	400	22

(Fuente: AWS A5.18-93)

1.3. Diseño de parámetros de Taguchi

El diseño de parámetros de Taguchi tiene su origen en la filosofía del ingeniero japonés Genichi Taguchi quien sostenía que la calidad de un producto debe ser medida en función de la pérdida que ese producto trae a la sociedad, dicho esto desde que inicia la fabricación hasta que culmina con su ciclo de vida útil. Por lo que plantea que el concepto de control de calidad con inspección y control del proceso no son suficientes y que solamente en las fases de diseño se pueden lograr los niveles más elevados de calidad.

El objetivo del diseño de parámetros es conseguir productos y procesos robustos frente a los factores de variabilidad, denominados ruido, y que son responsables de la desviación de los valores esperados en las características de los productos.

Hay ciertos criterios o definiciones importantes para entender la metodología de Taguchi. El primero es sobre los factores de control de un proceso que son los parámetros que pueden ser controlados en la fabricación o diseño de un producto. Se tiene también los factores de ruido que son los parámetros costosos o difíciles de controlar durante el proceso de manufactura y estos tienen que ver con agentes externos, variabilidad en la producción y deterioro del producto.

A los factores de control se los conoce simplemente como factores y son las variables que se controlan en el proceso de experimentación. A estos factores se les conoce también como variables del proceso o variables independientes. A su vez, estos factores solo pueden tener un número limitado de valores posibles, conocidos como niveles. La intención de Taguchi es seleccionar los niveles de los factores con criterios técnicos que minimicen el efecto de los factores de ruido sobre la respuesta del proceso.

1.3.1. Etapas de Taguchi

Esta metodología contempla tres etapas para el desarrollo de un producto:

- Diseño del sistema, donde se utilizan principios técnicos para la configuración del proceso
- Diseño de parámetros, donde se determinan los valores específicos de los parámetros del sistema
- Diseño de tolerancias, donde se determinan las mejores tolerancias para los parámetros del sistema

Según estas etapas el método establece los siguientes objetivos para el diseño de parámetros:

- a) Identificar factores que afectan la característica de calidad en cuanto a su valor y en cuanto a su variabilidad.
- b) Definir los niveles en que debe fijarse cada parámetro, con el fin de minimizar la variabilidad aportada por las variables
- c) Minimizar las variaciones respecto a un valor objetivo

1.3.2. Robustez

Se dice que un diseño es robusto cuando se logra que el producto o proceso cuente con el desempeño deseado y en donde se minimice el efecto de los factores no controlados. Esto se logra al encontrar la combinación de niveles de los factores que se pueden controlar y que los factores que no se pueden controlar o factores de ruido no afecten al proceso. Por

lo tanto, la robustez se refiere a hacer un producto o proceso insensible a factores no controlables.

Los estudios de robustez se clasifican con el criterio del tipo de variable de respuesta y una variable de respuesta puede ser de tres tipos:

- Entre más pequeña mejor: son variables cuya única exigencia es que no superen un valor máximo y entre más pequeño sea su valor resulta mejor para el proceso.
- Entre más grande mejor: son variables o características de las que se desea su valor sea mayor que un valor mínimo y que mientras más grande sea el valor de la variable es mejor para el proceso.
- Valor nominal es el mejor: estas son variables que precisan tener un valor específico y que no deben ser menores a una especificación inferior y tampoco superar una especificación superior.

1.3.3. Factores de ruido

Los factores de ruido que se pueden clasificar como ruido externo, ruido interno y factor de deterioro. El ruido externo se trata del medio y la carga operativa a la cual el proceso se desempeña, en el caso de la soldadura puede ser la humedad ambiental o errores del equipo. El ruido interno es la variación generada por la propia tecnología del proceso y a la diversidad de sus componentes y el deterioro son los efectos de degradación paulatina del proceso y sus componentes que pueden provocar fallas. (Reina Guzmán, 2013)

1.3.4. Arreglos ortogonales

Son diseños propuestos por el método de Taguchi que tienen la propiedad de ortogonalidad.¹ Un arreglo ortogonal reduce parte de los esfuerzos de diseño estadístico ya que trata de examinar paralelamente varios factores por lo que Taguchi sugiere la utilización de estos arreglos para hacer matrices que contengan los factores de ruido y parámetros de los experimentos. El análisis del arreglo ortogonal en Taguchi se usa para encontrar los parámetros adecuados para el diseño óptimo del proceso y permiten evaluar que tan robustos son los diseños de proceso o producto con respecto a los distintos factores de ruido que puedan existir. Esto se consigue ya que el método de Taguchi permite evaluar la contribución de cada uno de los factores que influyen en la etapa de diseño y estimar la mejor condición para un proceso o producto de manera que las características

¹ La propiedad de ortogonalidad se refiere a si en una matriz sus columnas son linealmente independientes, lo que se consigue si la multiplicación de dos columnas cualesquiera es igual a cero.

de una buena calidad puedan ser sostenibles. Estos arreglos son diseños factoriales², por ejemplo, un arreglo ortogonal L_8 tiene ocho experimentos y con él se pueden estudiar desde dos hasta siete factores con variación de dos niveles cada factor.

En el presente trabajo los experimentos se realizarán con un arreglo ortogonal L_9 que es uno de los arreglos más frecuentes, este arreglo permite realizar nueve experimentos y variar desde dos hasta cuatro parámetros o factores en tres niveles cada uno. Para este arreglo ortogonal se pueden tener cuatro factores A, B, C y D y cada uno de estos factores puede variar en tres niveles 1, 2 y 3 tal como se muestra en la Tabla 1.5:

Tabla 1.5. Arreglo ortogonal L_4 para corridas experimentales de tres factores con dos niveles cada uno.

Corridas experimentales	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

(Fuente: Soporte de Minitab 18, 2017)

En este caso si se quiere usar dos factores se deberá usar la columna del factor A y B, para tres factores serán las columnas de los factores A, B y C y en el caso de usar cuatro factores se usará las columnas de los factores A, B, C y D, respectivamente.

1.3.5. Razón señal/ruido

En el análisis del diseño de parámetros de Taguchi se propone una manera de medir la robustez de cada combinación de factores de control de manera que se busque maximizarla. Para esto está el cociente o la razón de señal/ruido que se calcula en cada combinación de los factores controlables y de acuerdo con el tipo de característica de calidad se define el índice estadístico de señal/ruido. (Gutiérrez, 2008)

Para Taguchi es más barato trabajar en el diseño de un producto y en sus procesos de fabricación que en el control de calidad. El diseño robusto de un producto minimiza los errores y disminuye la variabilidad en las características importantes del producto lo que reduce el costo.

Para cada tipo de estudio de robustez se tiene una razón de señal/ruido que se calcula con una ecuación que se detalla en la Tabla 1.6.

² Un diseño factorial es una clase de experimento que permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta. Y que permite estudiar las interacciones entre los factores al variar los niveles de todos los factores al realizar un experimento.

Tabla 1.6. Tipos de estudio de robustez.

Tipo de Característica	Razón de señal/ruido (S/R)
Mientras más pequeño es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$
Mientras más grande es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$
Valor nominal es lo mejor	$10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right)$

(Fuente: Gutiérrez, 2008)

Donde: n = tamaño de la muestra
 Y_i = i-ésimo dato
 S = desviación estándar

1.3.6. Gráfica de efectos principales

La gráfica de efectos principales se utiliza para examinar las diferencias entre las medias de relaciones de señal/ruido y muestran como cada factor afecta a la característica de respuesta que puede ser una propiedad mecánica o atributo del material. Cuando diferentes niveles de un factor afectan las características de un material de manera diferente se debe a que existe un efecto principal.

La diferencia que existe cuando hay un factor con varios niveles y se puede descubrir que un nivel aumenta la media en comparación con los otros es lo que se llama efecto principal. La Figura 1.3. muestra un ejemplo de estas gráficas en la que se debe tomar en cuenta dos patrones generales. En primer lugar, si la línea es horizontal o tiende a ser paralela al eje x entonces se considera que no hay efecto principal y que cada nivel del factor afecta la respuesta de la misma forma. Luego, si la línea no es horizontal entonces existe un efecto principal y los diferentes niveles del factor afectan la respuesta de forma distinta. Aquí se toma en cuenta que mientras más inclinada sea la pendiente de la línea, mayor será la magnitud del efecto principal del parámetro. Siendo así que, para el ejemplo de la Figura 1.3. el fertilizante ejerce el mayor efecto en la relación de señal/ruido, es decir que tiene un efecto mayor sobre la respuesta final del proceso mientras que el riego tiene la recta que más tiende a ser horizontal por lo que tuvo poco o ningún efecto en la relación de señal a ruido.

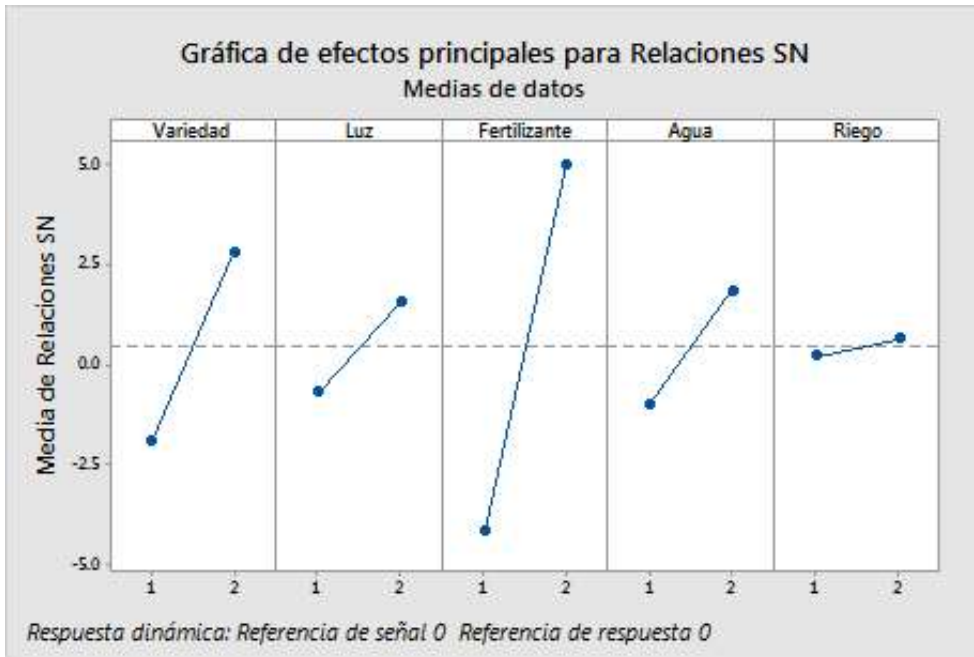


Figura 1.3: Gráfica de efectos principales de dos niveles para cinco parámetros.

(Fuente: Minitab , 2017)

2. METODOLOGÍA

El procedimiento seguido durante todo este trabajo de titulación se describe en la Figura 2.1., a continuación, se plantea la utilización del método de Taguchi, una herramienta que permite efectuar un número determinado de corridas experimentales para analizar diferentes parámetros que intervienen en el proceso de soldadura y el nivel que estos tienen sobre la calidad y propiedades de las juntas soldadas. Por lo que es importante determinar que parámetros o factores se modifican, asimismo los valores de los factores que se usarán para realizar el proyecto. Mediante un ensayo de composición química se verifica el uso de acero A588 grado A para efectuar el proceso de soldadura. Una vez realizadas las muestras de soldadura, se realizó la radiografía de las diferentes pruebas experimentales para detectar discontinuidades que no se puedan apreciar a simple vista. Luego, se obtuvieron las probetas que se usan en ensayos de tensión, dureza, Charpy y doblado que permiten obtener criterios y resultados sobre las propiedades mecánicas. También se realizaron ensayos metalográficos para conocer fases microestructurales de los cordones de soldadura, así como la forma y distribución de grano. Con todos estos resultados se puede obtener una caracterización completa de cada junta soldada.

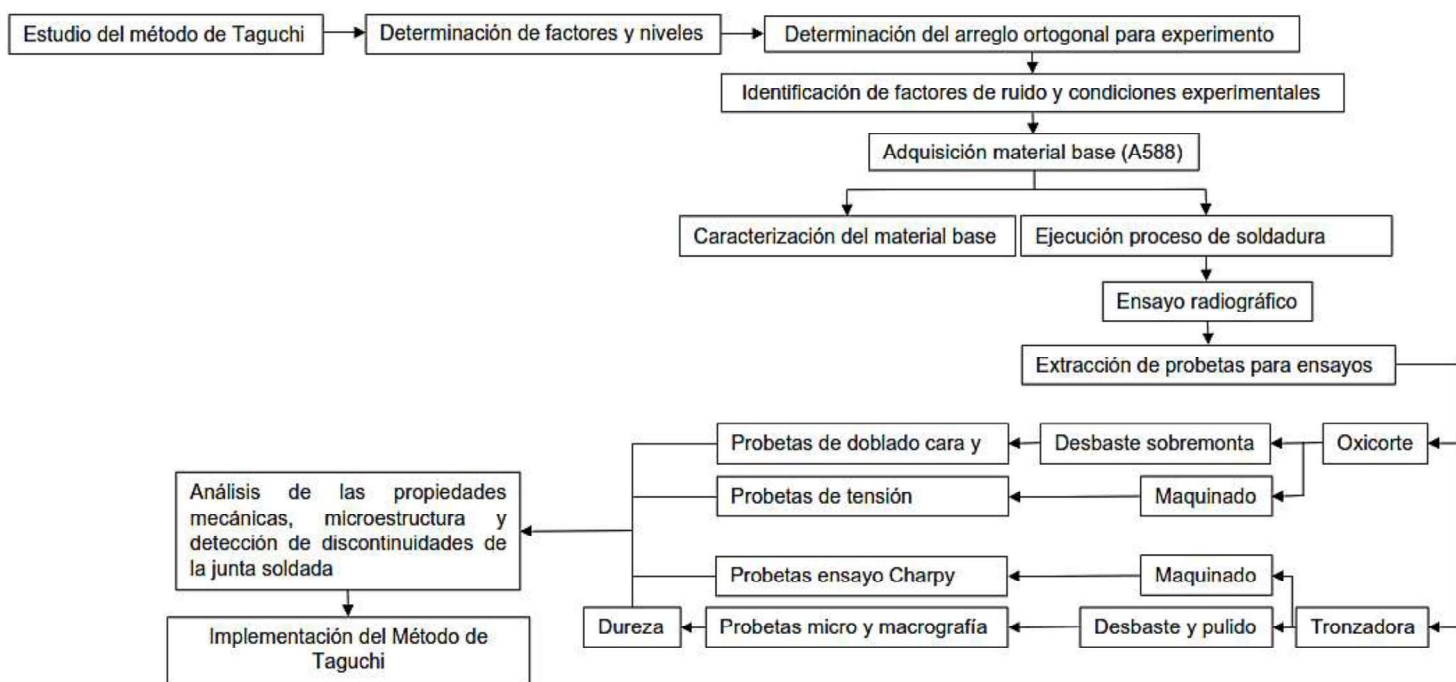


Figura 2.1. Diagrama de la metodología del proyecto.

(Fuente: Propia)

2.1. Metodología de Taguchi

2.1.1. Factores y niveles

Dentro de las etapas más importantes del método está la de determinar qué factores son los que se variarán en la experimentación, para esto se debe conocer cuáles son las variables más representativas en los procedimientos de soldadura GMAW, adicionalmente se deben plantear valores para los niveles de cada factor.

En el caso de este trabajo de titulación se plantea tomar como parámetros experimentales al voltaje ya que es una variable principal de la soldadura de la misma manera que la velocidad de avance, así mismo se decide variar a la velocidad de alimentación del alambre ya que se encuentra estrechamente ligada a la corriente. De esta manera se asegura obtener una configuración básica que contemple los parámetros más importantes. Cada uno de estos parámetros cuenta con tres valores diferentes o niveles tal como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Factores del proceso de soldadura GMAW y los niveles que se usaran en la experimentación.

Variables	Unidad	Nivel		
		1	2	3
Voltaje	V	20,0	25,0	30,0
Velocidad de avance	mm/min	200	133.33	100
Velocidad de alimentación del alambre	mm/min [pulg/min]	4445 [175]	5080 [200]	5715 [225]

(Fuente: Propia)

2.1.2. Diseño de arreglo ortogonal

Para el diseño de Taguchi se realizó un arreglo ortogonal que determina el número de corridas experimentales y la combinación de los niveles de cada factor. En este caso se tiene parámetros que son voltaje, velocidad de avance y velocidad de alimentación de alambre para cada soldadura tal como se muestra en la Tabla 2.2.

Cuando se determina los parámetros de soldadura se debe asignar tres valores a cada uno, estos valores se conocen como niveles. Es decir, se tiene un arreglo ortogonal que considere tres parámetros con tres niveles. En el método de Taguchi con la configuración mencionada se establecen dos opciones de arreglos ortogonales, un arreglo con nueve corridas experimentales y otro arreglo que consta de veintisiete corridas experimentales. En este caso se escoge el arreglo de nueve experimentaciones L_9 ya que se requiere

menos material y por lo tanto representa menor costo del material. Con la configuración de la Tabla 2.2. se procederá a desarrollar la soldadura de los especímenes diferentes.

Tabla 2.2. Matriz de experimentos basada en el arreglo ortogonal L9 de Taguchi.

Número de muestra	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

(Fuente: Propia)

2.2. Ensayos al material base

2.2.1. Ensayo de composición química

El análisis de composición química se realizó en el material base para determinar el grado de acero estructural ASTM 588 y además calcular el valor del Carbono Equivalente para establecer si se requiere de precalentamiento para el proceso de soldadura.

El material base se adquirió en una empresa dedicada a la elaboración de productos estructurales en acero por lo que es importante determinar la composición química para verificar que el material obtenido este de acuerdo con lo especificado en la norma. Todas las placas fueron extraídas de la misma plancha contadas en el mismo sentido, para el proceso de soldadura ambas placas fueron colocadas en sentido longitudinal.

Para este ensayo se usó una probeta de 20x20x12mm que se llevó al laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, donde se encuentra un equipo de espectrometría por chispa. Para este ensayo se toman dos mediciones de la muestra en diferentes puntos y se promedian los resultados. Se obtuvieron los porcentajes que tienen diferentes elementos en la composición del acero que se va a utilizar en la soldadura.

2.2.2. Ensayo de micrografía

El análisis de la microestructura es útil para determinar si un metal o aleación metálica satisface las especificaciones con relación a trabajos mecánicos anteriores o normas, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metalográficas y para controlar procesos industriales. La interpretación correcta de la microestructura del material puede llevar a la deducción de ciertas propiedades mecánicas y de forma consecuente se podrá hacer un acercamiento a las aplicaciones más adecuadas del mismo. (Guía de prácticas, Ciencia de Materiales II, 2014).

2.2.2.1. Procedimiento


Para obtener las probetas para micrografías se requiere del siguiente procedimiento

- Cortar transversalmente al cordón de soldadura hasta obtener las dimensiones de la probeta, se tomó en cuenta que la probeta contenga la zona afectada por el calor.
- A continuación, se debe realizar el montaje de las probetas en resina. Esperar a que la resina se seque por completo.
- Una vez montada la probeta en la mezcla de resina poliéster, acelerante y catalizador se procede al desbaste grueso de la superficie, lijas 150, 240, 400. Posteriormente se realiza el desbaste fino, con las lijas 600 y 1200.
- La siguiente etapa es el pulido, de igual manera se tiene dos etapas: pulido grueso (alúmina 1 μm), y pulido fino (alúmina 0,3 μm).
- Cuando la superficie de la probeta queda libre de rayaduras, finalmente se realiza el ataque químico con nital al 10% durante 6 segundos aproximadamente. Se debe lavar cuidadosamente con agua y alcohol al 99,8% de pureza y secar.
- Observar en el equipo de micrografía que consta del microscopio metalográfico y el software OLYMPUS Stream Essentials, en el cual se observa la microestructura de la muestra con aumentos de 100x y 500x. Se toman varias fotografías de la microestructura como resultado del ensayo.

2.2.2.2. Equipos


La preparación de muestras y ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la FIM-EPN. Las especificaciones técnicas de los equipos utilizados para los procesos de desbaste y pulido se detallan en las Tablas 2.3. y 2.4., respectivamente. La Tabla 2.5. muestra las especificaciones técnicas del microscopio disponible para la observación y obtención de metalografías.

Tabla 2.3. Equipo de desbaste grueso para la preparación de las probetas de metalografías.

Marca	BUEHLOR LTD	
Modelo	Metallurgical Apparatus	
Peso	75 kg	
Dimensiones	95x67x74 cm	
Voltaje	220 V	
Amperaje	6,2 A	


(Fuente: Sierra M. 2018)

Tabla 2.4. Especificaciones de la maquina pulidora semiautomática.

Marca	METKON	
Modelo	FORCIMAT/FORCIPOL 2V	
Voltaje	230 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Potencia	150 W/600 W	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Especificaciones de microscopio de metalografías.

Marca	OLYMPUS	
Modelo	GX41	
Voltaje	100-200/230-240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Dimensiones	47,5x47x24 cm	

(Fuente: Propia)

2.2.3. Ensayo de dureza

De acuerdo con la norma ASTM A370, el ensayo de dureza es un medio para determinar la resistencia a la penetración y ocasionalmente es empleado para obtener una aproximación rápida de la resistencia a la tensión, así como una idea de la resistencia al desgaste y la maquinabilidad del material. Para el ensayo de dureza existen varias escalas de medición y la más utilizada en aceros es Rockwell. En esta escala el valor de la dureza es obtenido determinando la profundidad de penetración de una punta de diamante o bola

de carburo de tungsteno dentro del espécimen bajo ciertas condiciones de carga fijadas. La escala de dureza Rockwell tiene tres clasificaciones, las mismas que dependen de la carga aplicada por la máquina y el tipo de indentador, tal como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Características de las escalas de dureza Rockwell.

Escala Rockwell	Símbolo de la dureza	Indentador	Carga kg
A	HRA	Cono	60
B	HRB	Bola de 1/6 de pulgada	100
C	HRC	Cono	150

(Fuente: Groover, 2007)

En la mayoría de los metales la dureza se relaciona estrechamente con la resistencia a la tensión ya que el método de ensayo de dureza se basa en la resistencia a la penetración. Por lo que existe una correlación entre la dureza Brinell con la resistencia última a la tensión. Dicha correlación puede ayudar a obtener un valor referencial de dureza para comparar los resultados obtenidos de cada muestra de junta soldada. En la Ecuación 5. se muestra la correlación, donde TS es la resistencia última a la tensión, K_h es una constante de proporcionalidad, esta constante toma el valor de 3,45 si TS esta expresada en MPa, y tiene el valor de 500 si TS se expresa en [lb/pulg²]. (Groover, 2007).

$$TS = K_h \times HB$$

Ecuación 5. Correlación resistencia última a la tensión-dureza

(Fuente: Groover, 2007)

Para este caso con esta correlación y a partir del valor de resistencia última a la tensión que se obtiene de la norma ASTM A588 se puede estimar el valor de la dureza teórica del acero que servirá para comparar con los resultados de dureza de las juntas soldadas. La Ecuación 6 muestra el valor de la dureza teórica mínima del acero A588.

$$HB = \frac{485}{3.45} = 140,58 HB \approx 78 HRB$$

Ecuación 6. Cálculo de la dureza teórica mínima del acero A588.

2.2.3.1. Preparación de probetas

Para este ensayo se utilizaron las mismas probetas empleadas en el ensayo de micrografías. Para resultados confiables, las probetas deben tener sus dos caras paralelas y además el material estar libre de resina.


2.2.3.2. Procedimiento

- En la pulidora semiautomática colocar las probetas y trabajarlas hasta que tengan sus dos caras paralelas y planas.
- En el durómetro girar la perilla del durómetro en sentido horario para seleccionar la escala con la que se va a trabajar. Además, colocar el indentador según se haya escogido la escala.
- Girar la perilla horizontal en sentido horario, para que la ascienda la probeta hasta que sea tocada por el indentador para encerrar el equipo.
- Nuevamente, girar la perilla horizontal para que la aguja del marcador recorra tres vueltas completas.
- Girar la manilla inferior derecha para cargar la máquina y esperar que el equipo se estabilice.
- Para obtener el valor de la dureza, finalmente descargar la máquina regresando la manilla inferior derecha lentamente,

2.2.3.3. Equipo

El ensayo de dureza fue realizado en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la FIM-EPN. En la Tabla 2.7 se detallan las especificaciones del Durómetro Rockwell.

Tabla 2.7. Especificaciones de durómetro Rockwell

Marca	HARDROCKER	
Modelo	HR-150 ^a	
Capacidad de carga	60, 400, 150 kgf	
Indentadores	Punta de acero de 1/16 pulg / Cono de diamante	

(Fuente: Propia)

2.3. Procedimiento de Soldadura

El procedimiento de soldadura se llevó a cabo en el Laboratorio de Soldadura de la FIM-EPN. Para la ejecución de la soldadura se necesita del arreglo ortogonal que muestra los valores de los parámetros de soldadura que se usaron para cada una de las nueve corridas experimentales. Dicho arreglo se muestra en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Configuración obtenida del arreglo ortogonal L9 para la realización de los experimentos.

MUESTRA	Voltaje V	Velocidad de avance mm/min	Alimentación de alambre mm/min [pulg/min]
1	20	200	4445 [175]
2	20	133,33	5080 [200]
3	20	100	5715 [225]
4	25	200	4445 [200]
5	25	133,33	5080 [225]
6	25	100	5715 [175]
7	30	200	4415 [225]
8	30	133,33	5080 [175]
9	30	100	5715 [200]

(Fuente: Propia)

Por otra parte, se realiza una soldadura adicional con parámetros de soldadura recomendados, estos parámetros se detallan en la Tabla 2.9; esto con el fin de comparar los resultados de las pruebas experimentales con un proceso preestablecido.

Tabla 2.9. Parámetros de soldadura del espécimen de prueba

Espécimen	Voltaje V	Velocidad de avance mm/min	Velocidad alimentación del alambre pulg/min [mm/min]
Muestra 1	24,0	115	300 [7620]

(Fuente: Propia)

2.3.1. Preparación de placas

Las placas para la soldadura fueron adquiridas mediante corte por cizalla con las dimensiones de 400X200X12mm. El código AWS D1.1 en la sección IV establece que se permite hacer bisel para el espesor de 12 mm, el biselado de las placas fue realizado con amoladora para mejorar el acabado superficial, la distancia entre placas fue de 3 mm, asegurando la raíz del cordón, quedando una junta de soldadura como se muestra en la Figura 2.2.:

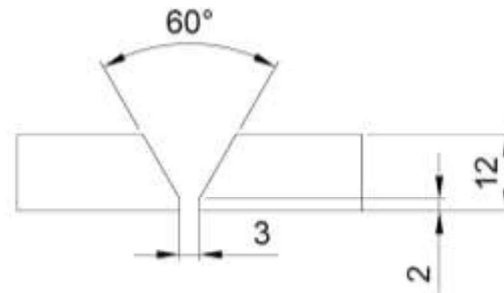


Figura 2.2. Diseño de la junta para soldadura con medidas en milímetros.

(Fuente: Propia)

2.3.2. Equipo

En la tabla 2.10. se detallan las especificaciones técnicas del equipo de soldadura disponible en el Laboratorio de Soldadura de la FIM-EPN utilizado en este proyecto de titulación.

Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de la máquina de soldadura.

Marca	Lincoln Electric	
Modelo	Invertec V350-Pro	
Rango de salida	5-425 A	
Frecuencia	50-60 HZ	
Voltaje de entrada	200-575 V	
Peso neto	37,5 kg	
Dimensiones	376x338x709mm	
Rango de entrada	32 A	

(Fuente: Lincoln Electric, 2019)

2.4. Ensayos a las juntas soldadas

2.4.1. Ensayo radiográfico

La radiografía se trata de una fotografía sombreada y volumétrica del cordón de soldadura que es obtenida por transferencia de radiación electromagnética, en la cual unas zonas aparecen más ennegrecidas que otras según la intensidad de rayos X que reciben. De esta manera se tiene que las regiones con menor densidad permiten fácilmente la penetración de los rayos y aparecen más oscuras en el negativo si se las compara con las regiones de mayor densidad que absorben más radiación. Así es como un poro o grieta aparece como

un área más oscura en la fotografía. Aunque la radiografía industrial no sirve para medir directamente una propiedad mecánica es útil en la detección y localización de defectos en la soldadura.

2.4.1.1. Preparación de probetas

La preparación de las placas soldadas consta de identificar correctamente con códigos y numeración cada una de las muestras y tomar medidas de la longitud para determinar el tamaño de la película que se debe usar. En la Figura 2.3. se observa las dimensiones de las placas luego del proceso de soldadura.



Figura 2.3. Espécimen de soldadura siendo medido para la preparación del ensayo de radiografía.

(Fuente: Propia)

Se toman medidas de raíz y sobremonta de cada cordón de soldadura con la ayuda de una galga y estos valores se promedian. El promedio de la sobremonta y el promedio de la raíz se suman junto al valor del espesor, con esto se obtiene un espesor total que será el que se va a irradiar y con el cual se determina el valor de voltaje y corriente.

Con los valores obtenidos anteriormente se determina el tiempo t_0 que sirve para determinar el tiempo de exposición de cada muestra. Esto se lo hace con la ayuda del diagrama de operación del equipo de la Figura 2.4.

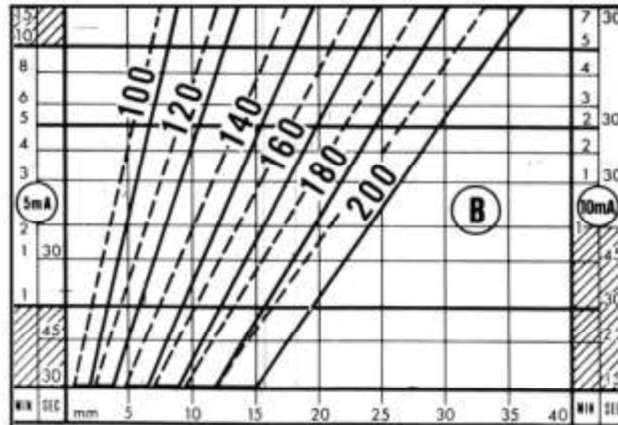


Figura 2.4. Diagrama de operación del equipo de radiografía.

(Fuente: Guía de Prácticas LAB-END, 2016)

Con el valor t_0 se calcula el tiempo de exposición basándose en la Ecuación 7.

$$t_{exp} = t_D \times f_P \times f_\delta \times f_d \times f_v$$

Ecuación 7. Ecuación de cálculo del tiempo de exposición radiográfica.

(Fuente: Guía de Prácticas LAB-END, 2016).

Donde:

t_D = tiempo según el diagrama de operación de la máquina de rayos X

f_P = 0.2 factor de corrección de la película

f_δ = 0.5 factor de corrección de la distancia

f_d = 1 factor de corrección por densidad

f_v = 1 factor de corrección por varios,

De esta manera quedan los tiempos de exposición para cada cordón de soldadura como se muestra en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Tiempo de exposición de cada espécimen.

Probeta	Espesor Total (mm)	Kv	min	Seg
P1	16,60	140	3	18,00
P2	17,50	140	3	29,40
P3	17,50	140	3	29,40
P4	16,50	140	3	18,00
P5	17,50	140	3	29,40
P6	16,50	140	3	18,00
P7	14,60	140	3	1,20
P8	15,00	140	3	12,60
P9	17,50	140	3	29,40

(Fuente: Propia)

2.4.1.2. Procedimiento

- Se determinan los indicadores de calidad de imagen que son hilos que ayudan a obtener imágenes claras y bien definidas. Se los conoce como IQIs y existen varios sets de hilos según el espesor que se vaya a radiografiar. En la Tabla 2.12. se detallan los diámetros de hilos.
- Para identificar la película radiográfica se debe colocar el indicador de calidad seleccionado junto con las letras de plomo pequeñas. Este conjunto se debe ubicar encima de la raíz del cordón de soldadura, sin que altere la visión de este. Además, tomar en cuenta que la película debe abarcar todo el cordón de soldadura y la ZAC.
- Colocar la probeta debajo del tubo de rayos catódicos a cierta distancia que se había establecido. Encender el equipo de radiografía, con los parámetros de voltaje y amperaje y dejar actuar la radiación el tiempo de exposición establecido.
- Una vez se obtiene la película, realizar el proceso de revelado.
- El proceso de revelado consiste en: llevar la película a un cuarto oscuro carente de luz blanca para evitar que la película se vea. Luego, retirar el capuchón para sumergirla en los cuatro baños, el primer baño dura 5 minutos en el líquido revelador, luego se sumerge en un baño de parada en agua de 1 minuto, después se sumerge la película en el líquido fijador, con una duración de 10 minutos, finalmente el baño de limpieza en agua durante 1 minuto más, posteriormente a este proceso las películas necesitan un tiempo de secado de 2 a 3 horas.
- Una vez que la película se haya secado, evaluarla exponiéndola a luz fluorescente, para observar las discontinuidades del material ensayado.

Tabla 2.12. Tamaños de los IQI de hilo.

Diámetro del hilo, mm. [pulg]			
Set A	Set B	Set C	Set D
0,08 [0,0032]	0,25 [0,010]	0,81 [0,032]	2,50 [0,100]
0,10 [0,0040]	0,33 [0,133]	1,02 [0,040]	3,20 [0,125]
0,13 [0,0050]	0,40 [0,016]	1,27 [0,050]	4,06 [0,160]
0,16 [0,0063]	0,51 [0,020]	1,60 [0,063]	5,10 [0,200]
0,20 [0,0080]	0,64 [0,025]	2,03 [0,080]	6,40 [0,250]
0,25 [0,0100]	0,81 [0,032]	2,50[0,100]	0,32 [8,000]

(Fuente: AWS D1.1, 2015)

2.4.1.3. Equipos

En Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la FIM cuenta con un equipo de radiografía industrial, el cual consta de un panel de control y un tubo de rayos catódicos. Este equipo se empleó para realizar el ensayo a diez placas soldadas, en la Tabla 2.13. se detallan las especificaciones técnicas de este equipo.

Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del equipo de radiografía.

Modelo	Balthographe BF 200/10
Alimentación de la red	10 A -50 Hz – 220 V – 2500 VA
Alto voltaje mínimo útil	40 kV
Alto voltaje máximo útil	200 kV reales a 10 mA
Angulo de haz	40°

(Fuente: Almeida, G. & Álvarez, G., 2017)

2.4.2. Ensayo de doblado

El ensayo de doblado es importante puesto que permite apreciar de manera próxima la capacidad de deformación de un material al someterse a cargas de flexión sin agrietarse. Consiste en aplicar carga de flexión en el centro de la probeta de soldadura con el objetivo de observar si hay discontinuidades superficiales en el cordón.

2.4.2.1. Probetas

El código AWS D1.1 establece las dimensiones y el maquinado de doblado de cara y de raíz, tal como se muestra en la Figura 2.5. El ensayo debe realizarse doblando la probeta con un dado en forma de U. Se evalúa visualmente la superficie convexa de la muestra para discontinuidades y se aplican los siguientes criterios de aceptación.

No se deben presentar discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones: 3mm en cualquier dirección, 10mm en la suma de las discontinuidades de dimensiones de entre 1 a 3 mm y 6mm a las fisuras de esquina excepto cuando estas fisuras sean el resultado de una inclusión de escoria visible u otra discontinuidad debido a la fusión, entonces debe aplicarse un máximo de 3mm. Si se presenta una fisura de esquina sin haber evidencia de inclusiones de escoria u otra discontinuidad debido a la fusión se debe descartar la probeta y ser reemplazada con otra de la soldadura original. (AWS D1.1, 2015)

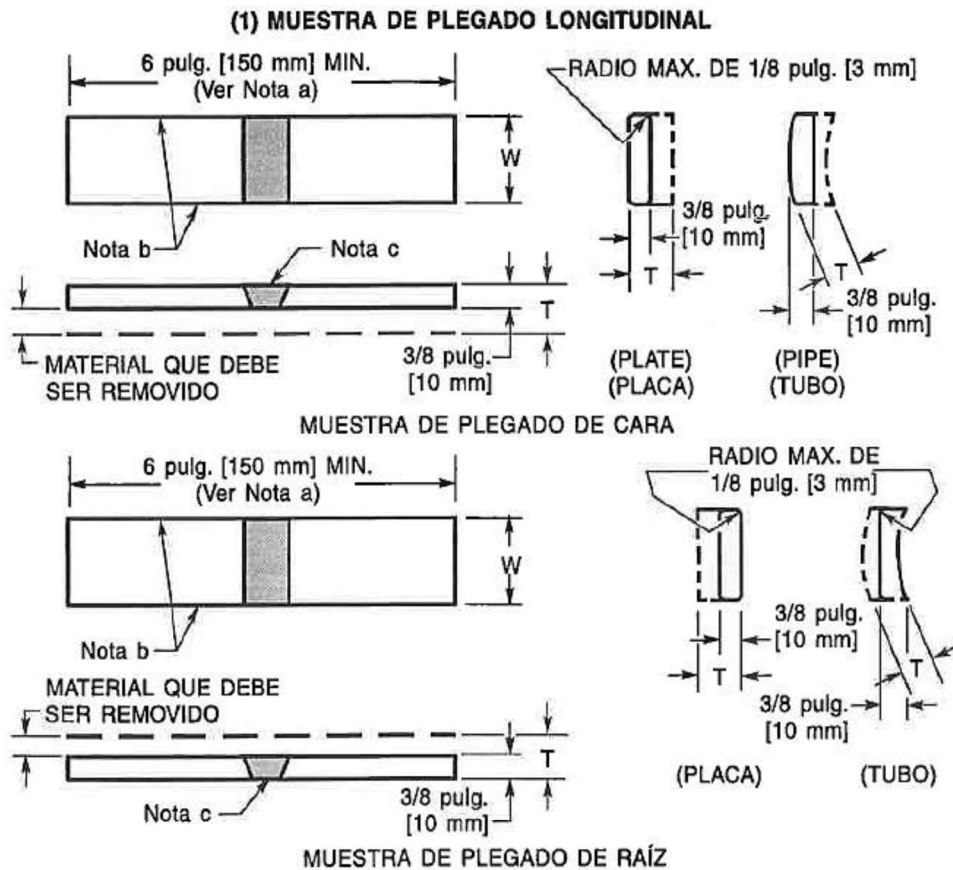


Figura 2.5. Dimensiones para las probetas de doblado de cara y de raíz

(Fuente: AWS D1.1, 2015)


2.4.2.2. Procedimiento

- Se preparan las probetas para el ensayo, además del dimensionamiento indicado en la Figura 2.5., además se debe pulir la superficie a examinar, en este caso, la sobremonta y la raíz, respectivamente.
- Situar la probeta en el espacio hueco de la dobladora, quedando centrada la parte del cordón de soldadura respecto al dado en U.
- Aplicar carga a la probeta hasta que la misma tome la misma forma del dado.
- Retirar el émbolo para extraer la probeta, y examinar visualmente la misma.

2.2.4.3. Equipo

Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Soldadura de la FIM-EPN, para ejecutar el mismo se dispone de una dobladora hidráulica cuyas características se muestran a continuación en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Especificaciones técnicas de la dobladora hidráulica.

Modelo	Proyecto de tesis	
Presión máxima	2000 psi	
Potencia del motor	2 HP	
Velocidad de giro del motor	1720 rpm	
Frecuencia	60 Hz	

(Fuente: Sierra, M., 2018)

2.4.3. Ensayo de tensión

Se denomina tensión al esfuerzo interno al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto y que tienden a estirarlo. Este ensayo permite obtener la resistencia a la tensión e información acerca de la ductilidad de la junta soldada bajo esfuerzos de tensión axiales.

2.4.3.1. Probetas

Para este ensayo se dimensionó las probetas de acuerdo con las especificaciones del código de soldadura AWS D1.1 tal como se aprecia en la Figura 2.6., en la Figura 2.7 se tiene el detalle de las dimensiones de la probeta según el espesor del material base, que en para este trabajo tiene un espesor de 12 mm.

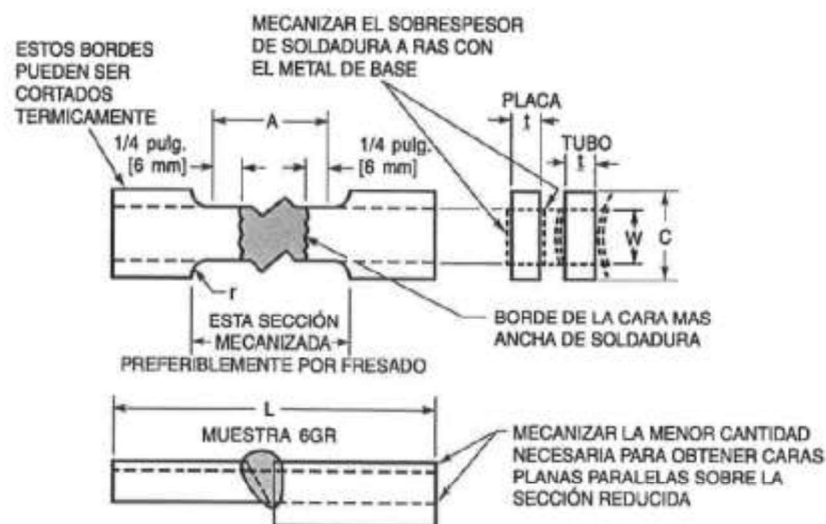


Figura 2.6. Probetas de ensayo de tensión por sección reducida según AWS.

(Fuente: AWS D1.1, 2015)

Dimensiones en pulgadas [mm]			
	Espesor de la Placa de Ensayo, T_p		
	$T_p \leq 1$ pulg. [25 mm]	1 pulg. [25 mm] < $T_p < 1\text{-}1/2$ pulg. [38 mm]	$T_p \geq 1\text{-}1/2$ pulg. [38 mm]
A—Longitud de la sección reducida	Cara mas ancha de la soldadura + 1/2 pulg. [12 mm], 2-1/4 pulg. [60 mm] min.		
L—Longitud total, min. ^a	Segun lo requerido por el equipo de ensayo		
W—Ancho de la sección reducida ^{b,c}	3/4 pulg. [20 mm] min.	3/4 pulg. [20 mm] min.	3/4 pulg. [20 mm] min.
C—Ancho de la sección de agarre ^{c,d}	W + 1/2 pulg. [12 mm] min.	W + 1/2 pulg. [12 mm] min.	W + 1/2 pulg. [12 mm] min.
t—Espesor de la muestra ^{e,f}	T_p	T_p	T_p/n (Nota f)
r—Radio de filete, min.	1/2 pulg. [12 mm]	1/2 pulg. [12 mm]	1/2 pulg. [12 mm]

Figura 2.7. Dimensiones de las probetas en función del espesor de la placa de material base.

(Fuente: AWS D1.1, 2015)

2.4.3.2. Procedimiento

- Disponer de las probetas para el ensayo según las dimensiones especificadas en la AWS D1.1, en este caso para el ensayo de tensión las probetas fueron extraídas de cada muestra con oxicorte, para luego ser mecanizadas en la Metalmecánica San Bartolo de la EPN, para obtener las dimensiones requeridas.
- Colocar la probeta en la máquina universal de ensayos y sujetarlas con las mordazas tipo cuña y verificar posición inicial de la máquina.
- Programar la máquina con los parámetros adecuados para realizar el ensayo.
- Encender la máquina, primero encerrar la carga y a continuación iniciar el ensayo.

2.4.3.3. Equipo

Este ensayo fue realizado en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) perteneciente a la FIM-EPN. El equipo para el ensayo es la máquina universal de ensayos. Las especificaciones se muestran en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Especificaciones técnicas de la máquina del ensayo de tensión.

Marca	Tinius Olsen
Modelo	Super L
Dimensiones	1016x915x788 mm
Capacidad de carga	3000 kN

Software	NAVIGATOR	
----------	-----------	--

(Fuente: Propia).

2.4.4. Ensayo de Charpy

El ensayo Charpy mide la tenacidad relativa de un material, es decir, su capacidad de absorber energía violenta antes de fracturarse. Se trata de un ensayo de impacto dinámico, en el cual por efecto de un golpe se rompe una probeta normalizada y se mide la energía absorbida al romperse dicha probeta.

En este ensayo la probeta está apoyada como una viga simple. La ranura de la probeta es un concentrador de esfuerzos geométrico por este motivo gran parte de la energía absorbida se acumula en la superficie inmediatamente adjunta a la ranura. (Guía de prácticas, Ciencia de Materiales II, 2014)

La probeta para el ensayo Charpy es una pieza de medidas 10x10x55 mm ranurada con una muesca en V. Las dimensiones de la probeta se muestran en la Figura 2.8.

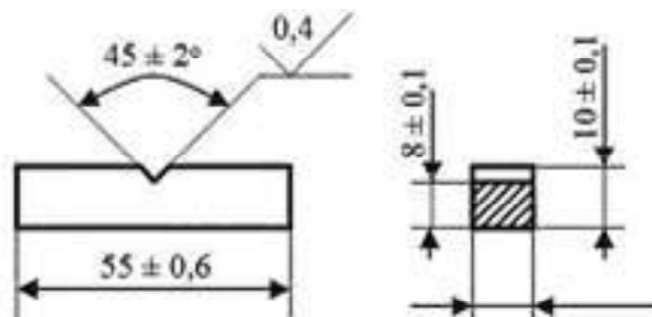


Figura 2.8. Dimensiones para la probeta del ensayo Charpy.

(Fuente: AWS B4.0, 2016)

2.4.4.1. Procedimiento

- La probeta fue extraída de la muestra, en una primera etapa con corte con tronzadora, para luego ser mecanizada en la Metalmecánica San Bartolo de la EPN hasta obtener las dimensiones requeridas, la muesca fue realizada en la junta soldada, puesto que se analizará la tenacidad relativa de la misma.

- Colocar la probeta en la máquina de tipo péndulo del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la FIM-EPN
- Tomar datos de cada probeta y después compararlos.

2.4.4.2. Equipo

El ensayo fue realizado en la máquina tipo péndulo del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la FIM-EPN, las especificaciones de muestran en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16. Especificaciones técnicas de la máquina de impacto tipo péndulo.

	Equipo	Charpy
	Marca	Tinius Olsen
	Capacidad	264 ft/inch

(Fuente: Propia)

2.4.5. Ensayo metalográfico

El ensayo metalográfico o de micrografía de los cordones de soldadura permite apreciar la microestructura en la zona afectada por el calor tanto como en el material de aporte. En la Figura 2.9. se observa una probeta lista para ser ensayada.



Figura 2.9. Probeta lista para realizar el ensayo de metalografía.

(Fuente: Propia)

2.4.6. Ensayo de dureza

EL ensayo de dureza se realiza en las mismas probetas utilizadas para del ensayo metalográfico de los cordones de soldadura. Esta vez se requiere hacer dos barridos de mediciones que contemplen el material base, la zona afectada por el calor y el cordón de soldadura en si compuesta por el material de aporte para cada una de las muestras.

Este ensayo se realiza con el objeto de contemplar la afectación que existe al variar los parámetros de soldadura en la dureza superficial en las zonas mencionadas anteriormente. Para este ensayo se realiza el mismo procedimiento y equipo descritos en la sección 2.2.3.

2.5. Procedimiento de análisis de método de Taguchi en Minitab 18

Una vez obtenidos los resultados de todos los ensayos realizados a las probetas se procede a ingresar la información obtenida al Minitab 18. Dicho software es adquirido gracias a que se puede obtener en la plataforma de la Escuela Politécnica Nacional que cuenta con licencias académicas para los estudiantes y profesores que requieran ya que este programa es especialista en estadística descriptiva y ayuda en los cálculos necesarios para el análisis de resultados. Para esto se debe crear la matriz estandarizada L_9 debido a que se van a analizar tres factores con tres variaciones tal como se indica en la Tabla 2.8.

En la Figura 2.10. se indica el paso a paso para la creación de del diseño de Taguchi en el software ya que se debe ingresar de la siguiente manera: **Estadística > DOE > Taguchi > Crean diseño de Taguchi**. Con lo cual a continuación se despliega el tipo de diseño que se ha definido anteriormente.

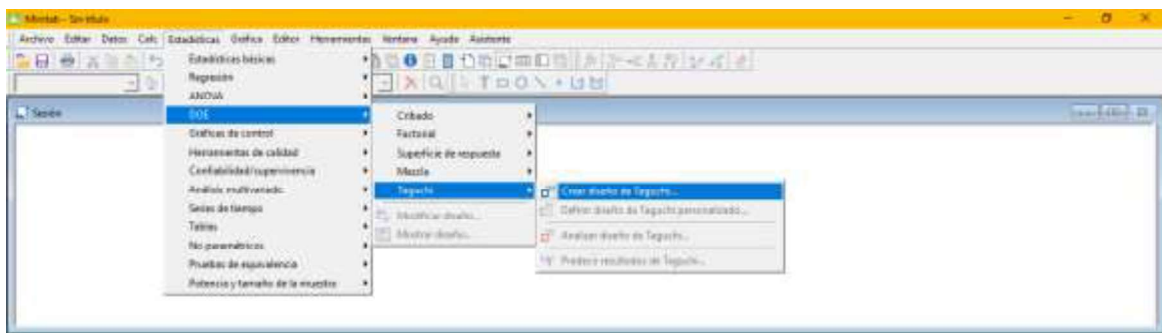


Figura 2.10. Pasos para crear un diseño de Taguchi en Minitab 18.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.11. se tiene la ventana donde se despliegan las diferentes opciones del tipo de diseño de Taguchi, donde se seleccionan el número de factores y niveles

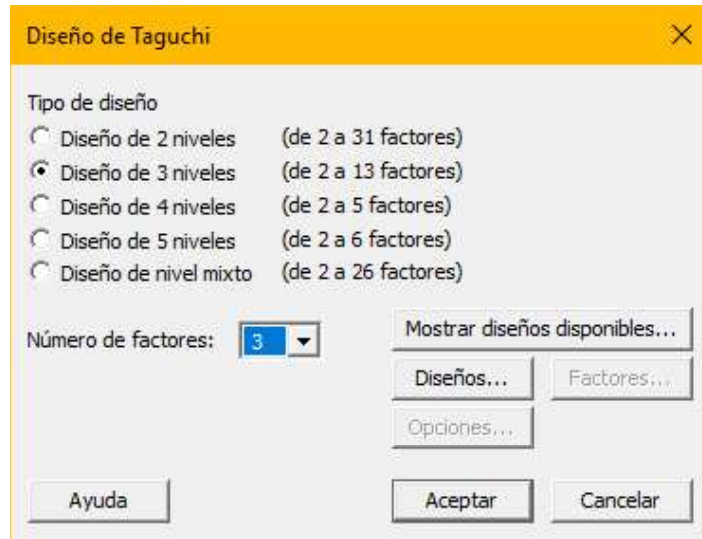


Figura 2.11. Selección de factores y de niveles en el software.

(Fuente: Propia)

Se selecciona la opción Diseños donde se puede escoger el número de corridas experimentales disponibles para la matriz seleccionada, tal como se muestra en la Figura 2.12.

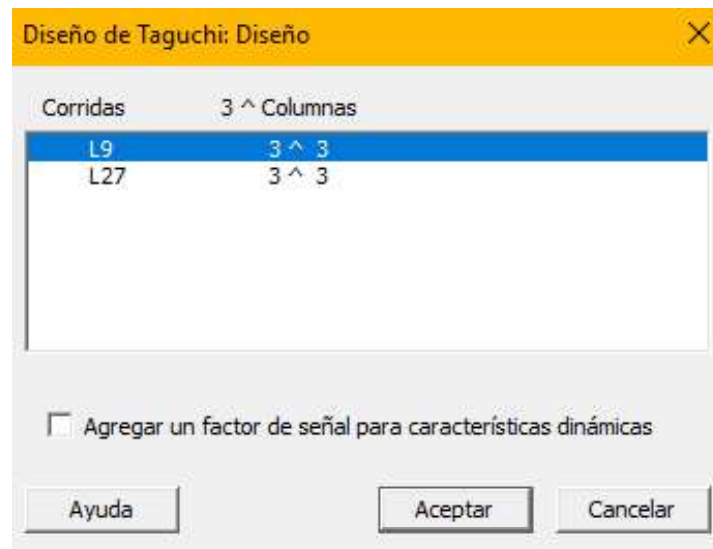


Figura 2.12. Diseños disponibles para el caso de tres factores con tres niveles en un diseño de Taguchi.

(Fuente: Propia)

En la pestaña de Factores se procede a llenar los campos de Nombre, donde irán los nombres de los parámetros que se van a variar, y también se llenan los valores de nivel donde se colocan los valores seleccionados para cada parámetro separado con un

espaciado. Se debe aceptar y aparecerá el diseño en la hoja de trabajo dentro del Minitab. Este paso se puede observar en la Figura 2.13.

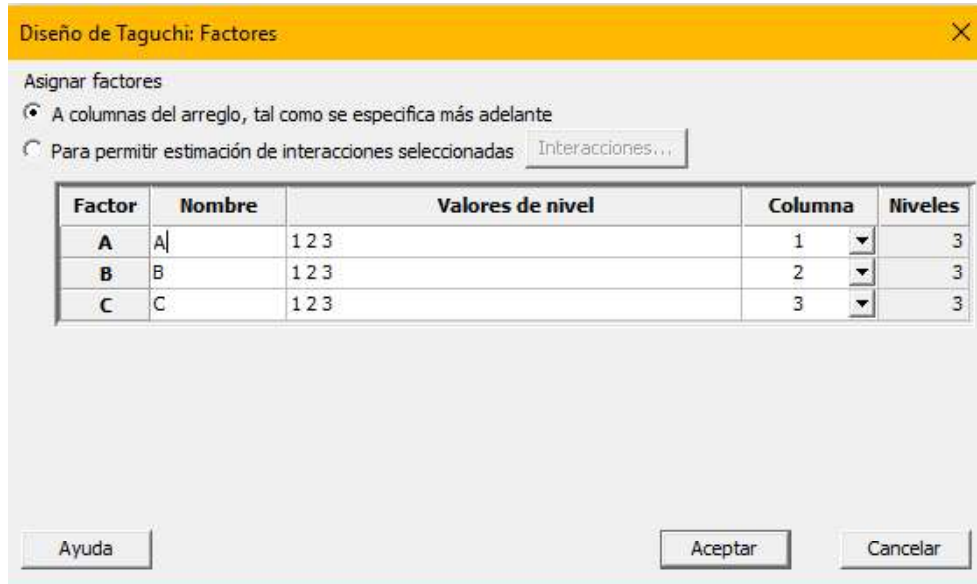


Figura 2.13. Asignación de factores y los valores de los niveles.

(Fuente: Propia)

Dentro de la Figura 2.13. se observa lo siguiente: las columnas C1, C2 y C3 muestran las combinaciones del diseño experimental. Las columnas C4, C5 y C6 se llenan con los datos obtenidos de los ensayos mecánicos en doblado, tensión y de impacto. La Tabla 2.17. muestra como quedan registrados los datos en el Minitab.

Tabla 2.17. Tabla expuesta en la hoja de trabajo con el arreglo ortogonal junto a los resultados obtenidos de los diferentes ensayos mecánicos.

Voltaje V	Velocidad avance mm/min	Alimentación de alambre pulg/min	Dureza HRB	Tensión MPa	Charpy J
20	200	175	90.6	481.2	70.33
20	133	200	86.4	565	131
20	100	225	85	520.35	151
25	200	200	86	559.25	147
25	133	225	82.5	556.7	174.66
25	100	175	82.2	539.45	135.2
30	200	225	82.8	495.35	120.33
30	133	175	80.2	517.7	134.67
30	100	200	79.2	528.65	129.33

(Fuente: Propia)

Se procede a escoger las características del proceso que interactúan para determinar el diseño del experimento en: **Estadísticas > DOE > Taguchi > Definir diseño de Taguchi personalizado**. Se abre la ventana de la Figura 2.14. donde se procede a ubicar los parámetros principales en la zona Factores y se selecciona Ningún Factor de señal.

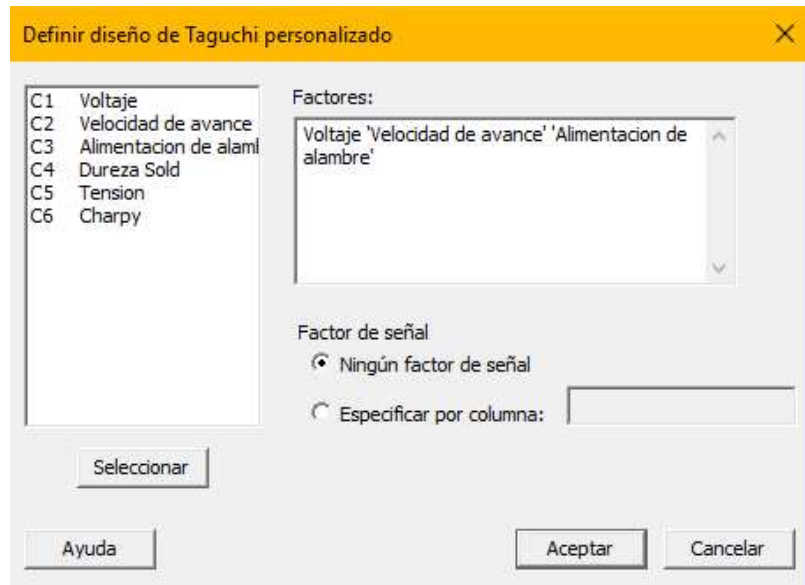


Figura 2.14. Definición del diseño de Taguchi.

(Fuente: Propia)

La Figura 2.15. muestra el proceso de selección para realizar el análisis del experimento, así: **Estadísticas > DOE > Taguchi > Analizar diseño de Taguchi**

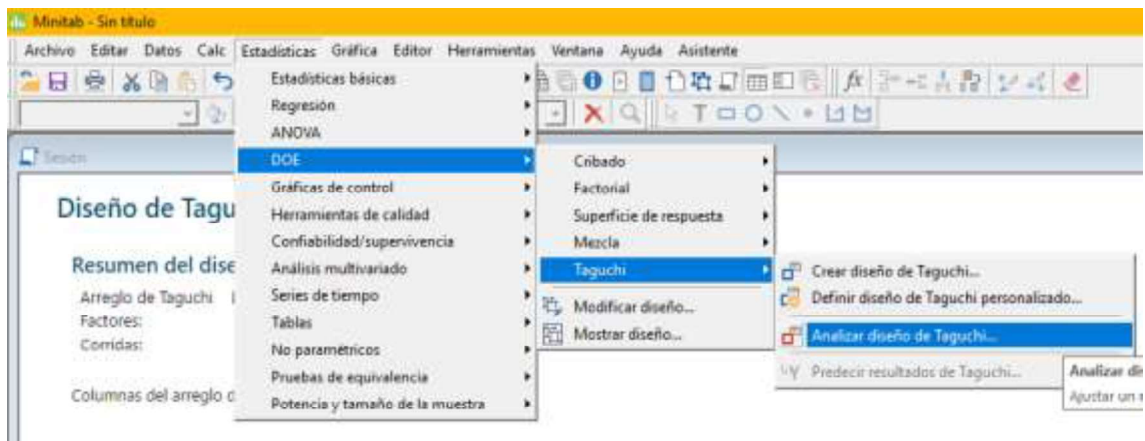


Figura 2.15. Pasos para realizar el análisis del diseño de Taguchi.

(Fuente: Propia)

Se selecciona las propiedades mecánicas en datos de respuesta y se procede a darle a cada una de las pestañas para configurar el experimento. Este paso se puede observar en la Figura 2.16.



Figura 2.16. Determinar los datos de respuesta según la propiedad que se quiera analizar.

(Fuente: Propia)

En Graficas se deben seleccionar las gráficas de efectos principales, para generar los gráficos de señal a ruido y de los efectos de la media en el diseño experimental, este paso se observa en la Figura 2.17.

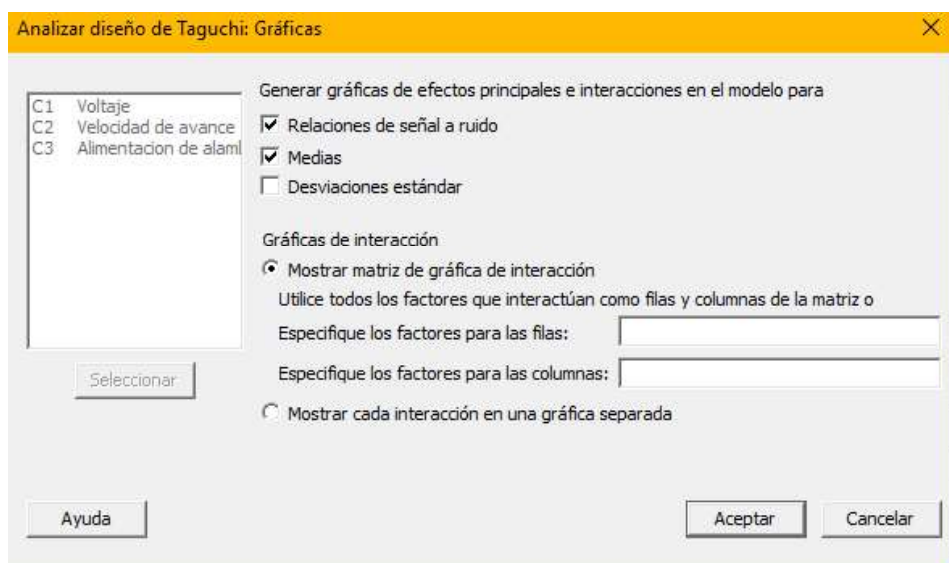


Figura 2.17. Generación de graficas de efectos principales para relaciones de señal a ruido.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.18. se muestra cómo se seleccionan las opciones de medias y de relaciones de señal a ruido luego se escogen los factores de diseño que van a intervenir en la corrida experimental.

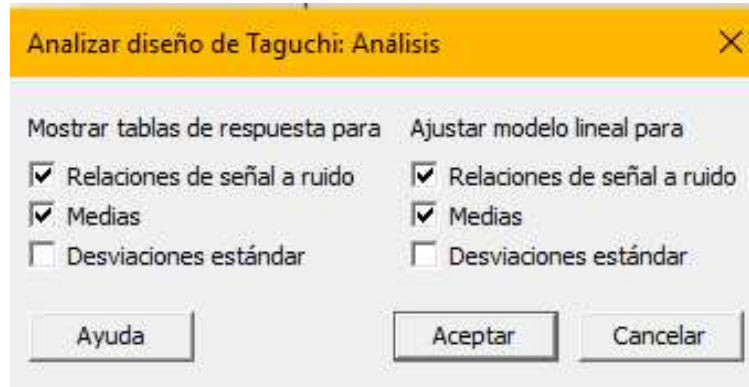


Figura 2.18. Análisis de tablas para señal a ruido y medias.

(Fuente: Propia)

El tipo de relación de señal ruido que se selecciona para las propiedades mecánicas es de Más grande es mejor, tal como muestra la Figura 2.19. Se escoge esta opción ya que para este estudio se analiza el caso en el que las propiedades mecánicas tomen los valores más altos y las variables que alcancen esos valores se consideran óptimas.

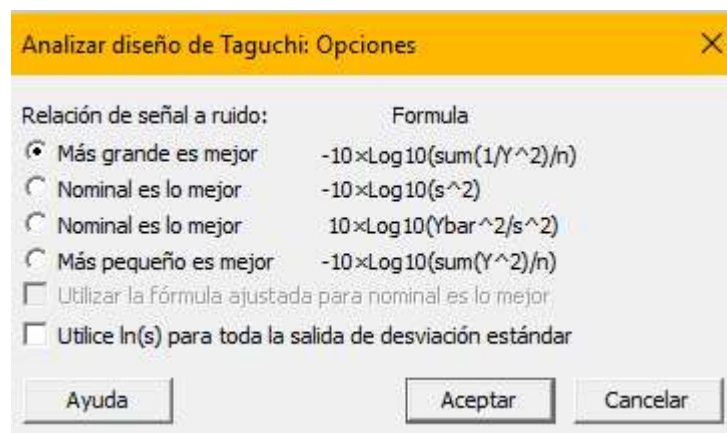


Figura 2.19. Se realiza el análisis de señal a ruido con la opción Más grande es mejor.

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos de los ensayos realizados de cada muestra. Las probetas ensayadas fueron cuantificadas de acuerdo con la norma AWS D1.1, se realizó análisis cualitativos y cuantitativos de cada junta soldada, y fundamentalmente hubo énfasis en el uso del ANOVA para la implementación del método de Taguchi.

3.1. Resultados

3.1.1. Composición química del material base

Los resultados de composición química del material base se detallan en el ANEXO 1. En la Tabla 3.1 se muestra el resultado de los componentes en porcentajes presentes en el acero. El ensayo se realizó a una muestra ya que el resto fueron cizalladas de la misma plancha.

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 2 mediciones en distintos puntos del espécimen y finalmente se promedió su valor.

Tabla 3.1. Resultados de la composición química del material de ensayo.

ELEMENTO	VALOR %
	Muestra MB
Carbono [C]	0,119
Silicio [Si]	0,365
Manganeso [Mn]	0,939
Fósforo [P]	0,012
Cromo [Cr]	0,457
Níquel [Ni]	0,420
Cobre [Cu]	0,181
Aluminio [Al]	0,022
Cobalto [Co]	0,012
Vanadio [V]	0,014
Molibdeno [Mo]	0,0089
Hierro [Fe]	97,45
Aluminio [Al]	0,022
Estroncio [Sn]	0,0049
Boro [B]	0,0016
Titanio [Ti]	<0,020
Total	100

(Fuente: Laboratorio de Fundición, 2019)

A continuación, se muestra el cálculo del carbono equivalente del material en función de la ecuación que establece la norma AWS D1.1. En la Ecuación 8. se reemplaza el valor de la composición de los elementos aleantes del acero, con la que se obtiene el valor de carbono equivalente $CE=0,552047$ que sugiere un precalentamiento previo al proceso de soldadura. Sin embargo, en la sección de precalificados de la norma AWS D1.1 se encuentra la Tabla 3.2. donde se describen las temperaturas mínimas de precalentamiento precalificado y de interpase para diferentes aceros y espesores precalificados y en el caso del acero A588 con 12 milímetros de espesor establece que la temperatura mínima de precalentamiento es 0°C. Por esta razón no se ejecutó el precalentamiento previo a soldar las muestras.

$$CE = 0,119 + \frac{0,939 + 0,365}{6} + \frac{0,457 + 0,0089 + 0,014}{5} + \frac{0,420 + 0,181}{15}$$

Ecuación 8. Cálculo de la soldabilidad Muestra M1

$$CE = 0,552047$$

3.1.2. Cordones de soldadura

3.1.2.1. Aspecto físico

Cuando se habla de la integridad o estado de cordones de soldadura el primer paso es realizar una inspección visual que permita determinar el aspecto físico de los mismos, esto es, verificar la calidad de acabado, forma y tamaño del cordón, además de detectar la presencia de discontinuidades superficiales que comprometan el funcionamiento mecánico de la junta. En la Tabla 3.2 se pueden apreciar todos los cordones de soldadura resultantes del proceso ejecutado obteniendo los siguientes resultados.

Para la muestra P1 se observa un cordón de soldadura poco uniforme, en la superficie existen mordeduras, traslapes, salpicaduras y faltas de fusión que resultan visibles, en promedio tiene una sobremonta de 1.5mm, en esta muestra se realizaron 6 pases.

Para la muestra P2 este cordón presenta salpicaduras en los alrededores, el promedio de la medida de la sobremonta de este cordón es 2.5 mm, en este cordón fueron necesarios cuatro pases, la superficie del cordón presenta un aspecto muy rugoso, no obstante, su sobremonta y el ancho del cordón se distribuyen uniformemente. En el caso de la muestra P3, se necesitaron dos pases. El promedio de la sobremonta de este cordón es de 2 mm,

en la superficie del cordón se observa una mordedura, además, el ancho del cordón no se conserva uniforme en la longitud de este, la sobremonta tiene uniformidad.

La muestra P4 tiene en promedio una sobremonta de 3 mm, en este cordón se realizaron tres pases de soldadura, se aprecia la presencia de salpicaduras, el ancho del cordón varía en toda su longitud, el aspecto superficial de la junta soldada no se muestra uniforme. La muestra P5 tiene un promedio de sobremonta de 1.25 mm, se aplicaron dos pases de soldadura, su aspecto físico se muestra uniforme, tanto en el ancho como en la altura de este.











A continuación, la muestra P6 tiene como promedio una sobremonta de 2 mm, dos pases, el aspecto superficial de este cordón no muestra discontinuidades visibles, la sobremonta no tiene una medida uniforme, así el ancho del cordón también se muestra variable a lo largo de la placa. En la muestra P7 se tiene un promedio de sobremonta de 2.75 mm, se realizaron dos pases, las características que muestra la superficie de este cordón son: salpicaduras visibles, altura y ancho del cordón uniformes.

La muestra P8 tiene un promedio de sobremonta de 3.5 mm, se realizaron dos pases de soldadura, en la superficie de la junta soldada se visibilizan socavaduras, un traslape, el ancho del cordón muestra uniformidad. En la muestra P9 el valor promedio de sobremonta es de 1.25 mm, se realizaron dos pases de soldadura, a lo largo del cordón se observan dos traslapes, no tiene un aspecto uniforme, el cordón se muestra ancho. En cuanto a la muestra en condiciones normales (PCN) tiene un valor promedio de sobremonta de 3.1 mm, se realizaron tres pases en esta junta y se muestra un cordón uniforme en toda su longitud.

En el análisis del aspecto superficial de cada una de las muestras del proceso de soldadura obtenidas se menciona el número de pases realizados en cada una de las placas, sin tomar en cuenta el pase de raíz.

El pase de raíz fue ejecutado bajo otras condiciones ya mencionadas en el capítulo 2, con proceso de soldadura GMAW para todas las muestras, fue realizado en el Laboratorio de Soldadura de la FIM-EPN. Para el análisis de los resultados de los ensayos se debe tomar en cuenta que al momento de hacer el pase de raíz el equipo de soldadura no contaba con una fuente de electricidad estable, por tanto, las discontinuidades presentes en la raíz se deben principalmente a este inconveniente.

Tabla 3.2. Aspecto físico de las juntas soldadas.


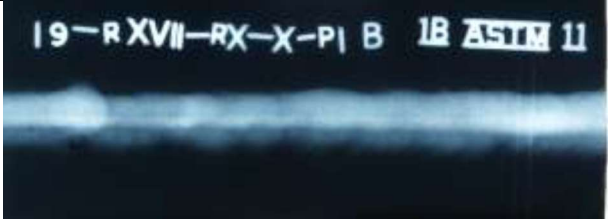
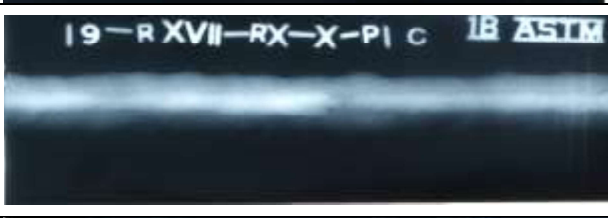

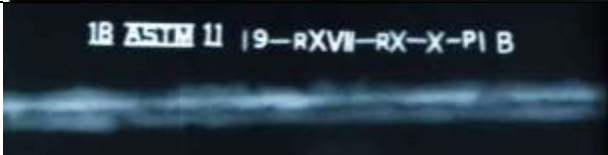
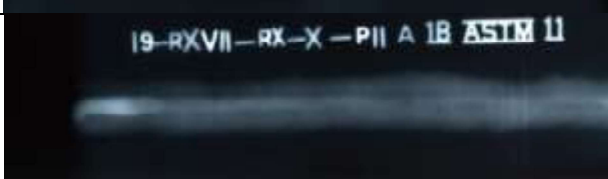



CN	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	







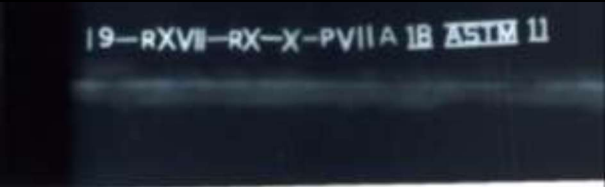

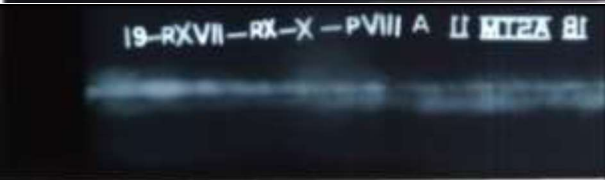
(Fuente: Propia)

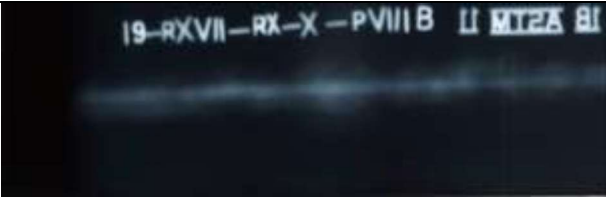


3.1.2.2. Ensayo de radiografía

Los resultados del ensayo de radiografía se encuentran en el ANEXO 2, en la Tabla 3.3. se muestra un resumen de las discontinuidades encontradas en cada uno de los cordones de soldadura.

Tabla 3.3. Resumen de los resultados del ensayo de radiografía.

ID	Discontinuidades	Sección	Imagen
PCN	Concavidad interna	A	
	Ninguna	B	
	Inclusiones de escoria, porosidad.	C	
P1	Faltas de fusión entre pases	A	
	Faltas de fusión entre pases	B	
P2	Penetración excesiva, inclusiones de escoria	A	
	Inclusiones de escoria	B	
P3	Penetración excesiva, inclusiones de escoria, concavidad interna.	A	
	Inclusiones de escoria, mordedura, concavidad interna.	B	

P4	Fusión incompleta, penetración excesiva.	A	
	Falta de penetración, inclusiones de escoria.	B	
P5	Inclusiones de escoria, escoria alargada.	A	
	Penetración excesiva, inclusiones de escoria, escoria alargada, quemón, concavidad interna.	B	
P6	Penetración excesiva.	A	
	Inclusiones de escoria	B	
P7	Fusión incompleta	A	
	Fusión incompleta, penetración excesiva.	B	
P8	Fusión incompleta, mordeduras, escoria alargada.	A	

	Fusión incompleta, porosidad.	B	
P9	Penetración excesiva, inclusiones de escoria, escoria alargada.	A	
	Fusión incompleta, porosidad.	B	

(Fuente: Propia)

Los resultados del ensayo de radiografía industrial realizada a las 10 placas se encuentran de forma más detallada en el Anexo II. El análisis se realiza bajo el criterio de aceptación del código AWS D1.1.

Para la muestra P1 en la interpretación del ensayo radiográfico se tiene que en esta muestra existen faltas de fusión entre pases. Esta discontinuidad puede ser confundida con la de escoria alargada ya que ambas se ven de forma similar en la película radiográfica. Sin embargo, las faltas de fusión se muestran como marcas alineadas en un solo sentido a lo largo del cordón que es justamente lo que se encuentra en esta muestra.

Para la muestra P2 se encontró una discontinuidad de penetración excesiva con una longitud de 32 mm, esta discontinuidad se encontraba al inicio del cordón, no obstante, el código AWS D1.1 establece que debe descartarse una pulgada desde esta posición, por lo tanto, esta discontinuidad queda descartada, por otro lado, se encontraron inclusiones de escoria que no representaban un defecto. En el proceso de extracción de probetas se pudo comprobar que estas inclusiones no representaban un defecto.

Para la muestra P3 se observa penetración excesiva con una longitud de 70 mm, por otra parte, tiene inclusiones de escoria a lo largo de todo el cordón de soldadura. Otras discontinuidades encontradas son: 3 mordeduras de longitud 2, 8 y 4 mm, respectivamente y una concavidad interna de 10 mm de longitud.

Para la muestra P4 a lo largo de la placa se pueden encontrar discontinuidades en el pase de raíz, estas discontinuidades son: falta de penetración con una longitud de 32 mm y 3 casos de penetración excesiva con longitudes de 15, 25, 15 mm, respectivamente. En el

cordón de soldadura se pueden encontrar 3 inclusiones de escoria, cada una de estas tiene un tamaño de 1 mm, fusión incompleta con longitud de 32 mm, según el código AWS D1.1 esta muestra debe ser rechazada.

Para la muestra P5 las indicaciones que se encontraron en el pase de raíz fueron: penetración excesiva de 53 mm, a lo largo del cordón de soldadura se encontraron las siguientes discontinuidades: 7 inclusiones de escoria con una longitud de 1 mm cada una, 2 escorias alargadas con longitudes de 96 y 62 mm, respectivamente, un quemón de 2 mm, y una concavidad interna de 7 mm.

Para la muestra P6 el pase de raíz tiene una discontinuidad de penetración excesiva con una longitud de 100 mm, en la junta soldada se puede encontrar una inclusión de escoria.

Para la muestra P7 se encontraron discontinuidades únicamente en el pase de raíz, estas discontinuidades son: 5 fusiones incompletas, de longitud 4, 1, 6, 12 y 32 mm, respectivamente. Además, se tiene una penetración excesiva de 12 mm.

Para la muestra P8 a lo largo de la raíz de esta junta soldada se encontraron dos discontinuidades de fusión incompleta, con longitudes de 7 y 11 mm, respectivamente. Por otro lado, el cordón de soldadura presenta las siguientes discontinuidades: una mordedura de 4 mm, una escoria alargada de 18 mm, y una porosidad de 10 mm.

Para la muestra P9 el cordón de soldadura tiene varias discontinuidades, en el pase de raíz se encuentra una penetración excesiva de 7 mm, a lo largo de la junta soldada se encuentran faltas de fusión de longitudes 4, 20, 4, 20, 5, 4 mm, respectivamente, 2 inclusiones de escoria de 1 mm cada una, una porosidad de 1mm y falta de fusión entre pases de 82 mm,

Para la muestra en condiciones normales: la raíz de esta junta soldada no presenta discontinuidades, por otro lado, el cordón de soldadura presenta inclusiones de escoria de longitud 7 mm, una porosidad de 4 mm y una concavidad interna de 5 mm.

3.1.2.3. Ensayo de doblado

En la Tabla 3.4. se pueden los resultados del ensayo de doblado de cara y de raíz.

Tabla 3.4. Resultados de los ensayos de doblado.

Número de muestra	Observación mm		Imagen	Calificación Parcial	Calificación total	
	Cara	Raíz				
N	A	Indicación de 2,9	No se encontraron indicaciones	ANEXO IV Figura 3.1	Aprobado	Aprobado
	B	Indicaciones de 1,8; 1,4; 0,4	No se encontraron indicaciones		Aprobado	
1	A	Fractura total	Fractura total	ANEXO IV Figura 3.2	Rechazado	Rechazado
	B	Fractura total	No se encontraron indicaciones		Rechazado	
2	A	Indicaciones de 1,7; 0,3	No se encontraron indicaciones	ANEXO IV Figura 3.3	Aprobado	Rechazado
	B	Indicación de 9,5	No se encontraron indicaciones		Rechazado	
3	A	Indicaciones de 6,9; 2,0; 2,1	No se encontraron indicaciones	ANEXO IV Figura 3.4	Rechazado	Rechazado
	B	Fractura total	Indicaciones de 18,3; 7,7; 4,0		Rechazado	
4	A	Fractura total	Fractura total	ANEXO IV Figura 3.5	Rechazado	Rechazado
	B	No se encontraron indicaciones	Indicaciones de 0,7; 1,2; 0,7		Aprobado	
5	A	Fractura total	No se encontraron indicaciones	ANEXO IV Figura 3.6	Rechazado	Rechazado
	B	Indicaciones de 18; 4,0	No se encontraron indicaciones		Rechazado	
6	A	Fractura total	Indicación de 2,5	ANEXO IV Figura 3.7	Rechazado	Rechazado
	B	Fractura total	Fractura total		Rechazado	
7	A	No se encontraron indicaciones	Fractura total	ANEXO IV Figura 3.8	Rechazado	Rechazado
	B	Indicación de 0,75	No se encontraron indicaciones		Aprobado	
8	A	Indicaciones de 3,0; 2,0	Indicaciones de 0,7; 1,0	ANEXO IV Figura 3.9	Aprobado	Rechazado
	B	Indicaciones de 17; 2,3	Indicación de 7,3		Rechazado	

9	A	No se encontraron indicaciones	Fractura total	ANEXO IV Figura 3.10	Rechazado	Rechazado
	B	No se encontraron indicaciones	Fractura total		Rechazado	





(Fuente: Propia)

3.1.2.4. Ensayo de tensión

El informe del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones se encuentra en el ANEXO 3, en la Tabla 3.5. se resumen los resultados del ensayo de tensión. En la Figura 3.1. se aprecian los valores de la resistencia a la tensión de las juntas soldadas comparado respecto a la resistencia mínima a la tensión del material base.

Tabla 3.5. Resumen del ensayo de tensión.

Espécimen	Carga máxima registrada N	Resistencia a la tensión MPa	Valor promedio de la resistencia a la tensión MPa	Imagen
CN.1	120885	531,9	556,5	
CN.2	134432	581		
P1.1	110925	460,8	481,2	
P1.2	114870	501,6		
P2.1	133744	564,8	565	
P2.2	130529	565,2		
P3.1	126595	550,6	520,35	
P3.2	109209	490,1		
P4.1	130995	563,7	559,25	
P4.2	135458	554,8		
P5.1	128531	556,9	556,7	
P5.2	134099	556,5		

P6.1	127727	535,4	539,45	
P6.2	129459	543,5		
P7.1	108379	449,3	495,35	
P7.2	129139	541,4		
P8.1	120384	509,2	517,7	
P8.2	124166	526,2		
P9.1	124197	524,5	528,65	
P9.2	130010	532,8		

(Fuente: Propia)

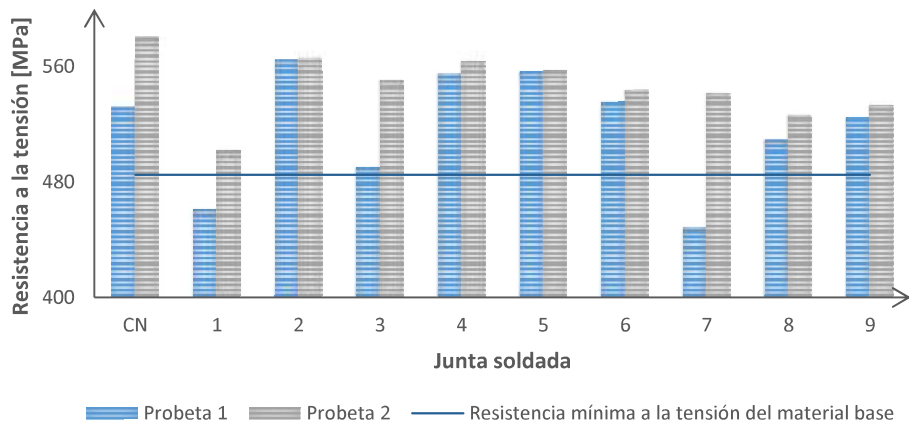












Figura 3.1. Análisis comparativo de la resistencia a la tensión de las diferentes juntas soldadas.

(Fuente: Propia).

3.1.2.5. Ensayo Charpy

La norma AWS indica que, para tener un resultado confiable, se deben realizar al menos tres ensayos Charpy de cada muestra para obtener el promedio y realizar el análisis con éste. En la Tabla 3.6 se detallan los resultados de todas las probetas Charpy ensayadas. Además, se muestra el promedio de los valores medidos, este valor se utiliza para el análisis con el método de Taguchi. En la Figura 3.2. se aprecian los valores de la energía de impacto de cada muestra comparada con la resistencia mínima aceptada de 27 J según la norma AWS D1.1.

Tabla 3.6. Resultados ensayo Charpy.

Espécimen	Energía de impacto J	Valor promedio J	Imagen	Espécimen	Energía de impacto J	Valor promedio J	Imagen
CN1	117	111		P5.1	164	175	
CN2	117			P5.2	195		
CN3	98			P5.3	165		
P1.1	57	70		P6.1	141	135	
P1.2	65			P6.2	108		
P1.3	89			P6.3	141		
P2.1	133	131		P7.1	130	120	
P2.2	149			P7.2	114		
P2.3	111			P7.3	117		
P3.1	157	151		P8.1	133	135	
P3.2	152			P8.2	133		
P3.3	144			P8.3	138		
P4.1	145	147		P9.1	87	129	
P4.2	144			P9.2	165		
P4.3	152			P9.3	136		

(Fuente: Propia)

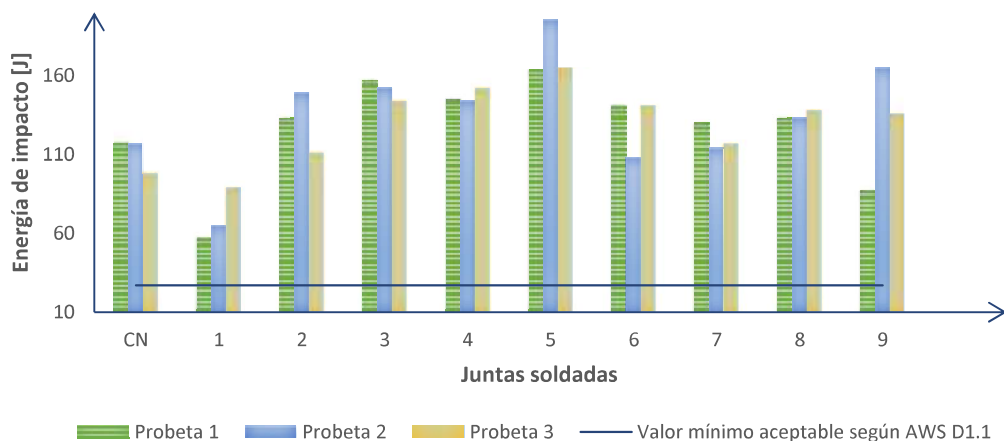


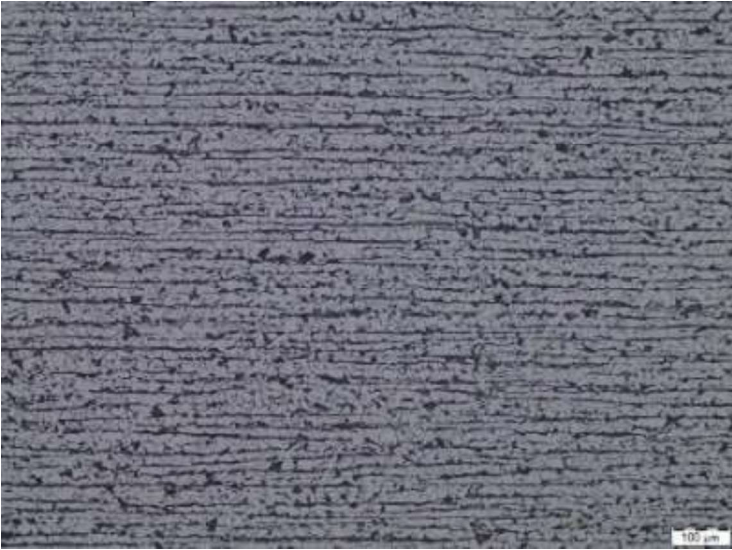
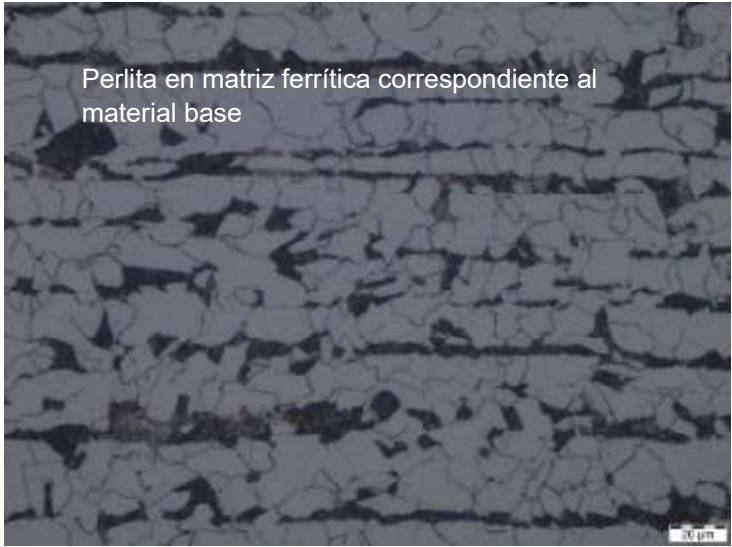
Figura 3.2. Análisis comparativo de la energía de impacto de las diferentes juntas soldadas.

(Fuente: Propia)



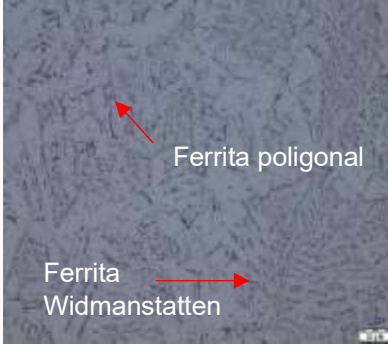
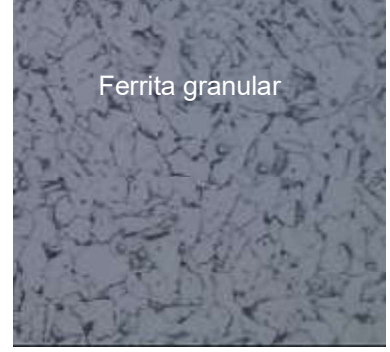

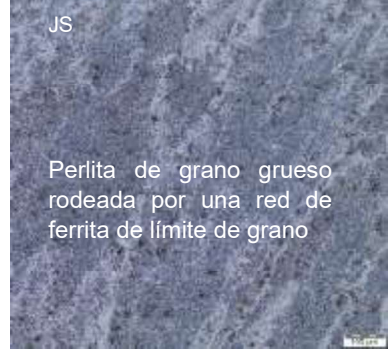
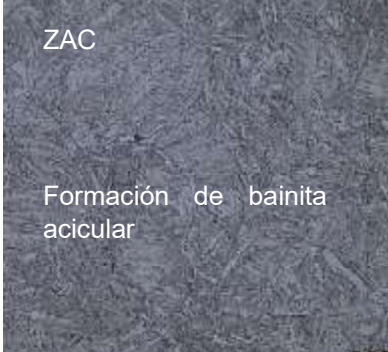

3.1.2.6. Ensayo metalografico

A continuación se presenta un resumen de las imágenes obtenidas en las cuales se muestran las zonas afectadas por el calor, y principalmente la zona del material de aporte y las distintas microestructuras que se presentaron en cada junta soldada.


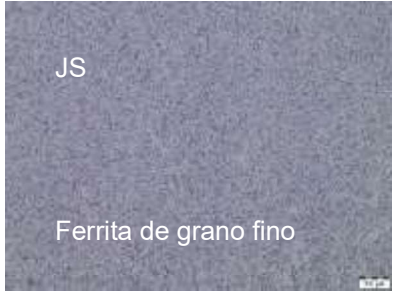
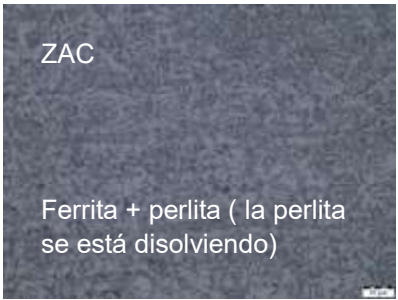

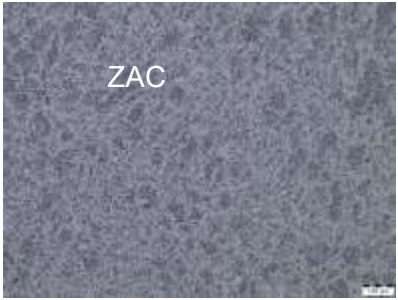
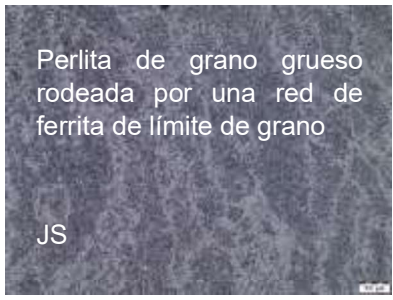
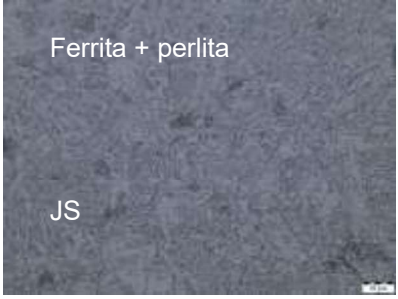

Tabla 3.7: Resultados del ensayo metalográfico de las juntas soldadas.

ID	Amplificación	Imagen
Material base	100X	
	500X	<p>Perlita en matriz ferrítica correspondiente al material base</p> 


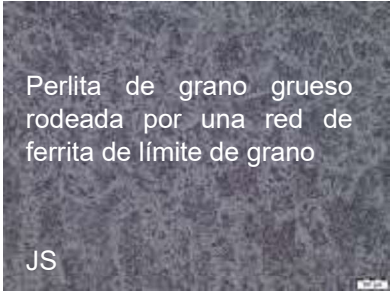

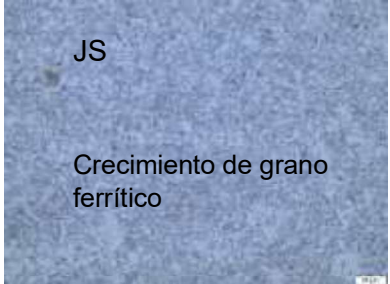
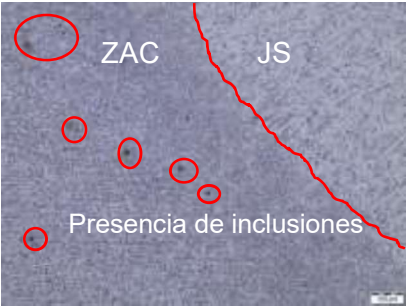
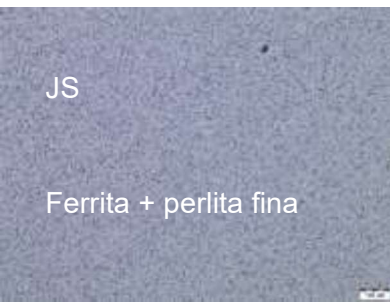
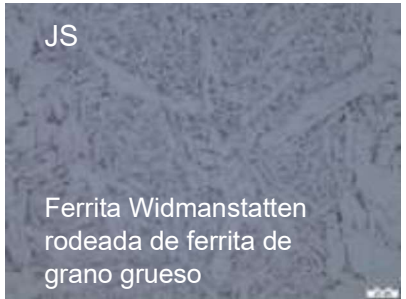
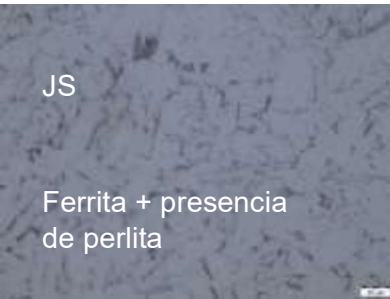
Continuación Tabla 3.7.

ID	Amplificación	Imagen	
Probeta en condiciones normales	100X	 <p>ZAC</p>	 <p>Cordón de soldadura</p> <p>Silicatos globulares</p>
	500X	 <p>Ferrita poligonal</p> <p>Ferrita Widmanstätten</p>	 <p>Ferrita granular</p>
Probeta 1	100X	 <p>ZAC</p>	 <p>JS</p> <p>Perlita de grano grueso rodeada por una red de ferrita de límite de grano</p>
	500X	 <p>ZAC</p> <p>Formación de bainita acicular</p>	 <p>JS</p> <p>Ferrita Widmanstätten</p>

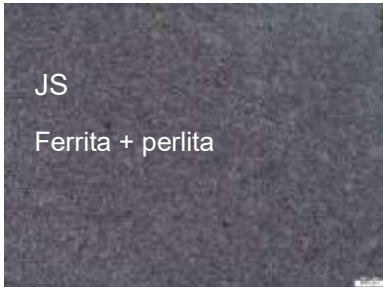
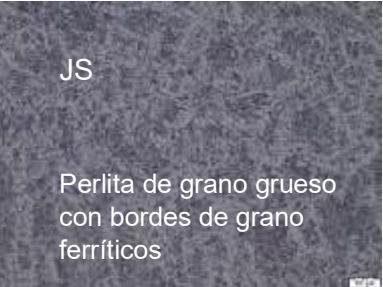
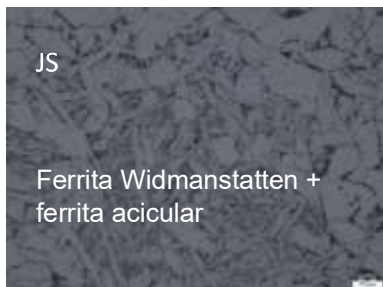
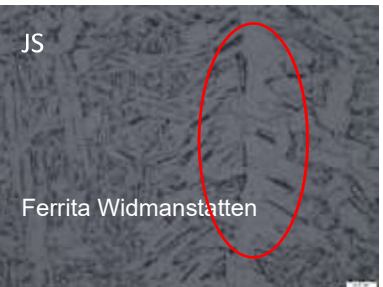
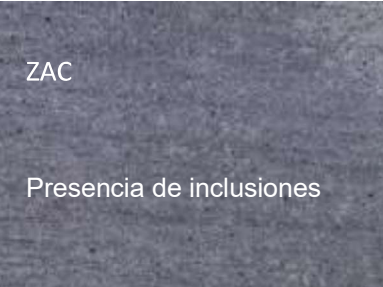
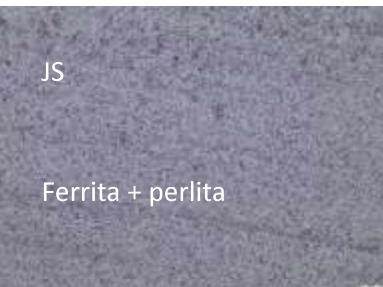
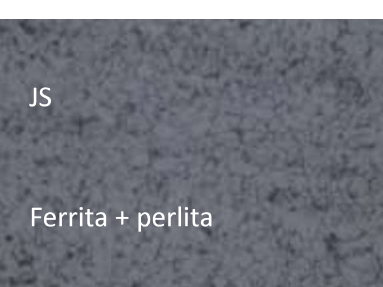
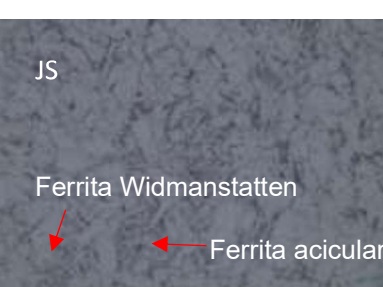
Continuación Tabla 3.7.

ID	Amplificación	Imagen	
Probeta 2	100X	 <p>ZAC</p> <p>perlita de grano fino en red de ferrita</p>	 <p>JS</p> <p>Ferrita de grano fino</p>
	500X	 <p>ZAC</p> <p>Ferrita + perlita (la perlita se está disolviendo)</p>	 <p>JS</p> <p>Ferrita Widmanstätten</p>
Probeta 3	100X	 <p>ZAC</p>	 <p>Perlita de grano grueso rodeada por una red de ferrita de límite de grano</p> <p>JS</p>
	500X	 <p>Ferrita + perlita</p> <p>JS</p>	 <p>Ferrita Widmanstätten</p> <p>JS</p>





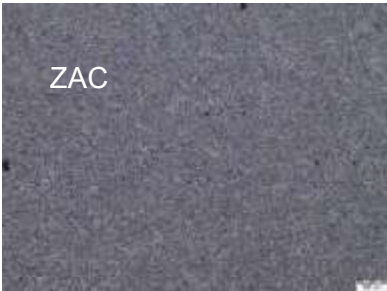
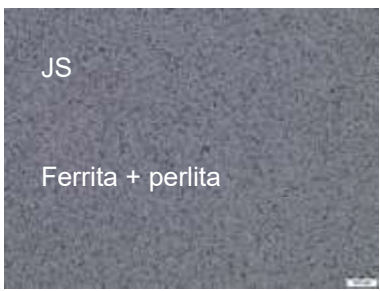
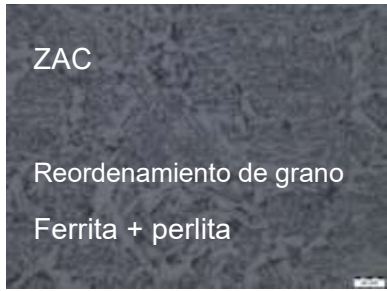
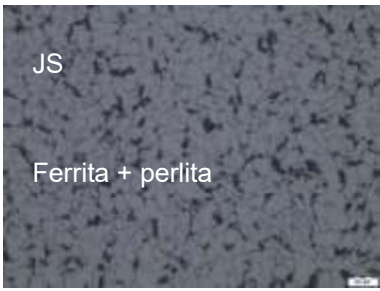
Continuación Tabla 3.7.

ID	Amplificación	Imagen	
Probeta 4			 <p>Perlita de grano grueso rodeada por una red de ferrita de límite de grano</p>
	500X		
Probeta 5	100X		
	500X		

Continuación Tabla 3.7.

ID	Amplificación	Imagen	
Probeta 6	100X	 <p>JS Ferrita + perlita</p>	 <p>JS Perlita de grano grueso con bordes de grano ferríticos</p>
	500X	 <p>JS Ferrita Widmanstätten + ferrita acicular</p>	 <p>JS Ferrita Widmanstätten</p>
Probeta 7	100X	 <p>ZAC Presencia de inclusiones</p>	 <p>JS Ferrita + perlita</p>
	500X	 <p>JS Ferrita + perlita</p>	 <p>JS Ferrita Widmanstätten Ferrita acicular</p>

Continuación Tabla 3.7.

ID	Amplificación	Imagen	
Probeta 8	100X	 ZAC-JS	 JS
	500X	 JS Ferrita + perlita	 Ferrita Widmanstatten Junta soldada
Probeta 9	100X	 ZAC	 JS Ferrita + perlita
	500X	 ZAC Reordenamiento de grano Ferrita + perlita	 JS Ferrita + perlita

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, desgaste y falla, 2019)

3.1.2.7. Macrografías

Las macrografías que se muestran en las siguientes figuras (Figura 3.14., Figura 3.15., Figura 3.16., Figura 3.17., Figura 3.18., Figura 3.19., Figura 3.20., Figura 3.21., Figura 3.22., Figura 3.23.) indican las líneas acotadas de la longitud de la ZAC de cada probeta,

además discontinuidades presentes en cada cordón de soldadura, posteriormente se evaluará cual de las probetas tiene mayor zona de afectación por el calor.

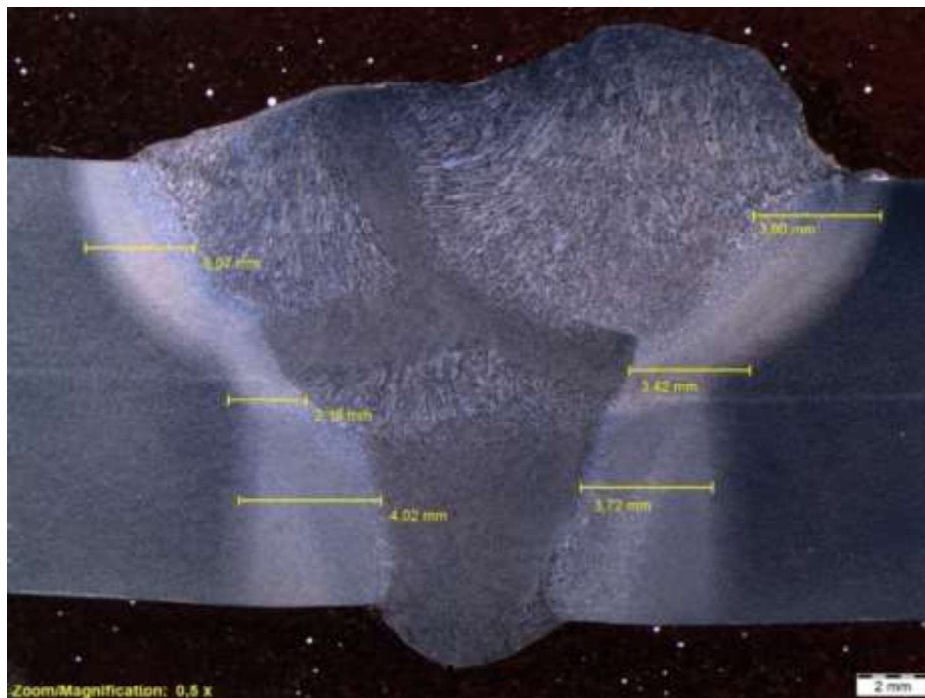


Figura 3.3. Macrografía de la muestra en condiciones normales (CN).

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

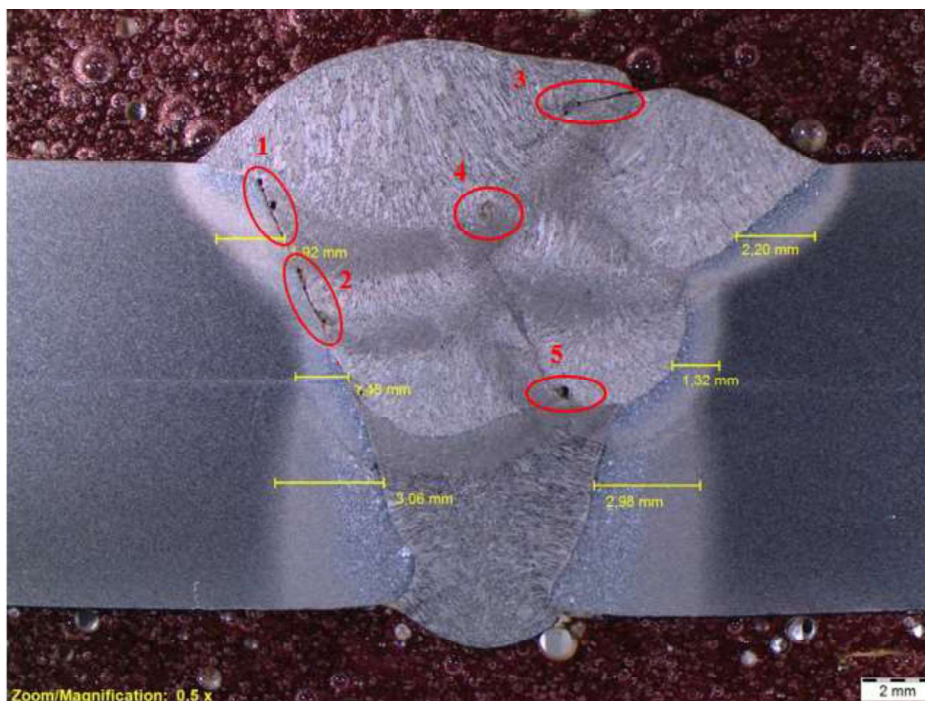


Figura 3.4. Macrografía de la muestra P1.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

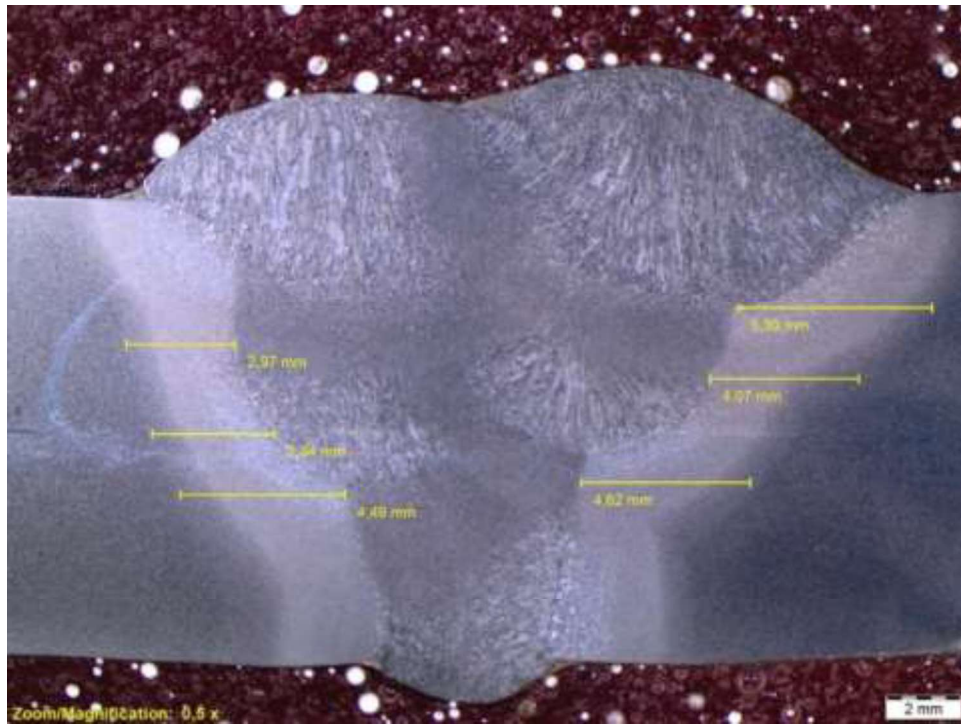


Figura 3.5. Macrografía de la muestra P2.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

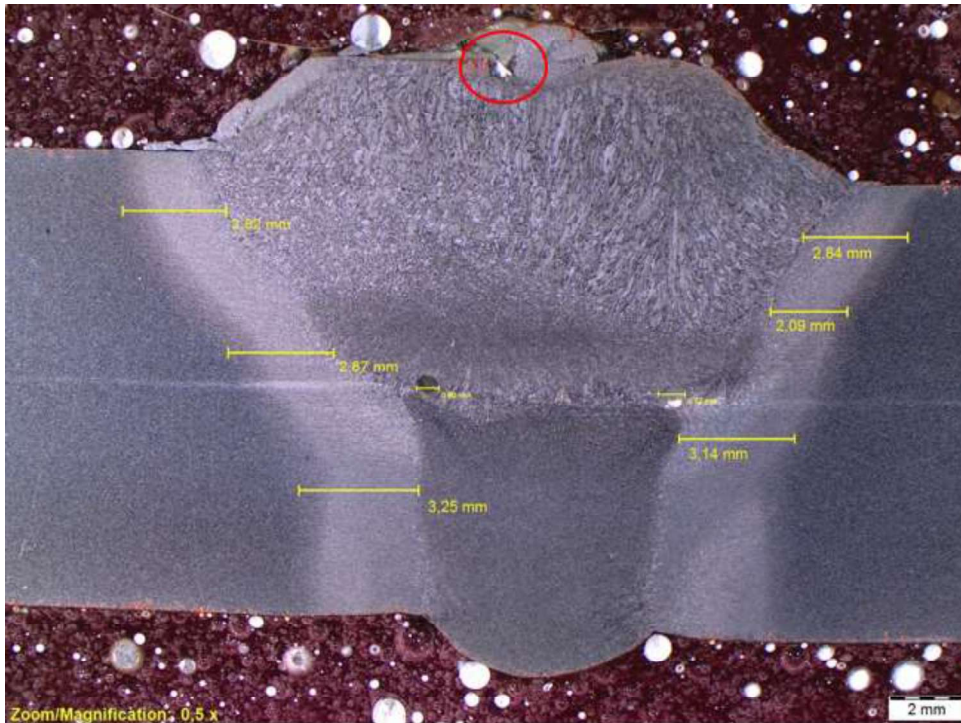


Figura 3.6. Macrografía de la muestra P3.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

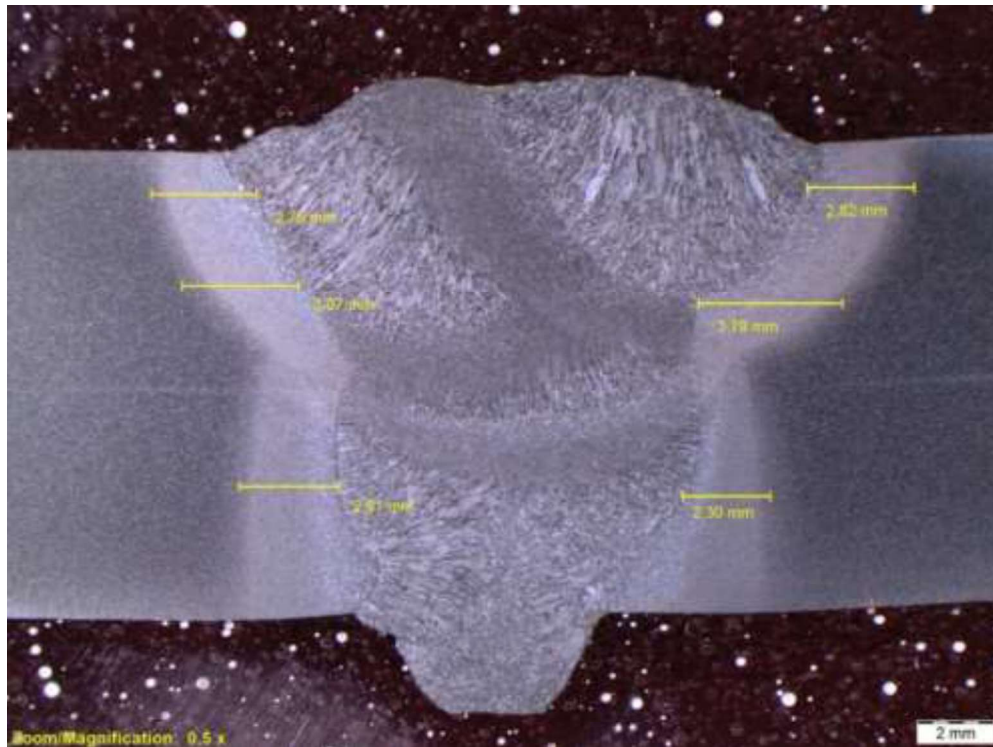


Figura 3.7. Macrografía de la muestra P4.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

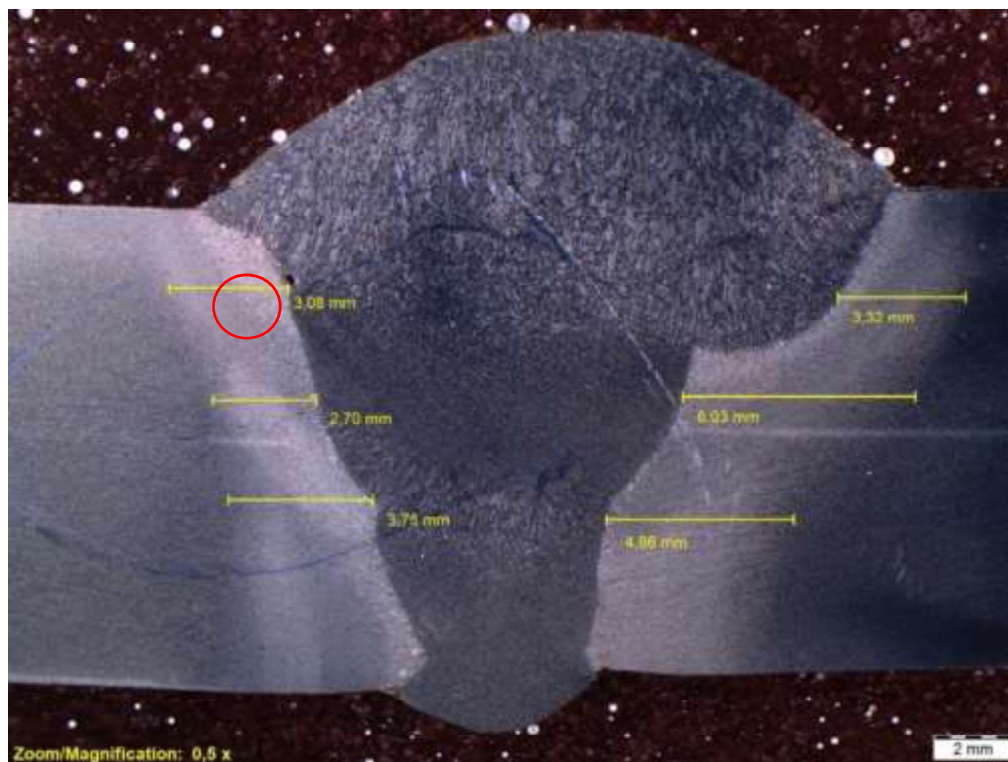


Figura 3.8. Macrografía de la muestra P5.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

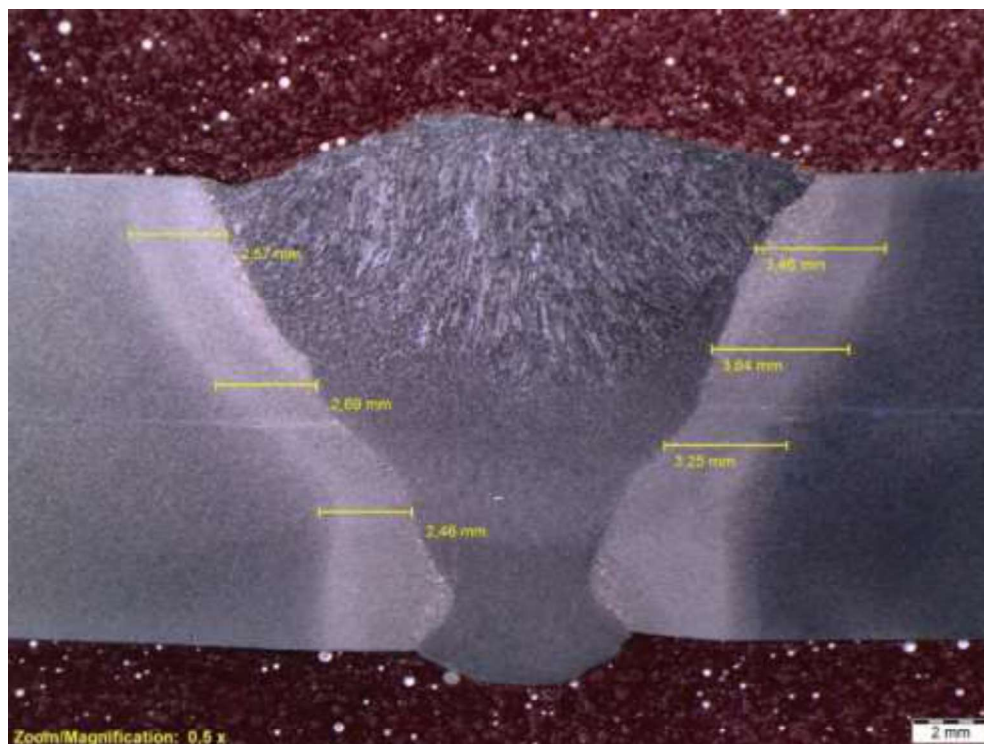


Figura 3.9. Macrografía de la muestra P6.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

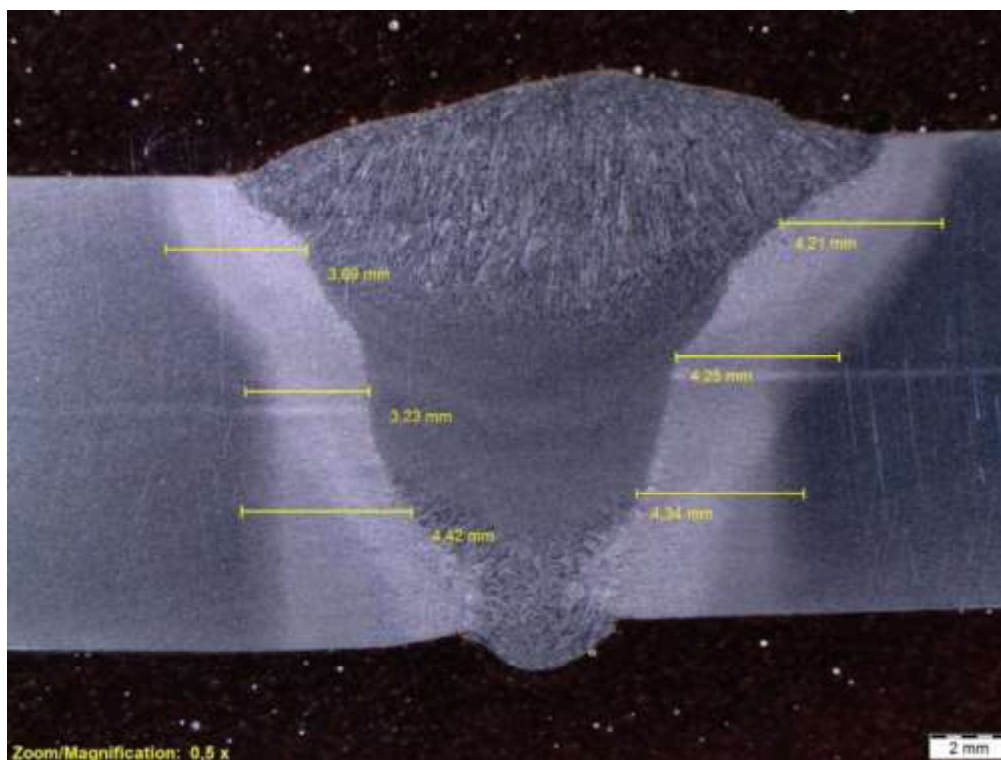


Figura 3.10. Macrografía de la muestra P7.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

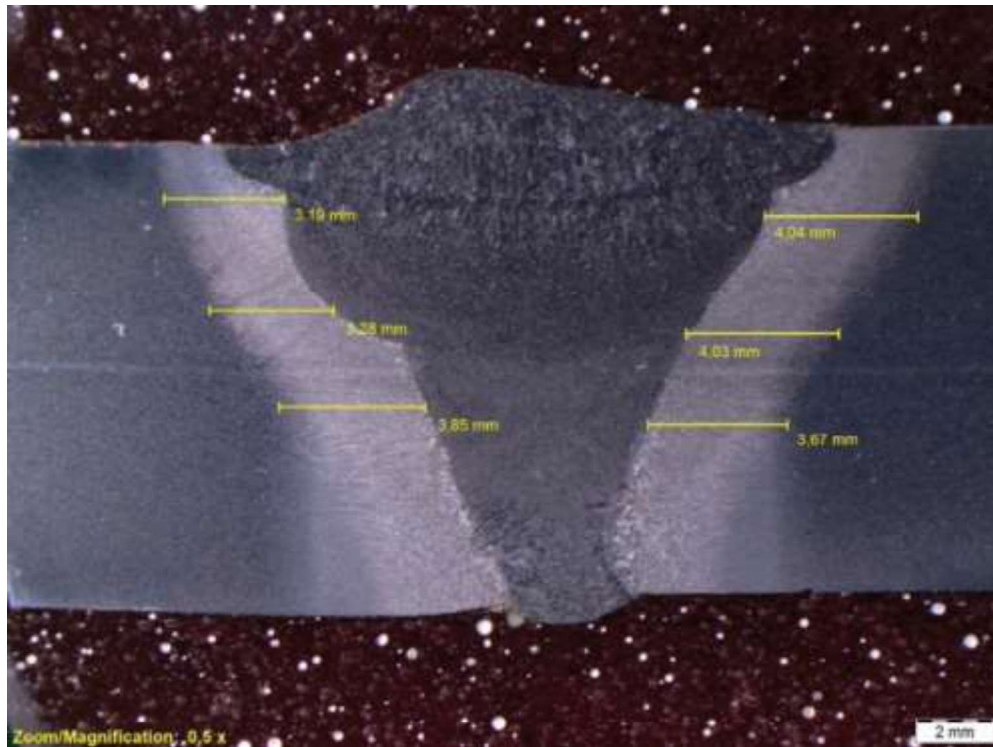


Figura 3.11. Macrografía de la muestra P8.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

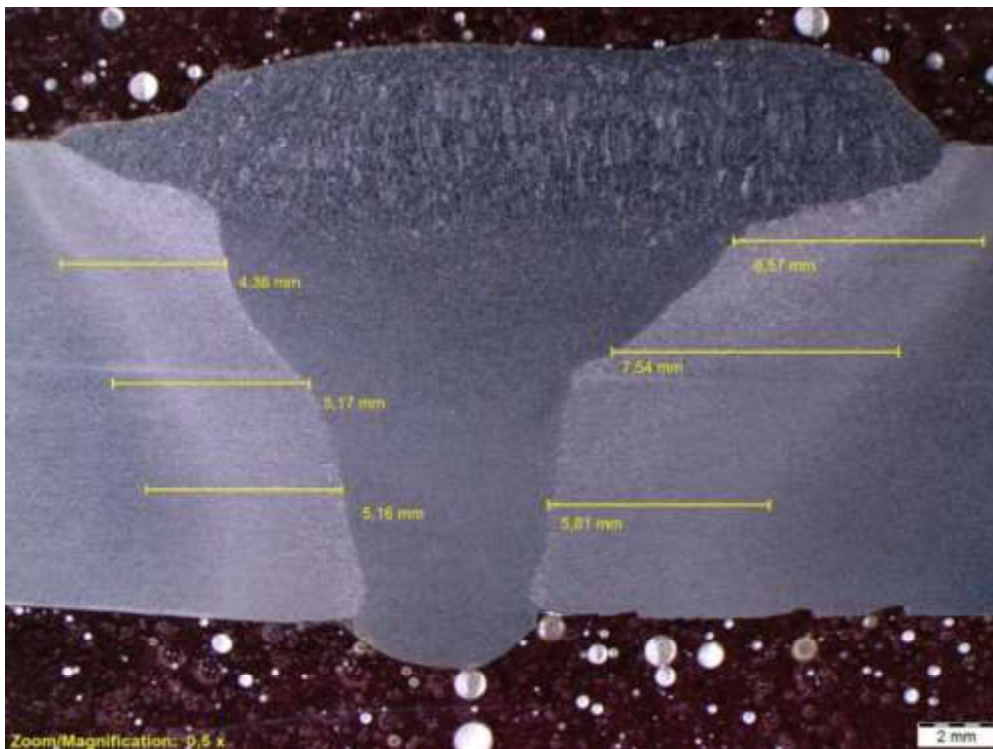


Figura 3.12. Macrografía de la muestra P9.

(Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla)

En las macrográficas se toman medidas del tamaño de la ZAC de cada una de las soldaduras para determinar en que muestra se encuentra la mayor zona afectada térmicamente. En la Tabla 3.8. se observan los valores promedio de la ZAC en cada muestra.

Tabla 3.8: Tamaño de las ZAC obtenidas de las macrográficas de cada junta soldada.

Muestra	Valor máximo mm	Valor mínimo mm	Valor promedio mm
1	3,06	1,32	2,16
2	5,30	2,97	4,13
3	3,25	2,09	2,83
4	3,79	2,30	2,89
5	6,03	2,70	3,95
6	3,64	2,46	3,01
7	4,42	3,23	4,02
8	4,04	3,19	3,67
9	7,54	4,36	5,76
CN	4,02	2,19	3,33

(Fuente:Propia)

3.1.2.8. Ensayo de dureza

Para obtener los valores de dureza se realizaron dos barridos, como se muestra en la Figura 3.13., en cada barrido se tomaron valores desde el material base, la zona afectada por el calor y el material de aporte en cada lado, respectivamente. Para el gráfico Distancia Dureza se calculó el valor promedio de la dureza en cada zona, estos valores se encuentran en la Tabla 3.9. La Tabla 3.8 muestra los valores obtenidos de dureza con sus respectivos gráficos.



Figura 3.13. Probeta utilizada para medición de dureza.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.9. Valores de dureza medidos en cada probeta.

Ubicación	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB
MB-I	PCN	86	87	P1	87	88	P2	94	89
ZAC-I		98	93		99	30 [HRC]		96	94
MA		85	88		91	92		85	90
		84			87			84	86
		89	85		92	91		87	
ZAC-D		98	94		88	98		98	97
MB-D		89	88		86	89		89	86
Ubicación	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB
MB-I	P3	87	89	P4	88	86	P5	86	87
ZAC-I		89	92		95	95		91	91
MA		84	88		86	88		82	83
		85	84		82	88		84	81
		84			86				
ZAC-D		93	93		90	94		93	92
MB-D		88	87		87	80		92	85
Ubicación	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB
MB-I	P6	86	86	P7	88	87	P8	88	88
ZAC-I		93	86		92	93		91	91
MA		83	81		84	83		79	84
		84	81		82	83		79	81
		82			82			78	
ZAC-D		94	91		92	91		94	81
MB-D		88	85		84	82		85	87
Ubicación	ID	Barrido 1 HRB	Barrido 2 HRB	ID	Barrido 1 HRB				
MB-I	P9	89	86	Material base	86				
ZAC-I		94	89		85				
MA		79	82		86				
		77	81		85				
		77			85				
ZAC-D		91	90						
MB-D		88	86						

MB-I=Material base a la izquierda, ZAC-I=Zona afectada por el calor a la izquierda, MA=Material de aporte, MB-D=Material base a la derecha, ZAC-D=Zona afectada por el calor a la derecha.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10. Valores promedio de las durezas medidas

ID	Ubicación				
	MB-I	ZAC-I	MA	ZAC-D	MB-D
PCN	86,5	95,5	86,2	96	88,5
P1	87,5	102	90,6	93	87,5
P2	91,5	95	86,4	97,5	87,5
P3	88	90,5	85	93	87,5
P4	87	95	86	92	88,5

Continuación Tabla 3.10.

P5	86,5	91	82,5	92,5	88,5
P6	86	89,5	82,2	92,5	86,5
P7	87,5	92,5	82,8	91,5	83
P8	88	91	80,2	87,5	86
P9	87,5	91,5	79,2	90,5	87
Material base	85,4				

MB-I=Material base a la izquierda, ZAC-I=Zona afectada por el calor a la izquierda, MA=Material de aporte, MB-D=Material base a la derecha, ZAC-D=Zona afectada por el calor a la derecha.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.14. se tiene el análisis comparativo del barrido de dureza tomado de cada muestra, los cuales se obtuvieron de las mediciones que se realizaron en los siguientes puntos, el punto 1 es material base a la izquierda del cordón de soldadura, el punto 2 es la ZAC izquierda, el punto 3 es el cordón de soldadura, el punto 4 es la ZAC derecha, el punto 5 es el material base a la derecha del cordón de soldadura.

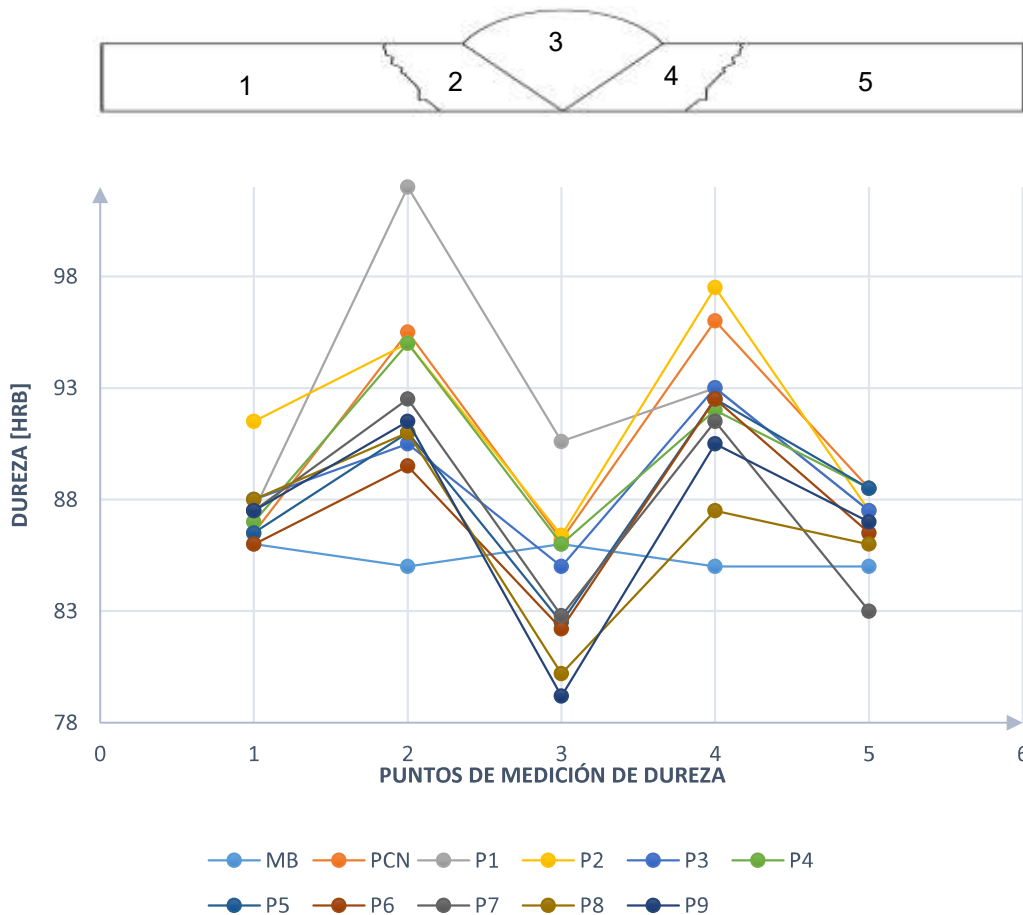


Figura 3.14. Análisis comparativo del promedio de las durezas obtenidas de cada muestra.

(Fuente: Propia)

3.1.3. Gráficas de efectos principales

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos se realiza el procedimiento explicado en la sección 2.5., para obtener las gráficas de efectos principales para relaciones señal a ruido de cada una de las propiedades mecánicas. Para la interpretación de esta gráfica se debe tomar en cuenta cual es el nivel que tiene el valor más alto de razón señal/ruido en cada parámetro de soldadura, ya que para este estudio se eligió el caso de más grande es mejor. Los niveles que tengan el valor más alto serán los que según la gráfica, proveen mejores resultados en cada una de las propiedades mecánicas. Además, se debe tomar en cuenta la pendiente o inclinación de las rectas de cada parámetro de soldadura, si la gráfica presenta mayor inclinación quiere decir que el parámetro de soldadura tiene mayor influencia en la propiedad analizada que un parámetro que tenga menor pendiente en sus rectas.

3.1.3.1. Resistencia a la tensión

La Figura 3.15. muestra los efectos principales para relaciones de señal a ruido en el caso de los resultados del ensayo de tensión y se puede observar que los tres parámetros tienen una influencia importante en la propiedad de tensión a causa de las pendientes que presentan las rectas. Si solo se analizara el caso de obtener la soldadura con mayor resistencia a la tensión se debería tomar en cuenta esta figura y los valores serían de voltaje de 25 V, velocidad de avance de 133 mm/min y alimentación de alambre de 200 pulg/min. Este análisis debe realizarse para cada una de las propiedades si se las quiere examinar individualmente.

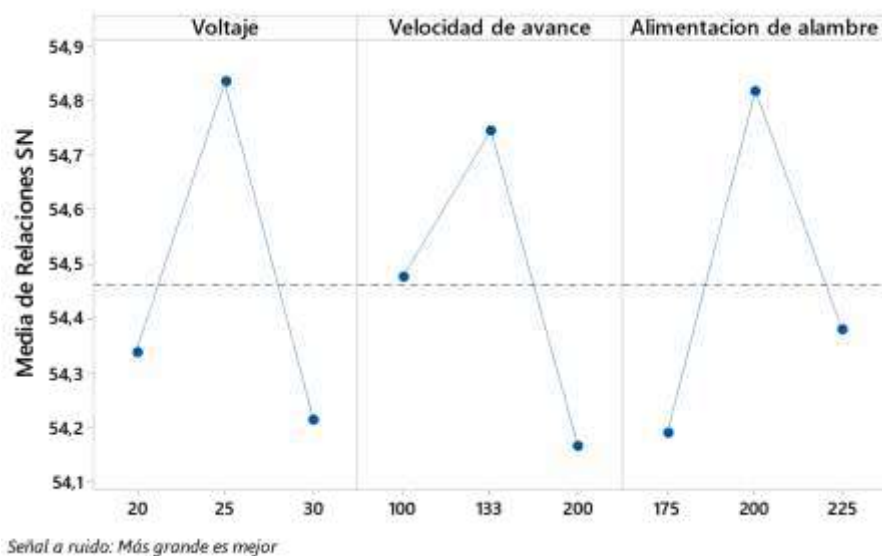


Figura 3.15. Gráfica de efectos principales para relaciones señal a ruido en el caso de la tensión.

(Fuente: Propia)

3.1.3.2. Dureza

La Figura 3.16. muestra los efectos principales de las relaciones de señal/ruido de los parámetros de soldadura para los resultados del ensayo de dureza del cordón de soldadura y en este caso se ve una marcada diferencia entre las pendientes de las rectas de los parámetros, siendo la que más destaca la del voltaje, seguida por la pendiente de la velocidad de avance y por último con una pendiente pequeña para la velocidad de alimentación de alambre. Los niveles con mejores resultados para el caso de la dureza son de 20 voltios, velocidad de avance de 200 mm/min y la alimentación de alambre es el parámetro que tiene menor influencia en este caso, debe tener 175 pulg/min.

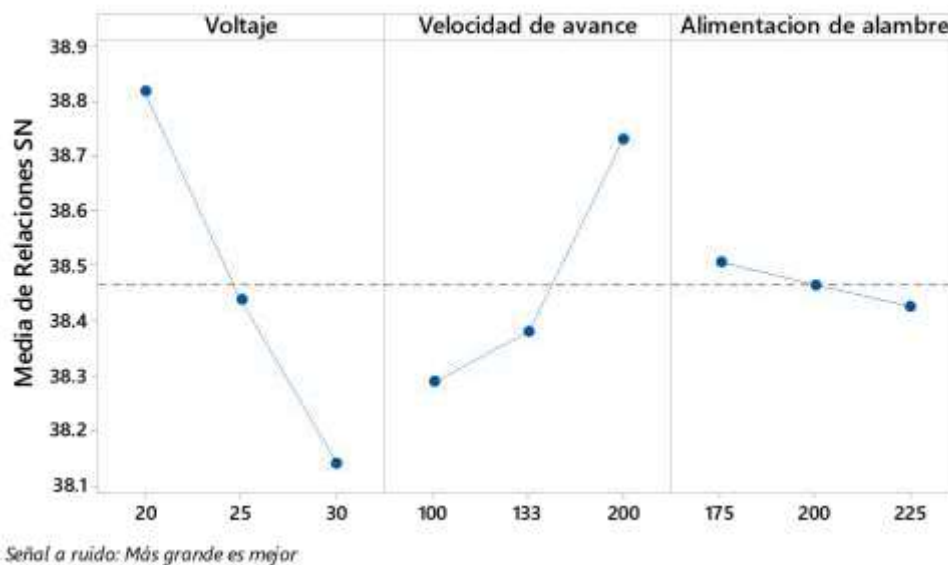
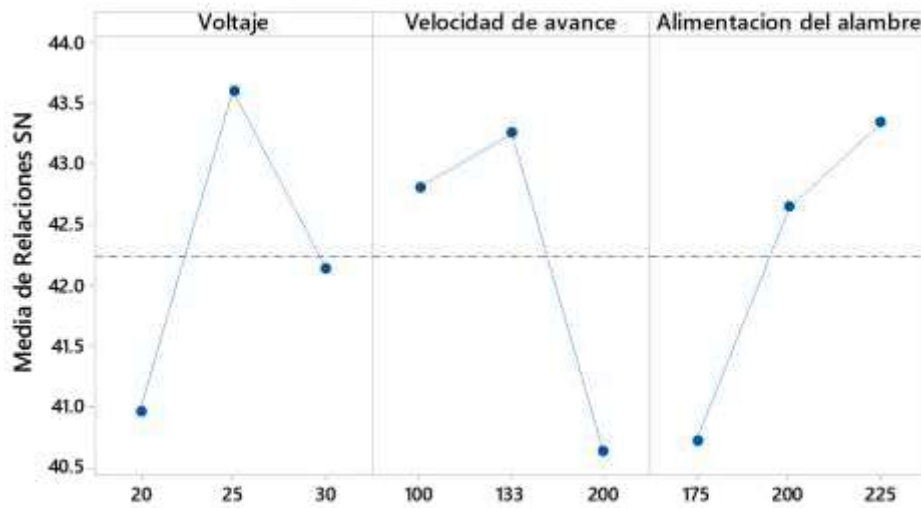


Figura 3.16. Gráfica de efectos principales para relaciones señal a ruido para el caso de la dureza.

(Fuente: Propia)

3.1.3.3. Charpy

La Figura 3.17. muestra las relaciones de señal/ruido para los resultados del ensayo Charpy, en la que se puede ver que nuevamente el voltaje tiene rectas con pendientes grandes y el valor mas grande de media de relación señal a ruido por lo que es la variable que más influye en los resultados del ensayo de impacto. Sin embargo, los otros parámetros también influyen de forma significativa. Los valores en este caso son 25 voltios, 133 mm/min de velocidad de avance y 225 pulg/min de velocidad de alimentación de alambre.



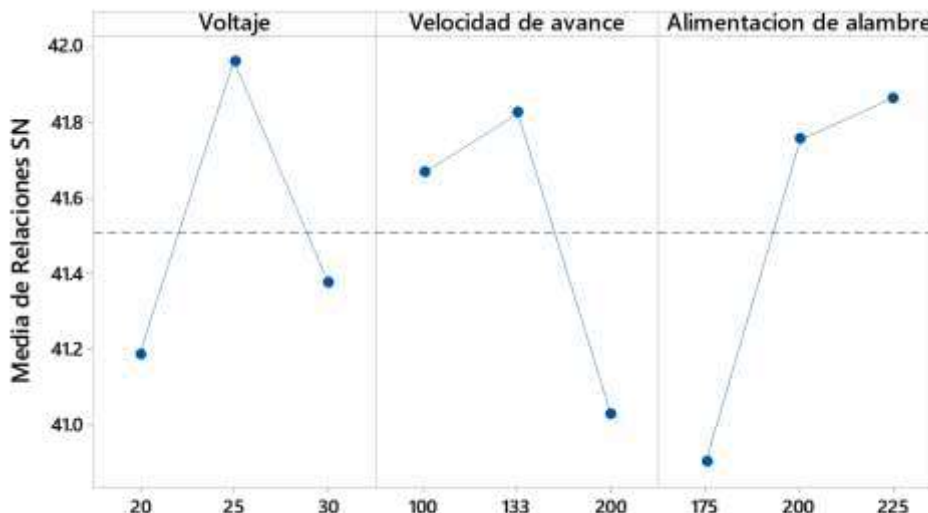
Señal a ruido: Más grande es mejor

Figura 3.17. Gráfica de efectos principales para relaciones señal a ruido en el caso del ensayo de impacto.

(Fuente: Propia)

3.1.3.4. Modelo combinado

La Figura 3.18. muestra las gráficas de efectos principales para las razones de señal/ruido cuando se toman en cuenta las tres propiedades anteriores que son dureza, tensión y la energía absorbida por lo que de esta gráfica se obtienen los valores de los niveles que ofrecen mejores resultados en las propiedades mecánicas analizadas. Estos valores se consideran como los óptimos para la experimentación que se realizó.



Señal a ruido: Más grande es mejor

Figura 3.18. Gráfica de efectos principales para relaciones señal a ruido para el modelo óptimo del proceso estudiado.

(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

3.2.1 Comportamiento químico-metalúrgico del material base.

Es necesario comprobar la naturaleza química y metalúrgica del metal base utilizado para la soldadura, además se debe comprobar el grado del acero estructural A588 para lo cual el ensayo de composición química mostrada en la Tabla 3.1, realizada al material base indica que se trabajó con un acero de bajo carbono con manganeso, la presencia de carbono en el acero es 0,119%C, por lo tanto, el diagrama Hierro-Carbono indica que en esta zona se tiene una microestructura que consiste en ferrita más perlita. En las micrografías se puede comprobar que la microestructura está conformada por granos de ferrita y perlita alineados en la dirección del laminado. El ensayo de composición química da como resultado que el material con el que se trabajó se trata de un ASTM A588 grado A según los porcentajes de los elementos aleantes encontrados en el acero.

El cálculo de carbono equivalente que se realizó para determinar la soldabilidad del material mostró que las placas no necesitarían precalentamiento, tampoco tratamiento post-soldadura. El valor obtenido es 0.552, el cual se encuentra por debajo de lo establecido por el código AWS.

3.2.2. Ensayo de doblado

En primera instancia se tienen los resultados de doblado donde a diferencia de la muestra en condiciones normales, todas las demás resultan rechazadas según el código AWS D1.1. Esto se debe a que la velocidad de alimentación de alambre en la muestra en condiciones normales es mayor por lo tanto la tasa de deposición en esta soldadura fue mayor y la fusión más efectiva. Esto se hace evidente cuando en las películas radiográficas se puede encontrar faltas de fusión a lo largo del cordón de las muestras P1 y P8 que se soldaron con la velocidad de alimentación de alambre más baja. Anteriormente se mencionaron los inconvenientes que se tuvieron en el proceso de soldadura del pase de raíz. Sin embargo, esto se debe a que existen faltas debido a una baja en la alimentación del alambre de soldadura, esta velocidad de alimentación de alambre se encuentra estrechamente ligada a la corriente de soldeo y por lo tanto existe una afectación en la penetración y fusión del material de aporte.

En el ensayo de doblado, ciertas probetas presentan fracturas o fallas en el pase de raíz, mas no en la sobremonta, tal es el caso de las muestras 7 y 9, en la muestra 9 se observa que las probetas de doblado de cara no se encuentran indicaciones y en la muestra 7 las

probetas de doblado de cara si resultan aprobadas según el código AWS D1.1, tiene una fractura total de una probeta de doblado de raíz.

3.2.3. Comportamiento mecánico de las juntas soldadas

Para analizar el comportamiento mecánico de la soldadura de las diferentes muestras se usan los resultados de los ensayos de tensión de sección reducida, ensayos de impacto y dureza relacionando con los parámetros usados en cada caso y se complementa el análisis con las imágenes obtenidas de micrografías y macrografías.

3.2.3.1. Muestra P1

Esta muestra se soldó con los valores de 20 V, 200 mm/min de velocidad de avance y 175 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. En la micrografía se encontró ferrita Widmanstätten en la zona del cordón de soldadura, esta microestructura es indeseable porque aporta fragilidad al material y se forma cuando hay altas temperaturas y el enfriamiento es demasiado rápido que no permite la formación de ferrita intergranular. Esta probeta destaca por la gran cantidad de inclusiones presentes en la zona afectada por el calor y en el cordón, estas inclusiones son sulfuros y silicatos que reducen las características positivas en el acero. En la ZAC para esta muestra se encontró formación de bainita acicular, lo que se puede comprobar con la dureza de 30 HRC, que corresponde a un valor de dureza presente en ese tipo de microestructura, tal como se puede ver en la Tabla 3.7. Adicionalmente en la macrografía se puede observar que es la probeta con mayor número de pases, en total seis, y la Tabla 3.7. indica que esta muestra tiene el valor más pequeño de ZAC. Esto se debe a que tal como se explica en el apartado 3.1.3.4. los valores menos deseables para los parámetros de soldadura coinciden con los que se usaron para soldar esta muestra. El voltaje es bajo por lo que no se puede asegurar estabilidad en el arco de soldadura que provoca la obtención de cordones angostos y con excesiva sobremonta, la velocidad de avance es alta por lo que no se consigue una buena presentación del cordón y se imparte menor energía térmica a lo largo de la soldadura. Por último, la velocidad de alimentación de alambre es baja lo que provoca penetración deficiente y una baja en la tasa de deposición del material de aporte.

Todos estos factores combinados conducen a que se encuentren faltas de fusión entre los pases en toda la longitud de la junta soldada que se hallaron en el ensayo de radiografía. En la sección 3.1.2.2. se explica que este tipo de defecto se puede confundir con el tipo de escoria alargada ya que tienen una apariencia similar cuando se ven en la película radiográfica. El ensayo de tensión de sección reducida confirma que a lo largo del cordón

de soldadura se presentan las faltas de fusión puesto la fractura fue de naturaleza frágil y además se puede ver claramente la falta de fusión en la Figura 3.19.



Figura 3.19: Superficie de fractura de la probeta P1, se puede observar la falta de fusión presente en la zona de soldadura de la probeta y además se evidencia la fractura frágil ya que la sección reducida fallo sin haberse deformado.

(Fuente: Propia)

Esta muestra obtuvo el valor promedio de resistencia a la tensión más bajo del experimento (481,2 MPa), este valor está por debajo del valor mínimo aceptado para el material base según la AWS (485 MPa), con las discontinuidades presentes en la junta soldada los valores de resistencia a la tensión de las probetas ensayadas tuvieron una diferencia de 40,8 MPa, lo que pone en evidencia la falta de uniformidad a lo largo del cordón de soldadura. Asimismo, el ensayo Charpy mostró el valor promedio de 70 J, que es el valor más bajo de todo el experimento, en la Figura 3.2. se observa que los valores obtenidos de las tres probetas son dispersos, las secciones de fractura del ensayo Charpy presentaron faltas de fusión.

La dureza de esta junta soldada fue de 90,6 HRB, que, en contraste con las demás muestras del experimento, es el valor más alto, de la misma manera la zona afectada por el calor tuvo un inusual valor de 30 HRC, estos valores reflejan que, debido al número de cordones de soldadura, la junta soldada no tuvo tiempo de enfriarse adecuadamente lo que dio paso a la formación de ferrita Widmanstatten en la zona de crecimiento columnar de la zona de fusión y también dio paso a la formación de bainita acicular en la ZAC tal como se mencionó anteriormente. La combinación de los valores de los parámetros para esta muestra del experimento según Taguchi es la más deplorable y resulta en una junta soldada con baja calidad, poca uniformidad y los peores resultados en lo que respecta a las propiedades mecánicas.

3.2.3.2. Muestra P2

Esta junta soldada fue realizada con un voltaje de 20 V, 133,33 mm/min de velocidad de avance y 200 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. En las imágenes de micrografía se observa la presencia de granos alargados de ferrita a partir de los cuales se desarrollan granos de ferrita tipo agujas, se trata de ferrita Widmanstätten en la junta soldada, además de esta microestructura también se encontró perlita de grano grueso rodeada por una red de ferrita, la diferencia con el material base es que la presencia de perlita es en un porcentaje menor, además se evidencia desorganización de los granos, la ZAC también muestra perlita de grano grueso rodeada por una red de ferrita de límite de grano. En esta junta soldada fueron necesarios 5 cordones de soldadura, el valor promedio de la ZAC es de 4,13 mm, que es una zona amplia lo que habla de una difusividad térmica baja y por lo tanto el enfriamiento fue más lento si se la compara con la probeta P1, este enfriamiento posiblemente permitió la formación de perlita fina en el material de aporte y el cordón de soldadura.

Esta probeta obtuvo el valor promedio más alto en resistencia a la tensión (565 MPa), las faltas de fusión en estas probetas se encuentran alineadas transversalmente, permitiendo al material deformarse plásticamente teniendo una fractura tipo dúctil de copa y cono. Esta probeta se soldó con el valor más bajo de velocidad de avance y el valor medio de alimentación de alambre lo que permitió una mejor fusión, y una mayor tasa de deposición en la junta soldada, lo que resultó en un cordón de soldadura con menos discontinuidades. Esta probeta tiene también un valor promedio de 131 J en el ensayo de impacto, las probetas ensayadas muestran una diferencia de 38 J, lo cual indica poca uniformidad en la longitud del cordón de soldadura, los resultados del ensayo Charpy se traducen en una gran tenacidad y ductilidad. La dureza promedio de la junta soldada es de 86,4 HRB, esta dureza resultante en esta zona de la soldadura tiene 1 HRB más que el material base.

3.2.3.3. Muestra P3

Esta junta soldada fue realizada con un voltaje de 20 V, 100 mm/min de velocidad de avance y 225 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. En este caso las variables de velocidad de alambre y velocidad de alimentación de alambre son los más baja y alta del experimento, respectivamente. Esto aseguró una mejor penetración y fusión en la soldadura. En la junta soldada se puede ver la presencia de varias microestructuras, las micrografías muestran formación de ferrita Widmanstätten, perlita en matriz ferrítica, ferrita de grano fino, perlita de grano grueso rodeada por una red de ferrita, estas microestructuras están dispuestas de manera que la presencia de ferrita con perlita se

concentra en la zona de la sobremonta, mientras que la ferrita Widmanstatten y la ferrita de grano fino se encuentra en la zona de la raíz de la junta soldada. La ZAC tiene un valor promedio de 2,83 mm, que es el segundo valor más bajo después de la muestra 1, se debe a que en este caso la velocidad de avance es baja al igual que el voltaje, esta combinación de parámetros hicieron necesarios únicamente dos pases de soldadura además del pase de raíz, por lo tanto, no se calentó mayormente al material base.

En esta muestra se tiene una adecuada resistencia en el ensayo de impacto, el valor promedio obtenido es de 151 J, dentro del experimento esta muestra tiene el segundo valor más alto de resistencia al impacto, las probetas para el ensayo Charpy muestran uniformidad en los valores obtenidos, por otro lado el valor promedio de resistencia a la tensión es 520,35 MPa el cual es un valor aceptable ya que las probetas para este ensayo mostraron una diferencia considerable de 60,5 MPa, la zona de fractura de una de las probetas muestra faltas de fusión, razón por la cual se presenta esa diferencia en el resultado del ensayo, el tipo de fractura es dúctil con falla en la junta soldada, con respecto a la dureza el valor promedio obtenido en la junta soldada es de 85 HRB que resulta ligeramente inferior a la dureza del metal base, lo cual no es lo recomendable en una junta soldada.

3.2.3.4. Muestra P4

Esta junta soldada fue realizada con un voltaje de 25 V, 200 mm/min de velocidad de avance y 200 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. En esta muestra se observa en general un comportamiento parecido a nivel microestructural, se tiene crecimiento columnar de ferrita y en la zona entre pases se observa ferrita de grano fino, con presencia de ferrita Widmanstatten. La presencia de inclusiones es escasa. En esta junta soldada fueron necesarios cuatro pases de soldadura adicional al pase de raíz. La ZAC tiene un tamaño promedio de 2.89 mm, este valor se encuentra entre los más bajos del experimento, debido a la alta velocidad de avance, no se permitió mayor transferencia de energía al material.

Los ensayos mecánicos muestran un valor aceptable de resistencia a la tensión, el valor promedio obtenido es de 559,25 MPa, las probetas tuvieron una fractura tipo dúctil, con valores muy cercanos. De la misma manera en el ensayo Charpy se tiene que las probetas no variaron tanto en su valor, el valor promedio de resistencia al impacto es de 147 J. Estos resultados manifiestan la uniformidad de esta junta soldada, debido a la correcta combinación de parámetros de soldadura. La dureza promedio de la junta soldada es de 86 HRB, que es mayor al valor de la dureza del material base. Dándole buenas propiedades

mecánicas. Aunque se encontraron varias indicaciones como inclusiones de escoria, fusión incompleta y exceso de penetración debido a la gran tasa de deposición y la velocidad de avance rápida que no permitieron darles buena forma a los cordones y se dificultó la limpieza entre pase y pase.

3.2.3.5. Muestra P5

Esta junta soldada fue realizada con un voltaje de 25 V, 133,33 mm/min de velocidad de avance y 225 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. El número de pases necesarios en esta junta soldada fueron tres, adicional al pase de raíz, el comportamiento microestructural que se observa es que se tiene crecimiento columnar en el área de la sobremonta del cordón de soldadura, en la parte central se tiene una zona uniforme donde se encuentra ferrita de grano grueso, se tiene también la presencia de ferrita Widmanstätten, los valores de los parámetros de soldadura para este caso evidencian que la combinación de mayor voltaje y mayor velocidad de alimentación del alambre provocan un incremento en la tasa de deposición de material de aporte y un aumento del tamaño del arco por lo que se consiguen cordones más gruesos. La ZAC tiene un tamaño de 3,95 mm, lo cual muestra que hubo una mayor transferencia de energía al material base.

En este caso el valor promedio del ensayo de resistencia al impacto es el más alto con 175 J, lo que significa que fue la muestra que más energía absorbió. Esta probeta se soldó con un voltaje mayor a las anteriores lo que supondría un arco más amplio y estable y la velocidad de alimentación de alambre cuenta con el valor más alto por lo que la corriente es mayor, en esta probeta se encontró perlita gruesa lo que explica la buena resistencia a la tensión que toma el valor de 556,7 MPa, por último, la dureza de la junta soldada resultó menor a la del material base (82,5 HRB). El ensayo de dureza mostró que los valores de las probetas marcan la misma tendencia de ser valores altos en la zona afectada por el calor para luego bajar la dureza en el material de aporte a un valor igual o menor a la dureza de material base.

3.2.3.6. Muestra P6

En la Figura 3.9. que corresponde a la macrografía de esta probeta se puede observar la amplia zona de crecimiento columnar del pase superior que esta junta tiene. En esta zona de crecimiento columnar se distingue la presencia de granos gruesos y alargados de ferrita Widmanstätten y también en las micrografías de esta zona se detecta ferrita acicular con formaciones de perlita. La ZAC cuenta con granos finos de ferrita y perlita formados a partir de la descomposición de la estructura del material base y se pierde orden en el sentido de los granos en la zona de transición entre el metal base y la soldadura. Ya que esta probeta

se soldó con 25 voltios, 100 mm/min de velocidad de avance y 175 [pulg/min] en velocidad de alimentación de alambre se obtuvo un arco estable y ancho y esa baja velocidad permitió que el acabado del pase superior sea el adecuado.

Tal como se muestra en la Tabla 3.3. los defectos encontrados se limitan a la presencia de inclusiones de escoria y a penetración excesiva. El ensayo de tensión revela un resultado aceptable de resistencia con 539,45 MPa, en decir con 54,45 MPa por sobre la resistencia del material base. De la misma manera en el ensayo de impacto se obtuvo 135 J de promedio en la energía de impacto. En dureza el material de soldadura obtuvo 82,2 HRB, este valor es menor a la del material base (86 HRB) por lo que no satisface el criterio de que la dureza debe ser mayor en la soldadura que en el material base. Estos resultados demuestran que esta probeta cuenta con una combinación de niveles de los parámetros de soldadura de la que se obtuvieron resultados aceptables.

3.2.3.7. Muestra P7

Los parámetros para ejecutar la soldadura de esta muestra fueron 30 voltios, 200 mm/min de velocidad de avance de soldadura y 225 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. Es decir, esta junta se soldó con los valores más altos dentro de arreglo ortogonal del experimento. El voltaje y la velocidad de alimentación de alambre generaron una deposición de material de aporte alta si se la compara con las demás probetas del proceso. Esto produce mayor calentamiento que otras probetas y por lo tanto la zona afectada por el calor es de las más grandes tal como se lee en la Tabla 3.7. Por lo que nuevamente se encontró una microestructura de ferrita más perlita y en la zona afectada por el calor, la existencia de una matriz de granos de ferrita con formaciones intergranulares de perlita.

En la ZAC también se encuentran gran cantidad de granos alargados de ferrita Widmanstätten y en la soldadura se revela el típico crecimiento de grano columnar del material de aporte en la soldadura. Estas características similares a las de todas las demás probetas. Los resultados del ensayo de tensión posicionan a esta probeta por sobre lo aceptable con un valor de 495,35 MPa aunque este valor es de los más cercanos a la resistencia a la tensión que tiene el material base y está por debajo de la mayoría de muestras a pesar de que la fractura que se presentó fue de característica dúctil con presencia de aristas en los extremos de la superficie de la fractura y deformación plástica de copa y cono como se observa en la Figura 3.20. y en cuanto al ensayo de impacto se registró el resultado de 120 J lo que significa que no tiene un valor tan alto respecto a los demás especímenes.

En la dureza el cordón de soldadura obtiene una dureza promedio de 82,8 HRB que está por debajo de lo esperado que es 85 HRB del material base resultado de la presencia de ferrita acicular de grano grueso en toda la zona de crecimiento columnar. Estos resultados reflejan que a pesar que los valores de los ensayos son aceptables en cuanto a propiedades mecánicas, si se la compara con las demás muestras, este espécimen no refleja resultados sobresalientes.



Figura 3.20: Superficie de fractura de la P7.

(Fuente: Propia)

3.2.3.8. Muestra P8

Los parámetros de soldadura para la muestra P8 fueron 30 voltios, 133 mm/min de velocidad de avance y 175 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. Esta probeta al ser soldada con el voltaje más alto del experimento tiene el arco de soldadura ancho y una zona de crecimiento columnar ancha compuesta por ferrita acicular con zonas más oscuras que corresponden a formaciones de perlita. En la zona de entre pases de soldadura se encuentran estructuras de grano fino de ferrita con perlita intergranular que serían estructuras similares a las estructuras de las demás probetas solo que en este caso se destaca la presencia de inclusiones en el material de soldadura. El ensayo de tensión revela un valor de 517,7 MPa y el ensayo de impacto 135 J. Ambos valores, como en la probeta P7, están sobre lo aceptable pero no destaca por tener mejores propiedades mecánicas en el experimento.

Adicionalmente el material presentó una fractura dúctil y se deforma plásticamente antes de la rotura. La dureza de este material fue de 80,2 HRB y se debe a la gran presencia de inclusiones no metálicas y granos gruesos de ferrita acicular. En esta probeta se encontraron porosidades, fusiones incompletas y mordeduras debido que se usó el voltaje más alto y se bajó la corriente por medio de la velocidad de alimentación de alambre.

3.2.3.9. Muestra P9

La muestra P9 contó con varios tipos de discontinuidades de escoria alargada, falta de fusión entre pases, porosidades e inclusiones de escoria. Ya que se soldó con 30 voltios esta tuvo un arco de soldadura más ancho por lo que esta probeta es la que tiene el cordón más ancho de todos. La alimentación de alambre de 200 [pulg/min] y la velocidad de avance de 100 mm/min influyen en la presencia de los defectos puesto que la velocidad de avance al ser la más baja del arreglo ortogonal provoca que el arco de soldadura no actúe sobre el material base, sino más bien que lo haga sobre el charco de soldadura, provocando una reducción en la penetración efectiva. Esto ocasionó también una excesiva sobremonta del cordón de soldadura que no se acepta bajo los criterios de inspección del código AWS D1.1. La ZAC de esta probeta es la mayor puesto que la velocidad de avance al ser menor y el arco de soldadura ser más ancho hace que se caliente más el material base. En esta probeta se encontró formaciones de ferrita en los bordes de grano de austenita previamente formada y granos gruesos de ferrita Widmanstätten. Los valores de tensión y Charpy fueron 528,65 MPa y 129 J respectivamente. La dureza de la junta soldada resultó de 79,2 HRB. Estos valores indican que a pesar que la dureza de este espécimen baja drásticamente debido a las láminas de gran tamaño de ferrita con perlita, las propiedades de resistencia a la tensión y tenacidad, la tenacidad del material, esta probeta están sobre los requerimientos mínimos aceptables.

3.2.3.10. Muestra CN

Por último, la muestra CN se refiere al cordón de soldadura que se soldó con 24 voltios, 115 mm/min de velocidad de avance y 300 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. Esta probeta no forma parte del experimento ni del arreglo ortogonal del método de Taguchi. Sin embargo, se la realizó ya que una vez realizado el arreglo ortogonal se propone realizar una muestra con valores de los parámetros de soldadura típicamente usados por el Laboratorio de Soldadura de Escuela Politécnica Nacional en aceros estructurales con el proceso GMAW y comparar los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos.

Los valores que se obtuvieron en esta probeta en cuanto al ensayo de tensión y de impacto fueron 556.5 MPa y de 111 J, respectivamente. En la dureza de la junta soldadas se encuentra un valor de 86,2 HRB. Son valores en las propiedades mecánicas equilibrados ya que superan los criterios de aceptación mínimos impuestos por el material base y además se consigue un aspecto físico del cordón adecuado. Se registran pocas indicaciones en el interior de la soldadura como inclusiones de escoria y además es la

única soldadura que pasa el ensayo destructivo de doblado de cara y raíz. Esto se debe a que la velocidad de alimentación de alambre en esta muestra es mucho mayor a las que se usaron para la utilización del método de Taguchi en las nueve muestras anteriores. Por lo tanto, la corriente fue mayor y sumado a que la velocidad de soldadura es de tan solo 115 mm/min ocasionó que la tasa de deposición del material sea mayor, provocó un incremento en la profundidad y penetración efectiva de la soldadura y aumentó el tamaño del cordón por lo que evitó que se formaran fusiones incompletas que están presentes en las demás probetas.

3.2.4. Efectos principales señal/ruido

Al analizar las gráficas de efectos principales señal/ruido es importante tomar en cuenta la pendiente de los parámetros para cada propiedad. Así se tiene que en la Figura 3.15. todos los parámetros muestran pendientes similares, esto quiere decir que tanto el voltaje como la velocidad de avance y la velocidad de alimentación de alambre influyen de igual manera en la resistencia última a la tensión. Además, se puede observar que los valores más altos para tensión se obtuvieron con los niveles medios de cada parámetro por lo que la tensión como propiedad queda determinada por otro tipo de variables como por ejemplo la elección del material de aporte.

En el caso de la Figura 3.16. que corresponde a la dureza del material de aporte ya existe una clara diferencia en cuanto a las pendientes de las curvas de los parámetros. Donde el voltaje es el parámetro que mayor influencia tiene sobre la dureza, seguido por la velocidad de avance y una influencia casi nula por parte de la velocidad de alimentación de alambre. El voltaje determina la longitud de arco, si este valor es mayor, la longitud de arco es mayor y por lo tanto se genera más calor en el depósito de material.

Todas las probetas se enfriaron al aire en el mismo ambiente por lo que aquí se tuvo un calentamiento mayor y un enfriamiento igual de rápido lo que permitió la formación de estructuras aciculares y amplias zonas de grano pequeño en la zona afectada por el calor. La Figura 3.17. muestra que todos los parámetros influyen de forma importante en la resistencia al impacto Charpy y que el voltaje se mantiene con la tendencia de que el valor medio ofrece los mejores resultados al contrario de la velocidad de alimentación de alambre que muestra que aquí el nivel más grande es el que interviene mejor en la resistencia al impacto. Por último, la Figura 3.18. muestra los valores óptimos en un análisis global de las tres propiedades mecánicas.

Los valores que arrojan los mejores resultados en los ensayos son de 25 V de tensión, 133 mm/min de velocidad de avance y 225 [pulg/min] de velocidad de alimentación de alambre. El voltaje es mejor en su valor medio ya que brinda una longitud de arco media, porque si

el arco es demasiado largo se puede formar un ancho indeseable, mucho calor y tendencia a la formación de porosidades y si por el contrario la longitud de arco es muy corta existe a posibilidad de inclusiones de escoria, poca penetración, menor cantidad de calor para la fusión del material de aporte y la posibilidad de que se interrumpa el arco y el electrodo se pegue al material base. La velocidad de avance también tiene como óptimo al valor 133 mm/min y la velocidad de alimentación de alambre tiene el valor de 225 [pulg/min]. Ya que de esa manera se asegura una buena penetración y la fusión del metal. Se evitan abultamientos y cordones con incrustaciones de escoria o porosidades.

4. CONCLUSIONES

- En este trabajo de titulación se logró cumplir con los objetivos planteados que consistían en establecer las variables del proceso de soldadura para realizar la experimentación de diferentes muestras soldadas, analizar los resultados de los ensayos realizados a los cordones de soldadura y obtener los valores de los parámetros que mejores resultados consiguieron en las propiedades mecánicas de las soldaduras.
- A partir de los ensayos mecánicos realizados sobre todas las muestras de soldadura se determinó que únicamente la probeta soldada con 24 V, 300 [pulg/min] de alimentación de alambre y velocidad de soldadura de 115 mm/min, se considera aceptable bajo los criterios establecidos por el código AWS D1.1.
- El arreglo ortogonal permitió determinar que el parámetro de soldadura que más influencia tiene sobre las propiedades mecánicas es el voltaje.
- La ejecución de la soldadura y los resultados de los ensayos de radiografía industrial y doblado permitieron evidenciar la calidad de cada junta soldada confirmando que la probeta P1 obtuvo las propiedades mecánicas más bajas dentro del experimento, con 70 J en el ensayo de impacto y 481,2 MPa, y faltas de fusión entre pases a lo largo de todo el cordón.
- Según el método de Taguchi la probeta que muestra las mejores propiedades mecánicas y las mejores características del cordón de soldadura es la probeta P5, que fue soldada con tensión de 25 V, velocidad de alimentación de alambre de 225 [pulg/min] y velocidad de avance de 133 mm/min.
- Los valores de los parámetros de la probeta P5, son los valores óptimos de soldadura para este experimento, sin embargo, ninguna probeta, incluyendo la probeta P5, pasó el ensayo de doblado.
- Los parámetros de soldadura que combinados produjeron mayor cantidad de defectos fueron 20 V y 175 [pulg/min] ya que la tensión y la corriente no son adecuados para asegurar una buena penetración ni fusión entre pases de soldadura.

- El ensayo de micrografía muestra que en todas las probetas se encuentra ferrita Widmanstatten que se obtuvo debido a que no hubo un control adecuado de la temperatura de enfriamiento ni del tiempo de espera entre pases.
- El valor de dureza obtenido en la zona afectada por el calor de la probeta P1 es 30 HRC lo que lo convierte en el valor más alto de todas las durezas obtenidas en el ensayo, siendo 16,57% mayor al valor que se presenta en el material base y esto se debe a la transformación que sufrió el material base de microestructura ferrita-perlita a ferrita Widmanstatten y formación de bainita acicular en la ZAC.

Referencias Bibliográficas

- Acuña Rivera, M. (2019). *Estudio de la influencia de la incorporación de arenas ferrosas como parte del fundente utilizado e el proceso de soldadura por arco sumergido sobre las propiedades mecánicas y microestructura de juntas soldadas de acero ASTM A572 (Tesis de Posgrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- American Welding Society Inc. (1993). *ANSI/AWS A5.18-93: Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding*. Miami: American Welding Society Inc.
- ASTM Internacional. (2017). *ASTM A370-17: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products*. Estados Unidos.
- ASTM International . (2013). *ASTM E8/E8-13a: Standard test methods for tension testing of metallic materials* . Estados Unidos .
- ASTM International. (2015). *ASTM A588/A588M-15: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 0 ksi [345 MPa] Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance*. Estados Unidos.
- AWS American Welding Society . (1993). *AWS A5.18-93: Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding*. Estados Unidos.
- AWS American Welding Society. (2015). *AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code - Steel* . Estados Unidos .
- Campos Terán , J., & Jaramillo Flores, L. (2019). *Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de juntas soldadas de acero ASTM A572 tratadas térmicamente (Tesis de Pregrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Cevallos, M. d., & Cineros, M. (2013). *Estudio de soldabilidad de aceros inoxidables y aceros al carbono mediante el proceso GTAW sin material de aporte (Tesis de pregrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Electrodos Infra. (26 de Septiembre de 2007). *Manual de electrodos para soldar*. Obtenido de Electrodo Infra Sitio Web:
http://www.infrasur.com.mx/uploads/manuales/soldadura/manual_electrodos/introduccion.pdf
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- Gutiérrez, H. (2008). *Análisis y diseños de experimentos*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- Hidalgo, D. (2007). *Cálculo y análisis del régimen de soldadura para el proceso SMAW en aceros al carbono y aleados y la implementación del software aplicación*. (Tesis de pregrado). Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- INDURA. (15 de Julio de 2013). *Manual de sistemas y materiales de soldadura*. Obtenido de
<http://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Soldadura%20INDURA?path=%>

2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2F00da6ac5e6754e428ecd94f1c78711cb.pdf

- Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y tecnología. Quinta Edición*. México: Pearson Educación .
- Lincoln Electric . (9 de Abril de 2012). *Soldadura semiautomática con gas de protección (MIG-MAG)*. Obtenido de <https://www.solysol.com.es/data/documents/SoldaduraMIGMAG.pdf>
- Lincoln Electric. (16 de 08 de 2019). Obtenido de [https://www.lincolnelectric.com/es-es/Equipment/Pages/product.aspx?product=K1728-12\(LincolnElectric_EU_Base\)](https://www.lincolnelectric.com/es-es/Equipment/Pages/product.aspx?product=K1728-12(LincolnElectric_EU_Base))
- Minitab . (7 de Junio de 2017). *Soporte de Minitab 18*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/factorial-plots-and-scatterplots/>
- Reina Guzmán, W. (2013). *Optimización del desempeño funcional de los sacos de polipropileno mediante el diseño experimental de Taguchi (Tesis de Posgrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Sierra, M. (2018). *Caracterización de la soldadura del acero ASTM A588 mediante el proceso GMAW modificado con aporte de arenas ferrosas (Tesis de Pregrado)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Soporte de Minitab 18. (8 de Junio de 2017). *Catálogo de diseños de Taguchi*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/catalogue-of-taguchi-designs/>
- Tobar Castro, E. (2015). *Estudio de las transformaciones metalográficas y propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor (ZAC) después del proceso de soldadura en los aceros ASTM A588 y A36 (Tesis de Pregrado)*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.