



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DETERMINACIÓN DEL RANGO ÓPTIMO DE LAS VARIABLES
DE SOLDADURA E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL DE CALIDAD EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN
DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE LA PLANTA INDUSTRIAL
INSTRUMENTAL INC.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

CARLOS ALFONSO HERNÁNDEZ SALINAS

carlos.2106_mhxepn@hotmail.com

DIRECTOR: ING. IVÁN ZAMBRANO OREJUELA

ivan.zambrano@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **CARLOS ALFONSO HERNÁNDEZ SALINAS**, bajo mi supervisión.

Ing. Iván Zambrano Orejuela
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Homero Barragán
CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **CARLOS ALFONSO HERNÁNDEZ SALINAS**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Carlos Alfonso Hernández Salinas

DEDICATORIA (Opcional)

(Arial, negrita, centrado, 14)

AGRADECIMIENTO (Opcional)

(Arial, negrita, centrado, 14)

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	
Alcance	
CONTROL DE CALIDAD Y MEJORAMIENTO CONTÍNUO	3
1.1. Introducción	
1.2. Etapas de la Calidad	
1.2.1. Control de Calidad	4
1.2.2. Aseguramiento de la calidad	
1.2.3. Calidad total.....	5
1.3. Mejoramiento continuo.....	6
1.3.1. Herramientas de Calidad	7
1.3.1.1. Lista de verificación (Checklist).....	8
1.3.1.2. Diagramas de Flujo	
1.3.1.3. Diagrama de Pareto	
1.3.1.4. Diagrama de Causa – Efecto (Ishikawa)	9
1.3.1.5. Histograma	
1.3.1.6. Diagrama de dispersión o correlación	
1.3.1.7. Estratificación	
1.3.1.8. Gráficos de Control.....	10
1.4. Innovación	
1.4.1. Tipos de Innovación	
1.4.1.1. Innovación de Producto	11
1.4.1.2. Innovación de Proceso	
1.4.1.3. Innovación Comercial	
1.4.1.4. Innovación Organizativa	
1.4.1.5. Innovación Incremental	12
1.4.1.6. Innovación radical	
1.5. Teoría muestral	
1.5.1. Población.....	13
1.5.2. Muestra	
1.5.3. Muestreo estadístico	
1.5.4. Tipos de Muestreo	
1.5.4.1. Muestreo no probabilístico	
1.5.4.2. Muestreo Aleatorio Simple	13

1.5.4.3.	Muestreo Sistemático o Secuencial	14
1.5.4.4.	Muestreo Estratificado	
1.5.4.5.	Muestreo por conglomerados	
1.6.	Control estadístico de procesos	
1.6.1.	Variabilidad en el proceso de producción.....	15
1.6.1.1.	Causas comunes	16
1.6.1.2.	Causas especiales	
1.6.1.3.	Variación.....	17
1.6.2.	Cartas de Control	
1.6.2.1.	Límites de Control	
	PROCESO DE SOLDADURA DE ESTRUCTURAS METÁLICAS.....	19
2.1.	Introducción	
2.1.1.	Clases de aceros	
2.1.2.	Acero Estructural	20
2.1.3.	Propiedades del acero estructural.....	21
2.2.	Soldabilidad en los aceros	23
2.3.	Procesos de soldadura para estructuras metálicas	26
2.3.1.	Proceso de Soldadura SMAW (Shielded Metal Arc Welding)	
2.3.1.1.	Electrodos del proceso SMAW.....	28
2.3.2.	Proceso de Soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding).....	30
2.3.2.1.	Equipo de soldadura	31
2.3.2.2.	Transferencia por cortocircuito.....	32
2.3.2.3.	Transferencia globular	33
2.3.2.4.	Transferencia en spray	34
2.3.2.5.	Materiales de aportación.....	35
2.3.3.	Proceso de Soldadura FCAW (Flux Cored Arc Welding).....	36
2.3.3.1.	Soldadura auto protegida (Innershield).	37
2.3.3.2.	Soldadura con protección gaseosa (gas-shielded ó outershielded)	
2.3.3.3.	Gases de Protección.....	38
2.3.3.4.	Materiales de aportación	
2.4.	Monopolos	40
2.4.1.	Proceso de fabricación de Monopolos	41
2.4.2.	Definición de los problemas de soldadura.....	43
	ANÁLISIS DE DATOS DEL PROCESO DE SOLDADURA	45
3.1.	Diseño experimental	
3.1.1.	Tipos de variabilidad	47
3.1.1.1.	Variabilidad sistemática y planificada	

3.1.1.2.	Variabilidad típica de la naturaleza del problema y del experimento.....	47
3.1.1.3.	Variabilidad sistemática y no planificada.....	48
3.1.2.	Realización de experimentos	
3.1.2.1.	Inconsistencia de los datos.....	49
3.1.2.2.	Variables con fuerte correlación	
3.1.2.3.	El rango de las variables controladas es limitado.....	50
3.2.	Análisis de datos del proceso de soldadura	
3.2.1.	Definición de los objetivos del ensayo.....	52
3.2.2.	Identificación de las fuentes de variación	
3.2.3.	Regla de asignación de las unidades experimentales.....	53
3.2.4.	Realización del ensayo	
3.2.5.	Ensayos de doblado	
3.2.5.1.	Radiografía de las probetas del ensayo.....	55
3.2.5.2.	Macrografías del ensayo.....	56
3.2.5.3.	Micrografías del ensayo.....	60
3.2.5.4.	Análisis estadístico de las variables de soldadura.....	64
3.2.5.5.	Cálculo de 6 SIGMA.....	85
	AJUSTES DEL PROCESO DE SOLDADURA.....	87
4.1.	Análisis de datos del proceso de soldadura	
4.1.1.	Diagrama de causa – Efecto (Ishikawa)	
4.1.2.	Diagrama de Pareto.....	90
4.1.3.	Lista de Chequeo o Verificación.....	92
4.2.	Implementación del control de calidad en el proceso de soldadura	
4.2.1.	Soldabilidad de materiales.....	95
4.2.2.	Plan de control	
4.2.3.	Registro de calibración de equipos.....	96
4.2.4.	Registro de control del proceso.....	97
4.2.5.	Registro de control de calidad de soldadura del producto final.....	98
4.2.6.	Instructivo de operación soldadura.....	101
4.3.	Control estadístico de las variables de soldadura.....	102
4.3.1.	Control de Corriente	
4.3.2.	Control de Voltaje.....	105
4.3.3.	Control de Velocidad.....	108
4.3.4.	Cálculo del 6 sigma del proceso de soldadura.....	111
4.4.	Ensayos y verificación de la soldadura.....	112
4.4.1.	Macrografías de la estructura	
4.4.2.	Micrografías de la estructura.....	116

4.4.3.	Radiografías de la estructura	126
4.4.4.	Ensayos destructivos	128
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		132
5.1.	Conclusiones	
5.2.	Recomendaciones	133
Anexo I.	Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)	138
Anexo II.	Base de datos del proceso de soldadura	139
Anexo III.	Procedimiento de soldadura	140
Anexo IV.	Soldabilidad de los materiales	141
Anexo V.	Plan de control... ..	142
Anexo VI.	Registro de calibración de equipos	143
Anexo VII.	Registro del control del proceso	144
Anexo VIII.	Registro de control de calidad de soldadura	145
Anexo IX.	Instructivo de soldadura.....	146
Anexo X.	Certificado de calidad del producto final	147

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. 1 Círculo de cada una de las calidades.....	4
Figura 1. 2 Las dimensiones de la calidad total del producto	6
Figura 1. 3 Ciclo de mejora continua.....	7
Figura 1. 4 Herramientas de Calidad	8
Figura 1. 5 Tipos de Salida del Proceso	16
Figura 1. 6 Elementos de una carta de control.....	18
Figura 2. 1. Diagrama esfuerzo deformación del acero, propiedades principales.....	21
Figura 2. 2. Diagrama esfuerzo deformación de varios aceros estructurales	23
Figura 2. 3 Efecto del carbono en la soldadura.....	24
Figura 2. 4. Diagrama de Graville para evaluar la soldabilidad de los aceros.	25
Figura 2. 6. Proceso de soldadura SMAW	27
Figura 2. 7. Circuito del Proceso SMAW	27
Figura 2. 8. Polaridad en la soldadura.	28
Figura 2. 9. Electrodo del Proceso SMAW	28
Figura 2. 10 Denominación de los electrodos del proceso SMAW	30
Figura 2. 11. Proceso de Soldadura GMAW	31
Figura 2. 12. Equipo de Soldadura GMAW	32
Figura 2. 13. Transferencia por cortocircuito.....	33
Figura 2. 14. Transferencia Globular.....	34
Figura 2. 15. Transferencia por spray.	35
Figura 2. 16. Designación de los Electrodo del Proceso MIG - MAG.....	36
Figura 2. 17. Soldadura por arco con núcleo de fundente y autoprotección.....	37
Figura 2. 18. Soldadura por arco con núcleo de fundente protegida con gas.....	38
Figura 2. 19. Designación de los electrodos del proceso FCAW.....	39
Figura 2. 20. Estructura de los monopolos.....	40
Figura 2. 21. Montaje de la estructura para monopolos	41
Figura 2. 22. Proceso de fabricación de monopolos.....	42
Figura 2. 23. Defectos de soldadura en la fabricación de monopolos.	44
Figura 3. 1. Modelo de un proceso o sistema.	46
Figura 3. 2. Unión Octógono – Brida.....	51
Figura 3. 3. Unión Octógono – Octógono.....	51
Figura 3. 4 Cantidad de defectos presentes en el ensayo.....	55
Figura 3. 5 Porcentaje de defectos presentes en el ensayo.....	55
Figura 3. 6. Ubicación de la probeta para radiografía.....	55
Figura 3. 7. Radiografía de la junta Octógono – Octógono.	56

Figura 3. 8. Ubicación de la Probeta	57
Figura 3. 9. Macrografía de la probeta 1, zonas afectadas por el calor.	57
Figura 3. 10. Macrografía Probeta 1.	58
Figura 3. 11. Macrografía Probeta 2.	58
Figura 3. 12. Macrografía Probeta 3	59
Figura 3. 13. Ubicación de las zonas analizadas para la micrografía.	60
Figura 3. 14. Microestructuras de los metales base.	61
Figura 3. 15. Micrografía de la soldadura.	61
Figura 3. 16. Micrografía de las zonas afectadas por el calor.	62
Figura 3. 17. Micrografía de la interface ZAC - Material de aporte.	63
Figura 3. 18. Grietas en la zona de soldadura.	64
Figura 3. 19. Diseño de la probeta para análisis de datos.	64
Figura 3. 20. Representación de la corriente de soldadura en los límites de control. ..	66
Figura 3. 21. Representación del Voltaje en los límites de control.	66
Figura 3. 22. Representación de la velocidad de avance de soldadura.	66
Figura 3. 23. Representación de datos del voltaje.	67
Figura 3. 24. Representación de la corriente en el primer pase.	67
Figura 3. 25. Representación de la corriente en el segundo pase.	67
Figura 3. 26. Análisis de datos de Cp y Cpk Corriente.	74
Figura 3. 27. Análisis de datos de Cp y Cpk Voltaje.	76
Figura 3. 28. Esquema de la junta de prueba Octógono - Octógono.	76
Figura 3. 29. Representación del Voltaje en los límites de control.	77
Figura 3. 30. Representación de la Corriente de soldadura en los límites de control. .	78
Figura 3. 31. Representación de la Velocidad de soldadura en los límites de control. .	78
Figura 3. 32. Representación del Voltaje - Probeta O1.	79
Figura 3. 33. Representación del Corriente - Probeta O1.	79
Figura 3. 34. Análisis de datos de Cp y Cpk Corriente.	83
Figura 3. 35. Análisis de datos de Cp y Cpk Voltaje.	84
Figura 4. 1. Diagrama de Pareto	91
Figura 4. 2. Estructura de la documentación para el proceso de Soldadura	93
Figura 4. 3. . Flujograma del Proceso de fabricación de estructuras soldadas.	94
Figura 4. 4. Registro de verificación de soldabilidad de materiales.	95
Figura 4. 5. Plan de control de Soldadura.	96
Figura 4. 6. Registro de calibración de equipos.	97
Figura 4. 7. Registro de control del Proceso.	98
Figura 4. 8. Registro de control de calidad de soldadura.	99
Figura 4. 9. Formato de Certificado de Calidad.	100

Figura 4. 10. Instructivo de operación de soldadura.....	101
Figura 4. 11. Pantalla de ingreso de datos para el cálculo estadístico del control de corriente.....	103
Figura 4. 12. Pantalla estatus del Cp y Cpk, por cada cordón de soldadura.	103
Figura 4. 13. Gráfica de control del primer pase del WPS 01.....	104
Figura 4. 14. Grafica de rangos del primer pase.	104
Figura 4. 15. Significado del estado de las variables	104
Figura 4. 16. Grafica de distribución de frecuencias del primer pase.	105
Figura 4. 17. Pantalla de ingreso de datos para el cálculo estadístico del control de Voltaje	106
Figura 4. 18. Pantalla estatus del Cp y Cpk, por cada cordón de soldadura.	106
Figura 4. 19. Gráfica de control de voltaje del primer pase del WPS 01.....	107
Figura 4. 20. Grafica de rangos de voltaje del primer pase.	107
Figura 4. 21. Grafica de distribución de frecuencias de Voltaje del primer pase.....	108
Figura 4. 22. Pantalla de ingreso de datos para el cálculo estadístico del control de Velocidad.....	109
Figura 4. 23. Pantalla estatus del Cp y Cpk, por cada cordón de soldadura.	109
Figura 4. 24. Gráfica de control de velocidad del primer pase del WPS 01.....	110
Figura 4. 25. Grafica de rangos de velocidad del primer pase.	110
Figura 4. 26. Grafica de distribución de frecuencias de Velocidad del primer pase..	111
Figura 4. 27. Base de cálculo para el nivel sigma del proceso de soldadura.....	112
Figura 4. 28. Macrografía de la probeta BO-1.....	113
Figura 4. 29. Macrografía de la probeta BO-2.....	114
Figura 4. 30. Macrografía de la probeta BO-3.....	114
Figura 4. 31. Macrografía de la probeta BO-4.....	115
Figura 4. 32. Macrografía de la probeta BO-5.....	115
Figura 4. 33. Macrografía de la probeta OC-1.....	116
Figura 4. 34. Macrografía de la probeta OC-2.....	116
Figura 4. 35. Zonas de análisis micrográfico de la probeta unión Octógono - Octógono.	117
Figura 4. 36. Micrografías de los metales base.....	118
Figura 4. 37. Micrografía de la interface del metal base, ZAC y soldadura.....	119
Figura 4. 38. Micrografía de la soldadura.....	120
Figura 4. 39. Micrografías de los metales base.....	121
Figura 4. 40. Interface zona afectada por calor - Metal base (brida y octógono).	123
Figura 4. 41. Interface zona afectada por calor (brida - octógono) y Soldadura.	124
Figura 4. 42. Micrografía de la soldadura.....	125
Figura 4. 43. Radiografía unión octógono - octógono.....	126

Figura 4. 44. Radiografía unión Brida - Octógono.....	127
Figura 4. 45. Doblado de cara de la unión Octógono - Octógono.....	128
Figura 4. 46. Doblado de raíz de la unión Octógono – Octógono.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Aceros estructurales más utilizados en la industria.	22
Tabla 2. 2. Propiedades de los aceros estructurales.	22
Tabla 3. 1 Ensayo de doblado	53
Tabla 3. 2 Detalle de defectos encontrados en el ensayo.	54
Tabla 3. 3. Variables principales del ensayo de la Junta de prueba en “T”	65
Tabla 3. 4. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta A1.	68
Tabla 3. 5. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A2.	68
Tabla 3. 6. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A3.	69
Tabla 3. 7. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A5.	69
Tabla 3. 8. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A6.	69
Tabla 3. 9. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A7.	70
Tabla 3. 10. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta B1.	70
Tabla 3. 11. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta B2.	70
Tabla 3. 12. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta B3.	71
Tabla 3. 13. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta C1.	71
Tabla 3. 14. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta C2.	71
Tabla 3. 15. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta C3.	72
Tabla 3. 16. Valores para el análisis de la Capacidad del Proceso.	72
Tabla 3. 17. Análisis de la Capacidad del proceso y Centramiento del proceso - corriente.	73
Tabla 3. 18. Análisis de la Capacidad del proceso y Centramiento del proceso - voltaje.	75
Tabla 3. 19. Variables principales del ensayo de la Junta de prueba a tope	77
Tabla 3. 20. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O1.	79
Tabla 3. 21. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O2.	80

Tabla 3. 22. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O2.....	80
Tabla 3. 23. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O4.....	81
Tabla 3. 24. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O5.....	81
Tabla 3. 25. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O6.....	81
Tabla 3. 26. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O7.....	82
.Tabla 3. 27. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O8.....	82
Tabla 3. 28. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O9.....	82
Tabla 3. 29. Análisis de la Capacidad del proceso y Centramiento del proceso - Corriente.....	83
Tabla 3. 30. Análisis de la Capacidad del proceso y Centramiento del proceso - Voltaje.	84
Tabla 3. 31. Porcentajes y cantidad de defectos según los niveles “Sigma”	85
Tabla 3. 32. Cálculo del nivel sigma de la variable corriente.	85
Tabla 3. 33Cálculo del nivel sigma de la variable Voltaje.	86
Tabla 4. 1. Observaciones por cada una de las causas.	90
Tabla 4. 2. Frecuencias acumuladas para cada una de las causas.	90
Tabla 4. 3. Tipos de probetas para el análisis macrográfico.....	113

RESUMEN

El presente documento tiene por objetivo determinar el rango óptimo de las variables de soldadura e implementar un sistema de control de calidad en el proceso de fabricación de estructuras metálicas de la Planta Industrial Instrumental Inc., como solución a los continuos reprocesos de soldadura en el producto final, y los reclamos del cliente final, implementado principalmente para las áreas de producción y calidad de la planta industrial, principalmente para la fabricación de monopolos y vigas metálicas.

La metodología desarrollada en el presente proyecto está basada en la teoría del círculo de mejora continua, el control estadístico de procesos y el seis sigma, para la creación de un diseño experimental en el cual se pueden verificar todas las variables con mayor problema y atacarlas directamente incrementando la eficiencia en la producción.

De acuerdo al diseño experimental y a las pruebas realizadas se obtuvieron resultados tales como disminución en un 90% de los defectos de soldadura, mejor identificación en el material producido, mejor apariencia del cordón de soldadura, y un control estadístico del proceso que permite monitorear continuamente las variables principales de soldadura evitando defectos en el producto final.

El trabajo realizado permitió establecer rangos de corriente, voltaje y velocidad de soldadura óptimos en los cuales el proceso es estable evitando defectos en el producto final, lo cual permitió establecer procedimientos de soldadura específicos para cada estructura tomando como referencia los WPS desarrollados para cada tipo de junta, de tal manera que el producto fabricado tenga el respaldo documental permanente.

Palabras clave: Control estadístico, control de corriente, estructuras metálicas, soldadura, velocidad de soldadura, voltaje.

ABSTRACT

The purpose of this document is to determine the optimal range of welding variables and to implement a quality control operation system in the process of manufacturing of metal structures of the Instrumental Inc Company, as a solution to the continuous welding reprocessing in the final product, and claims of the final customer, which is implemented mainly for the production and quality areas of the industrial plant, mainly for the manufacture of monopoles and metal beams.

The methodology developed in the present project is based on the theory of the circle of continuous improvement, the statistical control of processes and the six sigma, for the creation of an experimental design, which all variables with greater problem can be verified and attack them directly increasing the efficiency in the production.

According to the experimental design and the tests performed, results were obtained such as a 90% decrease in weld defects, better identification of the material produced, better appearance of the weld bead, and a statistical process control that allows continuous monitoring of the welds. Main variables of soldering avoiding defects in the final product.

The work carried out allowed to establish the optimal ranges of current, voltage and welding speed in which the process is stable avoiding defects in the final product, which allowed to establish specific welding procedures for each structure taking as reference the WPS developed for each type of joint, in such a way that the product manufactured has the permanent documentary backing.

Keywords: Statistical control, current control, metal structures, welding, welding speed, voltage.

DETERMINACIÓN DEL RANGO ÓPTIMO DE LAS VARIABLES DE SOLDADURA E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE LA PLANTA INDUSTRIAL INSTRUMENTAL INC.

INTRODUCCIÓN

El Ecuador es un país en el cual cada día se abren nuevos mercados entre los cuales uno de los más importantes es el campo de la construcción de obras civiles y mecánicas, el cual necesita del aporte de nuevas ingenierías que reduzcan el tiempo y costos del montaje y a la vez cumplan con las exigencia de los clientes tanto en la calidad como con la resistencia de las materias primas de los elementos soldados, de tal manera que garanticen la seguridad de las estructuras fabricadas en el campo de aplicación y el cumplimiento de las normas aplicables, tanto en la fabricación, inspección y el montaje.

En la planta Industrial Instrumental Inc. uno de los principales inconvenientes es el costo elevado por las reparaciones en el producto terminado de las estructuras soldadas, monopolos con sus accesorios y vigas tipo "I", lo cual genera fechas de entrega prolongadas disminuyendo la productividad, utilidad para la planta industrial y apariencia del producto fabricado.

El tiempo prolongado en la fabricación de estructuras soldadas se debe a que las variables del proceso no se encuentran en condiciones controladas, adicionalmente no existe un control estadístico del proceso de soldadura, razón por la cual no hay una metodología clara para encontrar los parámetros que están fuera de especificación y a su vez corregirlos.

Por tal motivo es importante la implementación de un sistema de control de calidad en el proceso para dar una mejor trazabilidad al producto, controlar mejor los parámetros principales de soldadura, y analizar estadísticamente los datos garantizando una estabilidad del proceso y la repetitividad de la calidad en los elementos fabricados por Instrumental Inc.

Cabe mencionar que el aporte de la implementación del control estadístico de las variables de soldadura en cada una de las máquinas en la industria de las estructuras

metálicas es un gran avance en el campo de la industria manufacturera, ya que permite aplicar las herramientas estadísticas en planta y también ayuda a estandarizar el método de soldadura, facilitando el aprendizaje del proceso de soldadura del personal operativo nuevo, y a su vez la metodología utilizada permite identificar con facilidad la causa raíz de los defectos de soldadura en el cordón, lo cual permite tomar las acciones correctivas pertinentes en el proceso evitando que el producto salga con fallas fuera de planta.

Objetivo general

Determinar el rango óptimo de las variables de soldadura e implementar un sistema de control de calidad en el proceso de fabricación de estructuras metálicas de la planta industrial instrumental inc.

Objetivos específicos

- Determinar las variables con mayor variabilidad en el proceso de soldadura GMAW.
- Determinar los valores máximos y mínimos específicos para cada una de las variables de soldadura.
- Establecer los controles del proceso en las variables de soldadura, garantizando la estabilidad.
- Establecer los cuadros de control óptimos para la soldadura de estructuras con diferentes materiales y espesores.
- Determinar el porcentaje de disminución de re-procesos por falta de control en las variables de soldadura.

Alcance

El presente proyecto es aplicable para la fabricación de estructuras de acero de bajo carbono de acuerdo a la norma AWS D1.1.

CAPITULO I

CONTROL DE CALIDAD Y MEJORAMIENTO CONTÍNUO

1.1. Introducción

La calidad de un producto o servicio es satisfacer las necesidades del cliente cumpliendo y sobrepasando las expectativas de sus requerimientos.

Una definición que permite medir la calidad es la siguiente:

$$Q = \frac{P}{E}$$

Donde:

Q = Calidad

P = Desempeño

E = Expectativas

Si "Q" es mayor a 1 el cliente tiene una buena noción del producto o servicio, los valores de "P" y "E" se basan en la percepción, donde el vendedor determina el desempeño y el cliente las expectativas siendo estas últimas las más exigentes.

La calidad en un proceso productivo permite un mejoramiento continuo con la finalidad de realizar bien un determinado trabajo a la primera vez, de tal manera que se evite errores.

La calidad involucra a toda la organización ya que cada persona en el proceso productivo puede ser cliente o proveedor interno o externo, y se puede llegar a la máxima calidad cuando las expectativas del cliente, lo programado por la institución y lo realizado por los trabajadores coinciden.

Mientras más alta es la calidad en una organización se obtienen menos costos de desperdicio, rechazos, reclamos y devoluciones incrementando la productividad optimizando al máximo los recursos y generando la satisfacción de todos los colaboradores de la organización.

1.2. Etapas de la Calidad

La calidad en una organización involucra tres etapas principales según su implementación, las mismas que se mencionan a continuación:

1.2.1. Control de Calidad

El control de la calidad es el conjunto de técnicas y actividades, de carácter operativo, utilizadas para verificar los requisitos relativos a la calidad del producto o servicio.

En esta etapa el departamento de Control de Calidad se encarga de controlar que el producto terminado cumpla con las respectivas especificaciones para las que fue creado, para lo cual se toma una muestra para analizar e inspeccionar.

1.2.2. Aseguramiento de la calidad

El Aseguramiento de la Calidad abarca los sistemas y procedimientos de la organización para evitar que se produzcan productos defectuosos, el control se realiza en coordinación con otras áreas a lo largo de todo el proceso de fabricación de un producto con la finalidad de prevenir errores, reducir costes y ser más competitivos en el mercado. En esta etapa se cuenta con un manual de calidad y se realiza un control estadístico en cada etapa del proceso de fabricación para tomar las respectivas acciones con el fin de evitar fallos en el producto final.

El fundamento principal para el aseguramiento de la calidad es conseguir que la Calidad realizada (el grado de cumplimiento de especificaciones), la Calidad programada (lo que se pretende obtener) y la Calidad Necesaria (exigida por el cliente) coincidan entre sí. Todo lo que esté fuera de esta coincidencia será motivo de derroche, gasto superfluo e insatisfacción.

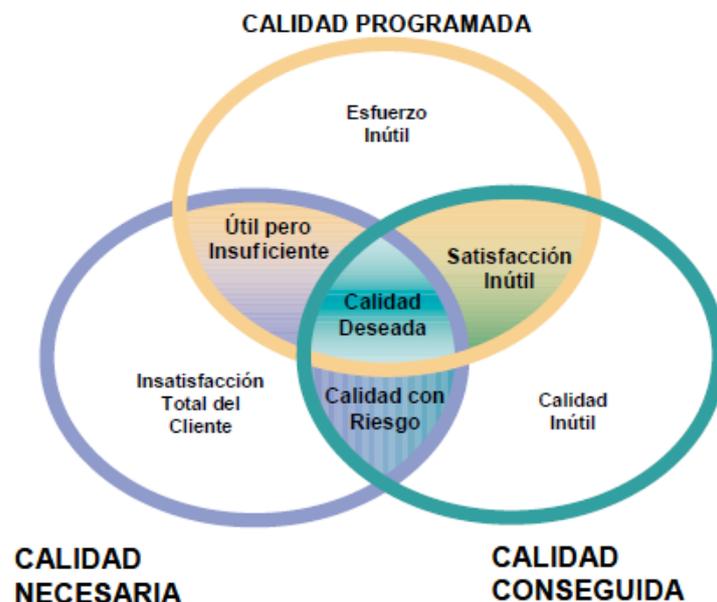


Figura 1. 1 Círculo de cada una de las calidades
Fuente: Evolución del concepto de la Calidad, J. R. Menéndez,

1.2.3. Calidad total

Consiste en implantar una metodología de trabajo que permita, a través de la mejora continua de todas las actividades de la empresa, conseguir la unificación de los tres círculos de calidad y alcanzar la excelencia empresarial, en la cual satisfaga todas las necesidades y expectativas de los clientes, empleados, accionistas y sociedad en general.

En esta etapa la calidad está en todas las fases del ciclo de vida del producto, desde el diseño hasta el servicio postventa, las cuales se distribuyen en seis dimensiones:

- Calidad de concepción.
- Calidad de diseño.
- Calidad de conformidad.
- Calidad de entrega.
- Calidad percibida.
- Calidad de servicio.

Estas dimensiones de la calidad son en unos casos independientes, mientras que en otros casos están fuertemente relacionadas, como es el caso de la fiabilidad y la conformidad. En su conjunto, todas ellas forman el soporte para el desarrollo de la Gestión de la Calidad, siendo conceptos referidos a fases de actividades interdependientes.

Su importancia está muy condicionada al rendimiento, la fiabilidad, la conformidad y la durabilidad, ya que son características de calidad críticas en la fabricación de bienes de consumo duraderos y bienes industriales, así como en servicios críticos que pueden poner en peligro la seguridad o la salud de las personas.

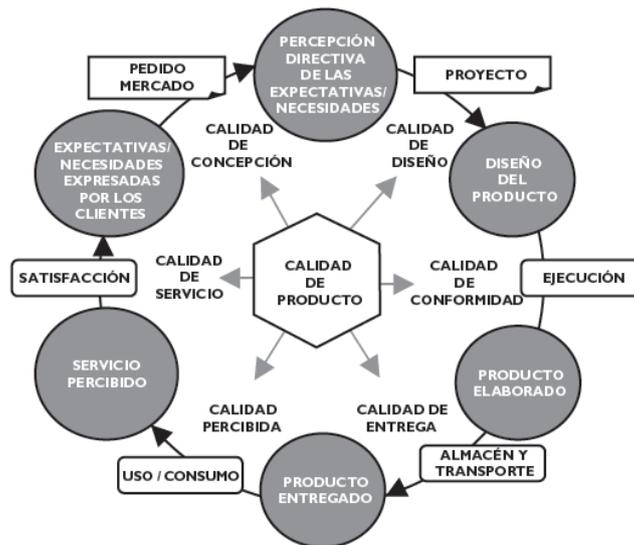


Figura 1. 2 Dimensiones de la calidad total del producto
Fuente: Gestión de la Calidad, C. Camisón

1.3. Mejoramiento continuo

El proceso de mejora continua pretende introducir mejoras en los productos, servicios y procesos de la organización, es la base para asegurar la estabilización del proceso y la posibilidad de una evolución a lo largo del tiempo. Cuando hay crecimiento y desarrollo en una organización o comunidad, es necesaria la identificación y análisis de todos los procesos. El mejoramiento continuo es la forma más efectiva de mejora de la calidad y la eficiencia en las organizaciones. El proceso de mejora continua incorpora dos clases de procesos:

- a) La mejora continua, basada en la innovación incremental y el aprendizaje adaptativo, resulta cuando las organizaciones aprenden de las consecuencias de sus actividades pasadas y, sin cuestionar el paradigma que guía la acción, emprenden nuevas actividades mejoradas. El enfoque de la mejora continua es atacar constantemente los focos de no calidad, cuestionando las prácticas y métodos organizativos.
- b) La mejora radical, asentada en la innovación radical y el aprendizaje generativo, resulta cuando cambios en el entorno o la discrepancia entre los resultados deseados y los resultados de las actividades del pasado conducen a cuestionar el paradigma guía de la acción organizativa. El aprendizaje es completo al implicar enmiendas en las creencias subyacentes a la vida organizativa, es desestabilizante y revolucionario, aunque fundamental para la innovación y la creatividad en ciertos

contextos.

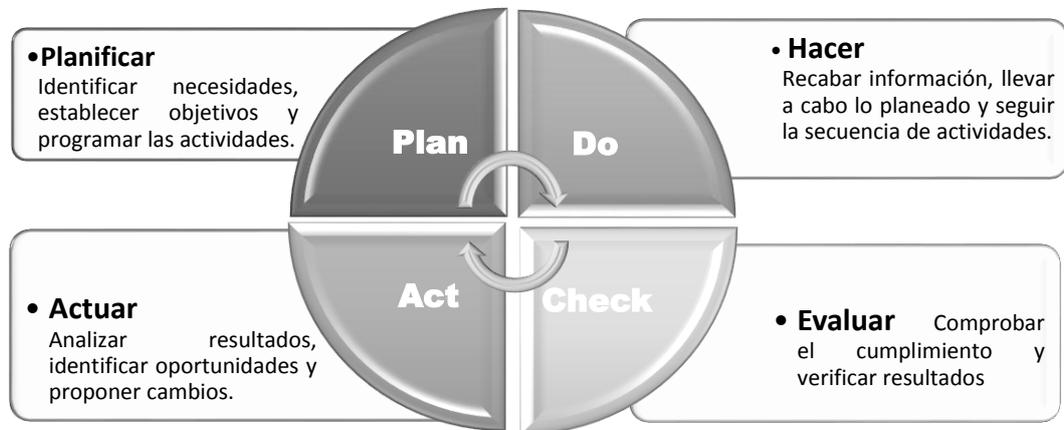


Figura 1. 3 Ciclo de mejora continua.
Fuente: Gestión de la Calidad, C. Camisón

La mejora continua se apoya también en la formación del personal, en las técnicas básicas de análisis y resolución de problemas, como pueden ser las herramientas de la calidad.

1.3.1. Herramientas de Calidad

Las herramientas de calidad son un conjunto de técnicas utilizadas en la solución de problemas de distinta índole, con el fin de mejorar el análisis y solución del mismo enfocado a la calidad y la mejora continua.

Las herramientas principales son las siguientes:

- Lista de Chequeo o Verificación (Check list)
- Diagramas de Flujo
- Diagrama de Pareto
- Diagrama de Causa – Efecto (Ishikawa)
- Histograma
- Diagrama de Dispersión o Correlación
- Estratificación
- Gráficos de Control

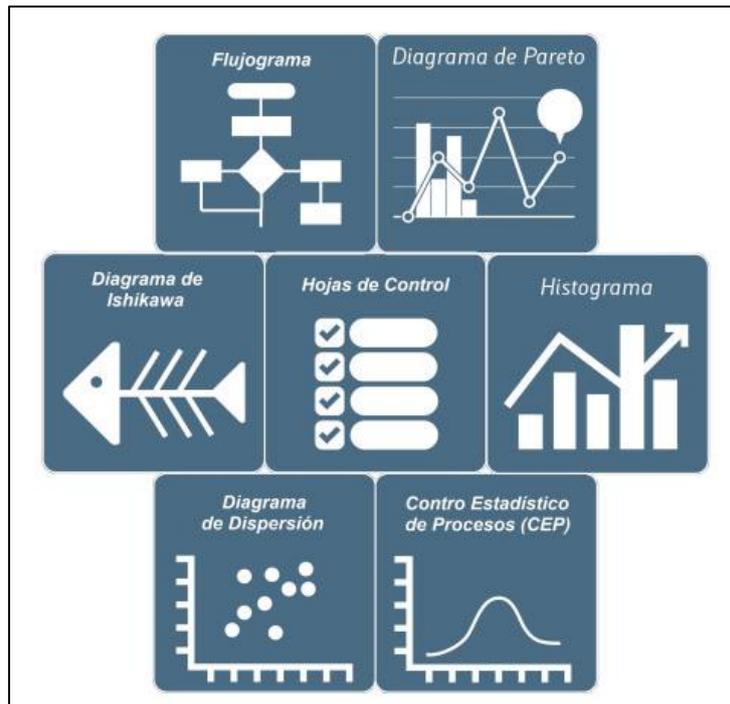


Figura 1. 4 Herramientas de Calidad

Fuente: <https://decimemony.wordpress.com/2015/10/02/herramientas-de-calidad/>

1.3.1.1. Lista de verificación (Checklist)

Es un medio para registrar de manera eficiente los datos que servirán de base para subsecuentes análisis, proporciona registros históricos que ayudan a percibir los cambios a lo largo del tiempo, facilita el inicio del pensamiento estadístico y ayuda a traducir las opiniones de hechos en datos.

1.3.1.2. Diagramas de Flujo

Los diagramas de flujo permiten conocer de forma analítica la secuencia de acciones dentro de un determinado proceso, aportando sustancialmente en la conformación de una sólida estructura del pensamiento que ayuda en la toma de decisiones. Esta herramienta descompone los procesos en partes que ayudan en la comprensión de su efectividad organizacional y simplificación del trabajo.

Cuando se diseñan nuevos procesos, los diagramas de flujo ayudan a establecer el tipo de relaciones y el flujo de cualquier tipo de recursos.

1.3.1.3. Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto es una gráfica de barras que permite analizar y localizar los problemas vitales, así como las causas principales, dicho diagrama se sustenta en el denominado “Ley 80-20” o “Pocos Vitales y muchos triviales”, el cual indica que el 80 % de los problemas son originados por un 20 % de las causas. Este principio ayuda a

separar los errores críticos, que normalmente suelen ser pocos, de los muchos no críticos o triviales.

Esta herramienta permite la comparación antes y después de los problemas, ayudando a cuantificar el impacto de las acciones tomadas para lograr mejoras. Promueve el trabajo en equipo ya que se requiere la participación de todos los individuos relacionados con el área para analizar un determinado problema, obtener información y llevar a cabo las respectivas acciones para su solución. El Diagrama de Pareto se utiliza también para expresar los costos que significan cada tipo de defecto y los ahorros logrados mediante el efecto correctivo llevado a cabo a través de determinadas acciones.

1.3.1.4. Diagrama de Causa – Efecto (Ishikawa)

El diagrama de espina se utiliza para recoger de manera gráfica todas las posibles causas de un problema o identificar los aspectos necesarios para alcanzar un determinado objetivo (efecto). También se lo denomina diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa.

Esta herramienta es útil en la identificación de las posibles causas de un problema y representa las relaciones entre algunos efectos y sus causas. En un ambiente manufacturero, las categorías de causas potenciales incluyen máquina, mano de obra, materiales, método y medio ambiente (las 4 M's).

1.3.1.5. Histograma

El histograma es un gráfico que despliega la distribución de datos en barras por categoría, muestran el grado y la naturaleza de la variación dentro del rendimiento de un proceso, también indica la distribución de frecuencias de un conjunto de valores.

1.3.1.6. Diagrama de dispersión o correlación

El diagrama de correlación o diagrama de dispersión sirve para determinar si existe relación entre dos variables normalmente de causa y efecto, hace fácil el reconocimiento de correlaciones, es decir ayuda a determinar relaciones dinámicas o estáticas entre factores o características del problema.

1.3.1.7. Estratificación

La estratificación consiste en dividir los datos recogidos en grupos homogéneos para facilitar una mejor comprensión del fenómeno estudiado. A cada grupo homogéneo se

lo denomina estrato. Esta técnica permite investigar los aspectos más significativos o las áreas más importantes donde es necesario centrar la atención.

La estratificación se utiliza en la hoja de recogida de datos, en los histogramas, en el análisis de Pareto y en los gráficos de control. También se puede aplicar cuando estemos estudiando la relación entre dos variables empleando los diagramas de correlación.

1.3.1.8. Gráficos de Control

El gráfico de control es una herramienta gráfica que se utiliza para medir la variabilidad de un proceso, consiste en valorar si el proceso está dentro o fuera de control en función de los límites de especificación estadísticos calculados.

Un gráfico de control sirve como una herramienta de detección de problemas y proporciona un método estadístico adecuado para distinguir entre causas de variación comunes o especiales mostradas por los procesos.

1.4. Innovación

Innovación es convertir ideas en productos, procesos o servicios nuevos o mejorados que el mercado valora, con la intención de ser útiles para el incremento de la productividad y competitividad en el mercado. Se trata de un hecho fundamentalmente económico que incrementa la capacidad de creación de riqueza de una empresa, y además tiene fuertes implicaciones sociales.

Esta definición debe ser entendida en un sentido amplio, pues cubre todo el espectro de actividades de la empresa que presuponen un cambio substancial en la forma de hacer las cosas, tanto en lo que se refiere a los productos y servicios que ella ofrece, como a las formas en que los produce, comercializa u organiza.

1.4.1. Tipos de Innovación

Las empresas innovan de diversas formas sus productos o procesos con el fin de obtener una mayor calidad en los productos o servicios que ofrecen, disminuyendo costos y siendo más rápidas en la introducción en el mercado de la mejora realizada.

Existen varios tipos de innovación, así se puede citar los siguientes:

a) Por su naturaleza:

- De Producto (bien o servicio).
- De Proceso
- De Métodos o técnicas de comercialización
- De Métodos o Técnicas de gestión

- Organizativas
- b) Por su grado de novedad:
- Radicales o de ruptura
 - Incrementales
 - Adaptativas
- c) Por su impacto económico
- Básicas
 - De mejora

1.4.1.1. Innovación de Producto

Innovación de producto, es la introducción de un bien o servicio que es nuevo o significativamente mejorado con respecto a sus características o aplicaciones previas. Esto incluye mejoras significativas en especificaciones técnicas, componentes y materiales, software incorporado, facilidad de uso u otras características funcionales

1.4.1.2. Innovación de Proceso

Innovación de proceso es la implementación de un método de producción o de entrega, nuevo o significativamente mejorado. Esto incluye cambios significativos en procesos, equipo o software.

1.4.1.3. Innovación Comercial

Es resultado del cambio de cualquiera de las diversas variables del marketing. El éxito comercial de un nuevo producto o servicio esencialmente depende de la superioridad del mismo sobre los restantes y del conocimiento del mercado y la eficacia del marketing desarrollado al efecto. Entre las innovaciones de dominio comercial destacan: nuevos medios de promoción de ventas, nuevas combinaciones estética-funcionalidad, nuevos sistemas de distribución y nuevas formas de comercialización de bienes y servicios. Un ejemplo de nuevas formas de comercialización es el sistema de franquicias o el comercio electrónico.

1.4.1.4. Innovación Organizativa

Es el cambio en la dirección y organización bajo la cual se desarrolla la actividad productiva y comercial de una empresa. Es un tipo de innovación que, entre otras cosas, posibilita un mayor acceso al conocimiento y un mejor aprovechamiento de los recursos materiales y financieros. Entre las innovaciones organizativas de posible aplicación en una empresa distinguimos dos: las que actúan a un nivel externo y las que lo hacen a un nivel interno.

1.4.1.5. Innovación Incremental

Son cambios dirigidos a incrementar la funcionalidad y las prestaciones de la empresa, pero que si se suceden de forma acumulativa pueden constituir una base importante de progreso, ocurren de forma continua en las empresas y las industrias. La innovación que se realiza es fruto de la experiencia recogida por ingenieros y personal técnico, como de los usuarios de tecnologías.

1.4.1.6. Innovación radical

Este tipo de innovación se alcanza casi siempre como resultado de procesos definidos por Investigación y Desarrollo en laboratorios dentro o fuera de la empresa e institutos especializados, ya que Implica una ruptura con lo ya establecido con nuevos productos o procesos que no pueden entenderse como una evolución natural de los ya existentes.

1.5. Teoría muestral

La teoría de muestreo se refiere al estudio de las relaciones que existen entre un colectivo o población y las muestras que se extraen de las mismas. El estudio de las muestras permite hacer estimaciones de características desconocidas de la población (tales como media, desviación típica, proporciones, etc.). Estas estimaciones se hacen a partir del conocimiento de las características de las muestras (media, desviación típica, proporción, etc.).

Las características o medidas obtenidas de una muestra se llaman estadísticos; y las medidas correspondientes a la población parámetros estadísticos. Cuando una medida muestral o estadístico es utilizada como representante de una característica poblacional o parámetro se denomina estimador.

El muestreo es el procedimiento utilizado para elegir una muestra según sea el sistema. El analizar los datos mediante un muestreo tiene ciertas ventajas como:

El costo es menor y se puede obtener un mejor rendimiento del dinero invertido. Se obtiene una disminución notable del tiempo necesario para alcanzar la información. Cuando una muestra posee 30 o más datos se denomina grandes muestras y si la muestra tiene menos de 30 observaciones se denomina pequeñas muestras.

El Muestreo se lo puede realizar de dos maneras con o sin reemplazamiento.

- a) *Muestreo con reemplazamiento*: Cuando un elemento de la población puede ser escogido varias veces para formar parte de la muestra.
- b) *Sin reemplazamiento*: Cuando un elemento de la población solo puede ser seleccionado una sola vez para formar parte de la muestra.

Dentro de la teoría muestral es importante conocer las definiciones básicas de la población, muestra y los tipos de muestreo.

1.5.1. Población

Es la totalidad del universo que se interesa considerar y realizar el análisis respectivo, es necesario que esté bien definido para conocer en todo momento que elementos lo componen para extraer conclusiones. La población puede ser infinita o finita.

1.5.2. Muestra

Es una parte de la población o un subconjunto del conjunto de unidades obtenidas con el objeto de investigar las propiedades de la población.

1.5.3. Muestreo estadístico

Es un enfoque sistemático para seleccionar unos cuantos elementos (una muestra) de un grupo de datos (población) a fin de hacer algunas inferencias sobre el grupo total. Desde el punto de vista matemático, podemos describir las muestras y las poblaciones mediante medidas como la media, la moda, la desviación estándar, etc. No es más que el procedimiento a través del cual se obtienen las muestras.

1.5.4. Tipos de Muestreo

1.5.4.1. Muestreo no probabilístico

Se realiza a través del conocimiento y la opinión personal, basada en la experiencia del investigador, se identifican los elementos de la población que van a formar parte de la muestra. Una muestra seleccionada por muestreo no probabilístico se basa en el conocimiento de la población por parte de alguien.

1.5.4.2. Muestreo Aleatorio Simple

Un muestreo es aleatorio cuando cada elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser escogido para formar parte de la muestra. Este tipo de muestreo evita que la muestra sea sesgada evitando por lo tanto que se realice una mala inferencia estadística.

1.5.4.3. Muestreo Sistemático o Secuencial

Es cuando se seleccionan los elementos de la población con un intervalo uniforme en el tiempo, en el orden o en el espacio.

1.5.4.4. Muestreo Estratificado

Trata de obviar las dificultades que presentan los anteriores ya que simplifican los procesos y suelen reducir el error muestral para un tamaño dado de la muestra. Consiste en considerar categorías típicas diferentes entre sí (estratos) que poseen gran homogeneidad respecto a alguna característica (se puede estratificar, por ejemplo, según la profesión, el municipio de residencia, el sexo, el estado civil, etc). Lo que se pretende con este tipo de muestreo es asegurarse de que todos los estratos de interés estarán representados adecuadamente en la muestra. Cada estrato funciona independientemente, pudiendo aplicarse dentro de ellos el muestreo aleatorio simple o el estratificado para elegir los elementos concretos que formarán parte de la muestra.

1.5.4.5. Muestreo por conglomerados

En el muestreo por conglomerados, se divide la población en grupos o conglomerados de elementos heterogéneos, pero homogéneos con respecto a los grupos entre sí. Un procedimiento bien diseñado, de muestreo por conglomerados, puede producir una muestra más precisa a un costo mucho menor que el de un simple muestreo aleatorio. Se usa el muestreo estratificado cuando cada grupo presenta una pequeña variación en su interior, pero existe una amplia variación entre ellos. Se usa el muestreo por conglomerado en el caso contrario, cuando hay considerable variación dentro de cada grupo pero los grupos son esencialmente semejantes entre sí.

1.6. Control estadístico de procesos

El Control Estadístico de Procesos (SPC, Statistical Control Proces) es la aplicación de técnicas estadísticas para determinar si el resultado de un proceso concuerda con el diseño de un producto o servicio correspondiente, en el control estadístico de procesos se utilizan a menudo gráficos de control para detectar la elaboración de productos o servicios, o bien para verificar si el proceso de producción se ha modificado y los productos o servicios se desviarán de sus especificaciones de diseño, y de acuerdo al análisis el SPC permite cuantificar las desviaciones en los procesos.

El control estadístico de procesos se usa para comunicar a la gerencia de una empresa acerca de los cambios realizados en un proceso y que tengan repercusiones positivas en la producción resultante.

Desde el punto de vista de calidad, el muestreo para aceptación, es la aplicación de técnicas estadísticas para determinar si una cantidad de material determinada o un producto que ya ha sido fabricado deben aceptarse o rechazarse, a partir de la inspección o prueba de una muestra, mediante gráficas estadísticas y diagramas de control.

1.6.1. Variabilidad en el proceso de producción

En un proceso de producción no existen dos productos o servicios exactamente iguales porque los procesos mediante los cuales se producen incluyen muchas fuentes de variación, incluso cuando dichos procesos se desarrollen en la forma prevista. Así por ejemplo, los diámetros de los cigüeñales pueden no ser idénticos a causa de diferencias en el desgaste de las herramientas que se emplean para su fabricación, la dureza del material, la habilidad del operario o la temperatura prevaleciente en el momento de su fabricación. En forma similar, en el caso de una entidad financiera el tiempo necesario para atender una solicitud para la emisión de una tarjeta de crédito varía de acuerdo con la carga de trabajo del departamento de crédito, los antecedentes financieros del solicitante y las habilidades y aptitudes de los empleados. Nada puede hacerse para suprimir por completo las variaciones en los procesos, pero la gerencia tiene la opción de investigar las causas de variación a fin de minimizarlas y mantener un proceso estable dentro de límites de control.

Un proceso puede tener tres tipos de comportamiento:

- a) Las variables principales están dentro de los límites de control.
- b) Las variables principales están fuera de los límites de control pero el proceso es estable.
- c) Las variables de control están totalmente fuera de control.

Para que las variables de un proceso estén fuera de los límites de control existen dos tipos de variación, causas comunes y causas asignables o especiales.

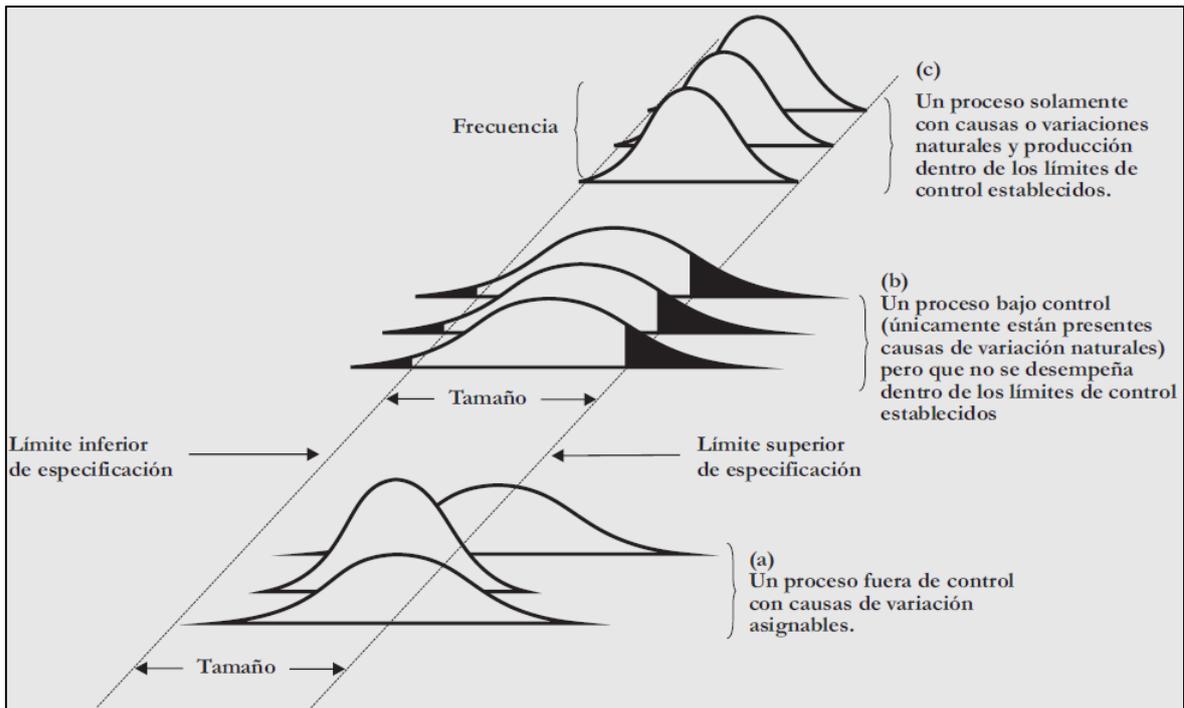


Figura 1. 5 Tipos de Salida del Proceso
(Fuente: Control Estadístico de Procesos, R. Carro Paz, pág. 1)

1.6.1.1. Causas comunes

La variación por causas comunes (o por azar) es aquella que permanece día a día, lote a lote; y es aportada de forma natural por las condiciones de las 6 M (Método, mano de obra, materiales, medio ambiente, medición y materia prima). Esta variación es inherente a las actuales características del proceso y es resultado de la acumulación y combinación de diferentes causas que son difíciles de identificar y eliminar, ya que son inherentes al sistema y la contribución individual de cada causa es pequeña; no obstante, a largo plazo representan la mayor oportunidad de mejora.

1.6.1.2. Causas especiales

La variación por causas especiales (o asignables) es causada por situaciones o circunstancias especiales que no están de manera permanente en el proceso. Por ejemplo, la falla ocasionada por el mal funcionamiento de una pieza de la máquina, el empleo de materiales no habituales o el descuido no frecuente de un operario. Las causas especiales, por su naturaleza relativamente discreta, a menudo pueden ser identificadas y eliminadas si se cuenta con los conocimientos y condiciones para ello. Cuando un proceso trabaja sólo con causas comunes de variación se dice que está en control estadístico o es estable, porque su variación a través del tiempo es predecible.

Además, independientemente de que su variabilidad sea mucha o poca, el desempeño del proceso es predecible en el futuro inmediato, en el sentido de que su tendencia central y la amplitud de su variación se mantienen sin cambios al menos en el corto plazo.

1.6.1.3. Variación

La variación es una medida de la dispersión de las observaciones en torno a la media. Dos medidas que se usan comúnmente en la práctica son el rango y la desviación estándar. El rango es la diferencia entre la observación más grande contenida en una muestra y la más pequeña. La desviación estándar es la raíz cuadrada de una población, basada en una muestra, y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

n = número total de observaciones de la muestra

δ = desviación estándar de una muestra

X_i = observación de una característica de calidad

\bar{X} = media

1.6.2. Cartas de Control

El objetivo básico de una carta de control es observar y analizar el comportamiento de un proceso a través del tiempo. Así, es posible distinguir entre variaciones por causas comunes y especiales (atribuibles), lo que ayudará a caracterizar el funcionamiento del proceso y decidir las mejores acciones de control y de mejora. Cuando se habla de analizar el proceso nos referimos principalmente a las variables de salida (características de calidad), pero las cartas de control también pueden aplicarse para analizar la variabilidad de variables de entrada o de control del proceso mismo.

1.6.2.1. Límites de Control

Los límites de control no son especificaciones, tolerancias o deseos de un proceso, se calculan a partir de la variación de datos. Para calcular los límites de control se debe actuar bajo condiciones de control estadísticas, los datos que se grafican en la carta deben tener una alta probabilidad de caer dentro de tales límites. Por lo tanto, una forma de proceder es encontrar la distribución de probabilidades de la variable, estimar sus parámetros y ubicar los límites de manera que un alto porcentaje (99.73%) de la

distribución esté dentro de ellos. Esta forma de proceder se conoce como límites de probabilidad.

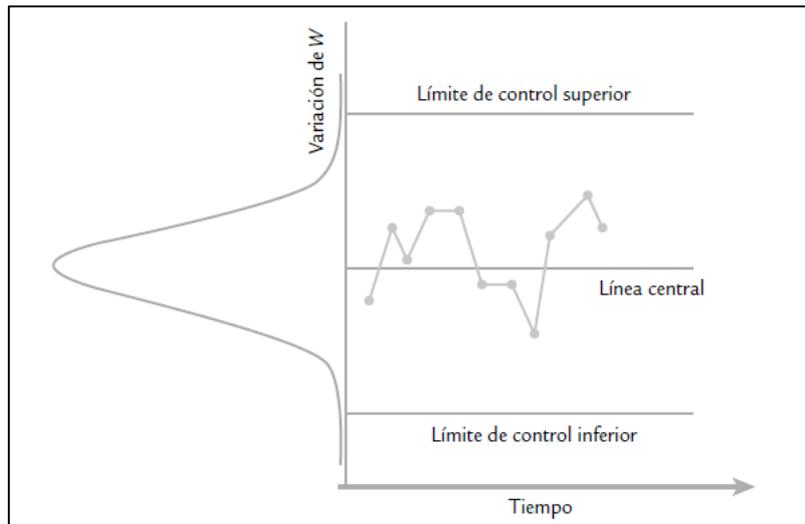


Figura 1. 6 Elementos de una carta de control
(Fuente: Control estadístico de calidad y seis sigma, H. Gutiérrez)

Un modelo general para calcular los límites de una carta de control es el siguiente:
Sea W el estadístico que se va a graficar en la carta, la media \bar{X}_w y su desviación estándar δ_w .

$$\begin{aligned}
 LCI &= \bar{X} - 3\delta_w \\
 \text{Línea Central} &= \bar{X}_w \\
 LCS &= \bar{X} + 3\delta_w
 \end{aligned}$$

Donde:

LCI : Límite de Control Inferior

LCS : Límite de Control Superior.

CAPITULO II

PROCESO DE SOLDADURA DE ESTRUCTURAS METÁLICAS

2.1. Introducción

Una estructura es un conjunto de partes unidas entre sí que forman un cuerpo, una forma o un todo, destinadas a soportar los efectos de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo. Las estructuras metálicas son una alternativa importante para el campo de la construcción ya sea tanto para el área industrial como urbana, por su alta resistencia, flexibilidad y facilidad de montaje.

La materia prima para la fabricación de estructuras metálicas es el acero, el cual tiene como elemento principal al hierro y combinado con ciertos materiales como carbono, manganeso, cobre, silicio, molibdeno, níquel, y un mínimo de impurezas, fósforo y azufre crean un material con excelentes propiedades, útil para diversas aplicaciones.

En un mundo cada vez más interrelacionado es conveniente emplear designaciones de material de alcance internacional para poder aprovechar la potencia de los recientes desarrollos, en especial cuando se presentan nuevos conocimientos.

2.1.1. Clases de aceros

El acero de acuerdo al tratamiento y al cuidado del proceso se clasifica en:

- **Aceros Calmados:** Son aquellos aceros a los que se les ha extraído la mayor cantidad de oxígeno de los gases de su solidificación, lo que origina un producto con un alto grado de uniformidad en su estructura cristalina. Es un acero de alta soldabilidad adecuado para planchas y perfiles gruesos que están sometidos a fuertes tensiones internas por las soldaduras.
- **Aceros Semi calmados:** Son los aceros parcialmente calmados. Se utilizan en la manufactura de perfiles estructurales, barras y planchas.
- **Aceros Efervescentes:** Son aceros débilmente desoxidados. Presentan un alto grado de segregación de elementos.

De todos los tipos de acero que se pueden producir, los que más interesan para la construcción son los Aceros Estructurales, adecuados para resistir esfuerzos, los que deben seguir cuidadosamente las indicaciones de las normas de fabricación.

2.1.2. Acero Estructural

El acero estructural es uno de los materiales básicos utilizados en la construcción de estructuras, tales como edificios industriales y comerciales, puentes y muelles. Se produce en una amplia gama de formas y grados, lo que permite una gran flexibilidad en su uso. Es relativamente barato de fabricar y es el material más fuerte y más versátil disponible para la industria de la construcción.

El acero estructural tiene algunas ventajas como:

- Alta resistencia por unidad de peso, permite estructuras relativamente livianas, lo cual es de gran importancia en la construcción de puentes, edificios altos y estructuras cimentadas en suelos blandos.
- La estructura del acero es homogénea ya que las propiedades del acero no se alteran con el tiempo, ni varían con la localización en los elementos estructurales.
- El acero es el material que más se acerca a un comportamiento linealmente elástico (Ley de Hooke) hasta alcanzar esfuerzos considerables.
- Los perfiles laminados están fabricados bajo estándares que permiten establecer de manera muy precisa las propiedades geométricas de la sección.
- El acero estructural es dúctil, permite soportar grandes deformaciones sin falla, alcanzando altos esfuerzos en tensión, ayudando a que las fallas sean evidentes.
- El acero tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de energía en deformación (Tenacidad).
- Facilidad de unión con otros miembros, en perfiles se puede conectar fácilmente a través de remaches, tornillos o soldadura con otros perfiles.
- La velocidad de construcción en acero es muy superior al resto de los materiales.
- El acero se encuentra disponible en variedad perfiles para optimizar su uso en gran cantidad de tamaños y formas.
- Las estructuras de acero de desecho, tienen un costo de recuperación en el peor de los casos como chatarra de acero.
- El acero es un material 100 % reciclable además de ser degradable por lo que no contamina.
- El acero permite modificaciones y/o ampliaciones en proyectos de manera relativamente sencilla, incluso se pueden prefabricar estructuras en un taller y la mínima en obra consiguiendo mayor exactitud.

2.1.3. Propiedades del acero estructural

Las propiedades mecánicas del acero están influenciadas de manera importante por el proceso de laminación, velocidad de enfriamiento, tratamiento térmico, temperatura de servicio, deformación en frío, tipo de solicitaciones, etc, por lo que es muy conveniente analizar cada uno de estos factores para establecer los criterios de selección de la calidad y tipo de material más recomendable para una aplicación específica.

Entre las principales propiedades de un acero estructural están las siguientes:

- Límite de Fluencia
- Resistencia a la fractura
- Ductilidad
- Módulo de elasticidad
- Relación de Poisson
- Densidad
- Soldabilidad

En el diagrama esfuerzo deformación se definen de la siguiente manera cada una de las propiedades.

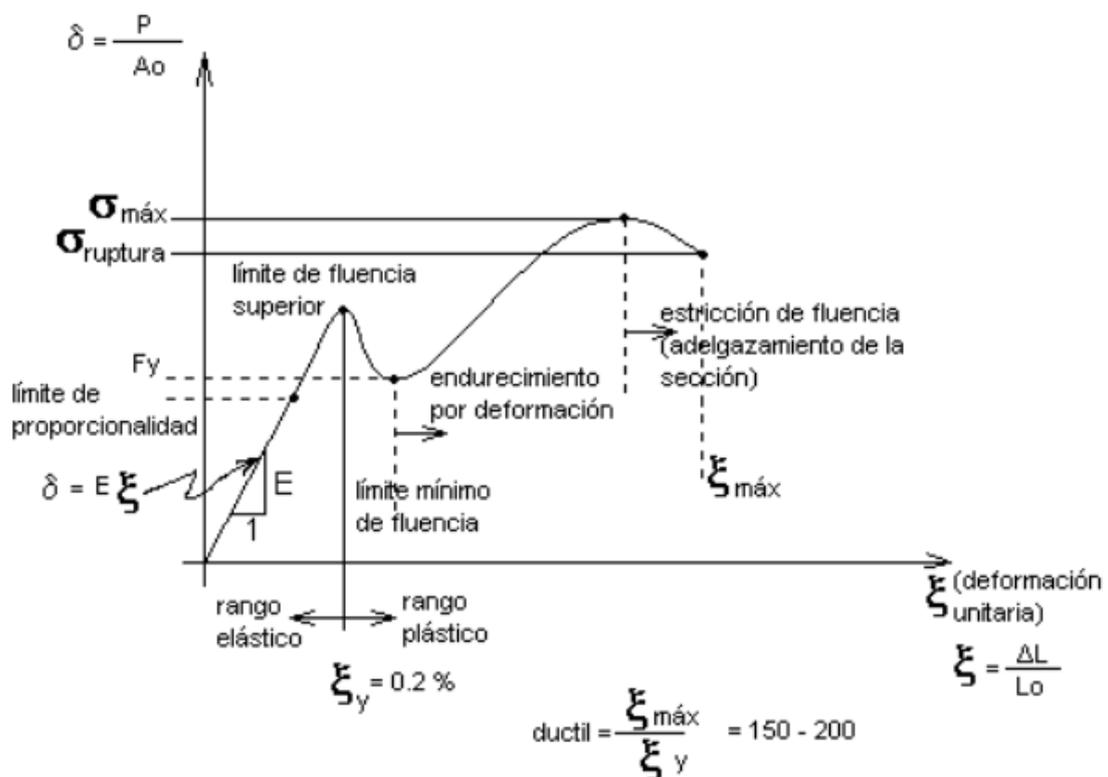


Figura 2. 1. Diagrama esfuerzo deformación del acero, propiedades principales.
(Fuente: Manual de soldadura de estructuras metálicas, Sencico)

El acero es el metal más importante utilizado para fines estructurales porque combina una alta resistencia, tanto en tensión como en compresión, con gran rigidez (módulo de elasticidad elevado), y facilidad de fabricación, con un precio relativamente bajo.

Existen una gran variedad de aceros estructurales disponibles en perfiles, placas y secciones tubulares tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. 1. Aceros estructurales más utilizados en la industria.

Nomenclatura	Característica
ASTM A36	Acero estructural.
ASTM A529	Acero estructural con límite de fluencia mínimo de 290 Mpa (2 950 kg/cm ²).
ASTM A242	Acero estructural de baja aleación y alta resistencia.
ASTM A572	Acero estructural de alta resistencia y baja aleación al manganeso-vanadio.
ASTM A588	Acero estructural de alta resistencia y baja aleación de hasta 100 mm de Espesor, con límite de fluencia mínimo de 345 MPa (3 515 kg/cm ²).
ASTM A913	Perfiles de acero de alta resistencia y baja aleación, de calidad estructural, producidos por un proceso de tratamiento térmico especial.
ASTM A992	Acero estructural para perfiles H laminados para uso en edificios.
ASTM A53, grado B	Tubos de acero, con o sin costura.
ASTM A500	Tubos de acero al carbono para usos estructurales, formados en frío, con o sin costura, de sección circular o de otras formas.
ASTM A501	Tubos de acero al carbono para usos estructurales, formados en caliente, con o sin costura.

(Fuente: Manual de diseño para la construcción con acero, AHMSA)

Tabla 2. 2. Propiedades de los aceros estructurales.

ASTM	Fy		Fu	
	MPa	kg/cm2	MPa	kg/cm2
A36	250	2530	400 a 550	4080 a 5620
A529	290	2950	414 a 585	4220 a 5975
A242	290	2950	435	4430
	320	3235	460	4710
	345	3515	485	4920
A572	290	2950	414	4220
	345	3515	450	4570
	414	4220	515	5270
	450	4570	550	5620
A992	345	3515	450 a 620	4570 a 6330
A53	240	2460	414	4220
A500	320	3235	430	4360
A501	250	2530	400	4080
A588	345	3515	483	4920
A913	345 a 483	3515 a 4920	448 a 620	4570 a 6330

(Fuente: Manual de diseño para la construcción con acero, AHMSA)

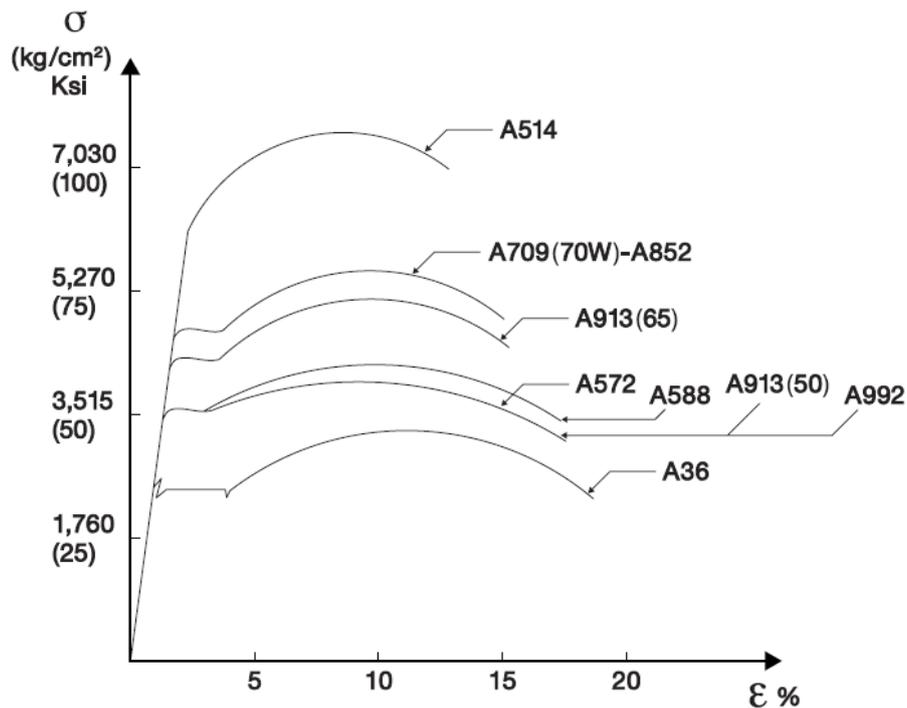


Figura 2. 2. Diagrama esfuerzo deformación de varios aceros estructurales
(Fuente: Manual de diseño para la construcción con acero, AHMSA)

2.2. Soldabilidad en los aceros

La Soldabilidad es la capacidad que tienen los materiales, de la misma o diferente naturaleza para ser unidos de manera permanente mediante procesos de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar fallas en el material.

La soldabilidad en un acero estructural es el conjunto de propiedades que permiten efectuar uniones o conexiones permanentes, que presenten características suficientes de continuidad metalúrgica, tomando en cuenta que esta propiedad debe definirse respecto a un proceso de soldadura determinado. Las características del acero, y particularmente su composición química influyen de manera importante en la soldabilidad, en especial por su contenido de carbono.

La soldabilidad de los aceros al carbono está determinada por el contenido de este elemento. El aumento de mayor cantidad de carbono confiere mayor resistencia al acero, pero también incrementa la templabilidad, lo que hace que, durante la soldadura, aparezcan estructuras de mayor volumen específico que causan tensiones internas con las corrientes deformaciones y la posibilidad de que surja agrietamiento.

Según su soldabilidad, los aceros se clasifican en:

- a) Aceros de bajo contenido de carbono: Tienen menos del 0,3% de carbono; presentan buena soldabilidad; no requieren técnicas auxiliares.
- b) Aceros de medio contenido de carbono: Tienen entre el 0,3 y 0,59 % de carbono; se consideran aceros de soldabilidad regular o condicionada y por lo tanto necesitan de técnicas auxiliares para garantizar la calidad de la unión soldada.
- c) Aceros de alto contenido de carbono: Tienen 0,6% de carbono o más; su soldabilidad es mala, ni siquiera con técnicas auxiliares se puede garantizar una buena calidad de la unión.

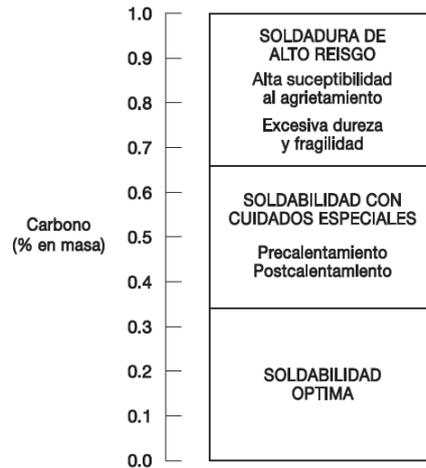


Figura 2. 3 Efecto del carbono en la soldadura.
 (Fuente: Manual de Diseño para la Construcción con Acero, AHMSA)

Un parámetro útil para evaluar la soldabilidad de los aceros es el método del “Carbono Equivalente” (CE), el cual consiste en una ecuación que relaciona la composición química del material en porcentaje y está dada por la siguiente expresión:

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (2.1)$$

Un acero se considera soldable si el carbono equivalente (CE) según la fórmula del Instituto Internacional de Soldadura es menor a 0,4%. Este valor indica cómo los elementos de aleación presentes en el acero afectan las transformaciones características favoreciendo la formación de microestructuras susceptibles a fisuras por hidrógeno en la zona afectada por el calor (ZAC). El carbono equivalente provee un índice del tipo de microestructura esperada en la ZAC en función de la velocidad de enfriamiento desde una temperatura máxima.

Por tal motivo es importante evaluar de acuerdo al diagrama de Graville en el cual se puede observar si el material es de fácil soldabilidad o no, de acuerdo a las siguientes zonas:

- a) Zona I: Aceros de bajo carbono y bajo endurecimiento no susceptibles a fisuras.
- b) Zona II: Aceros con mayor porcentaje de Carbono y bajo endurecimiento, el riesgo a fisuras en la ZAC puede ser evitado mediante el control de la velocidad de enfriamiento, por medio del aporte térmico o en menor extensión el pre calentamiento.
- c) Zona III: Aceros con elevado porcentaje de carbono y alto endurecimiento y en todas las condiciones de soldadura pueden producir micro estructuras susceptibles a fisuras.

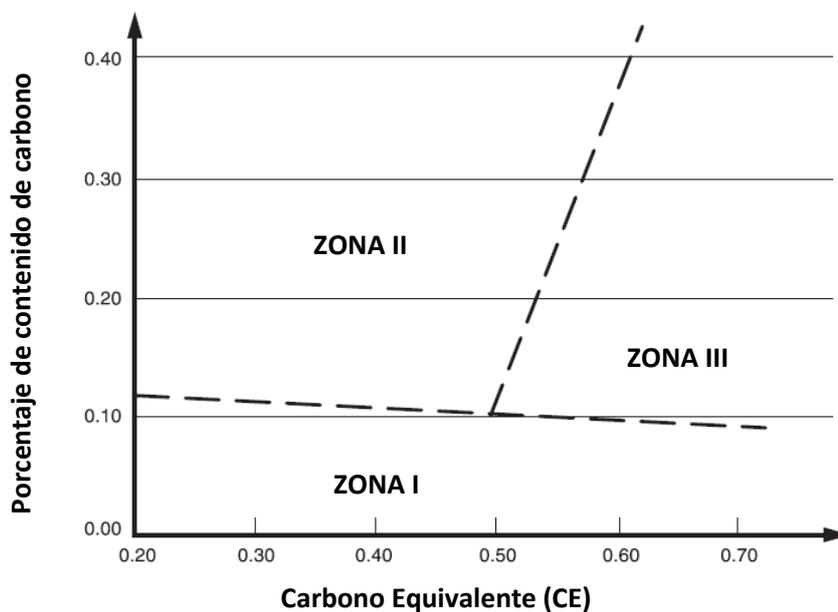


Figura 2. 4. Diagrama de Graville para evaluar la soldabilidad de los aceros.
(Fuente: Norma de Soldadura AWS D1.1/D1.1M:2015, Anexo H)

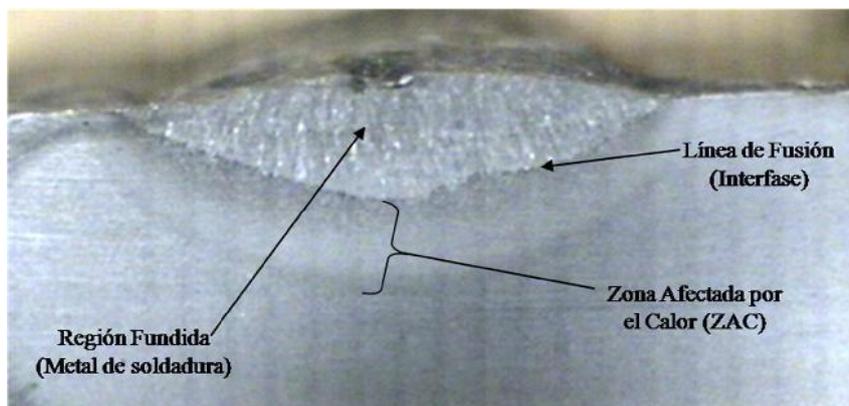


Figura 2. 5. Zonas de soldadura
(Fuente: <https://metfusion.wordpress.com/2013/08/10/soldabilidad-de-los-aceros/>)

2.3. Procesos de soldadura para estructuras metálicas

Las estructuras metálicas soldadas están constituidos por diferentes tipos de elementos, y cada uno de estos elementos debe estar convenientemente unido a las piezas vecinas de la estructura. Esto implica la utilización de distintos tipos de uniones de acuerdo a las cargas a la que va estar sometida dicha estructura.

Las uniones son partes importantes de cualquier estructura metálica, y más aún cuando son uniones soldadas. Las propiedades mecánicas de las uniones soldadas influyen mucho en la resistencia, rigidez y estabilidad de la estructura en conjunto. El número de uniones y su complejidad tienen una influencia decisiva en el tiempo necesario para el análisis estático y el trazado de planos.

La fabricación de uniones, el corte, taladrado y soldadura de barras, cartelas, casquillos y rigidizadores representan gran parte del trabajo del taller. La facilidad con que puedan efectuarse las uniones en la obra es un factor clave en el montaje.

Por ello, la selección del proceso y el detalle de las uniones de una estructura metálica tienen una influencia muy significativa en los costes de la misma, por tal motivo existen procesos adecuados de soldadura por arco eléctrico para las estructuras metálicas, tales como SMAW, GMAW, FCAW y SAW.

2.3.1. Proceso de Soldadura SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

En este proceso la unión metálica se da por el calor generado por un arco eléctrico, establecido entre el extremo del electrodo y la pieza a soldar, para lograr la unión se concentra el calor del arco eléctrico establecido entre los bordes de las piezas a soldar y el electrodo, produciéndose una zona de fusión que, al solidificarse, forma la unión permanente.

El electrodo revestido constituye el metal de aporte de la soldadura y está formado por un núcleo central metálico conductor de la corriente eléctrica, llamado “alma”, recubierto por una capa no conductora de la corriente llamada “revestimiento”, constituida de polvos aglomerados adheridos al alma metálica.

Las funciones principales del revestimiento son proteger el metal fundido del aire que lo rodea durante la transferencia a través del arco, terminar el arco durante la solidificación del cordón y aportar parte de los elementos aleantes a la pileta líquida para dar la composición química final de la soldadura.

Terminada la soldadura queda sobre el cordón un depósito de escoria la cual se la debe remover.

El arco se inicia cuando la punta del electrodo toca el metal base (material a soldar), provocando un corto circuito que da lugar al paso de la corriente eléctrica, luego, se

eleva el electrodo separándolo del metal base un par de milímetros, permitiendo de ese modo la formación del arco eléctrico.

Debido a la pequeña superficie por la cual pasa la corriente eléctrica la temperatura se eleva rápidamente en esa zona y se produce (por ionización) una estabilización del arco. Establecido el arco eléctrico, el calor generado por el mismo produce la fusión tanto del metal base, como del extremo del electrodo, a medida que se va consumiendo el electrodo, se avanza con el mismo depositando el metal fundido sobre la superficie de la pieza a soldar. La temperatura del arco eléctrico, medida en su parte central, es aproximadamente de unos 5000°C, esto produce la fusión casi instantánea del metal, generando pequeñas gotas de metal fundido en el extremo del electrodo que son transferidas a través del arco hacia la pileta líquida.

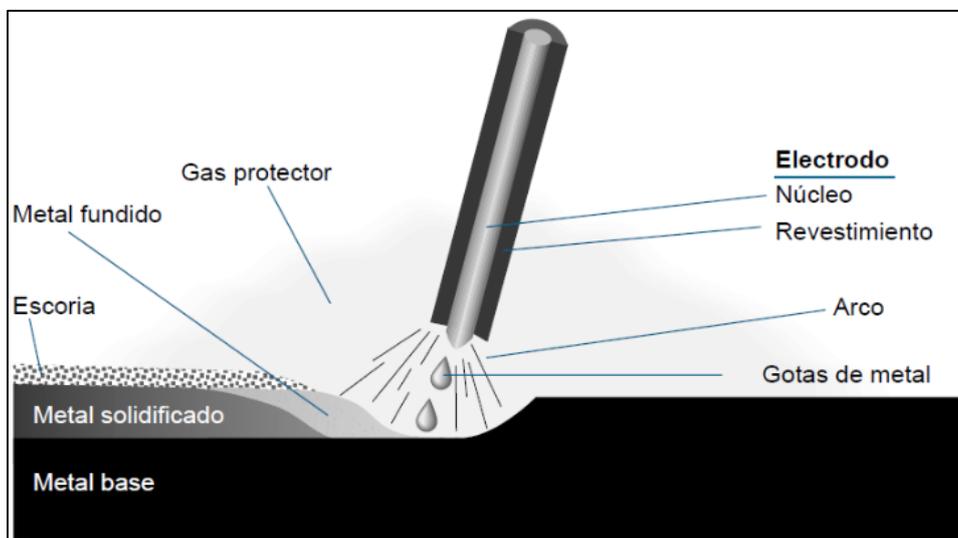


Figura 2. 6. Proceso de soldadura SMAW
(Fuente: Soldadura, J. Schafer)

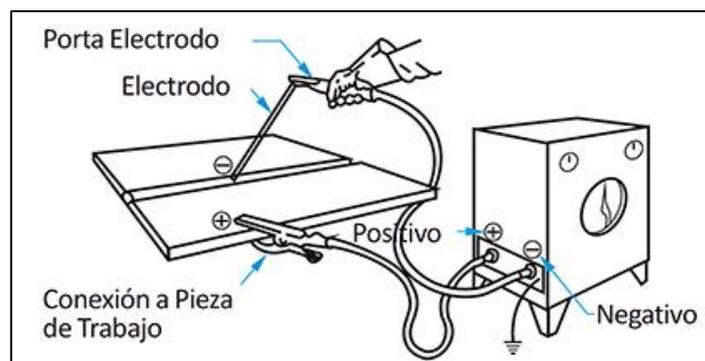


Figura 2. 7. Circuito del Proceso SMAW
(Fuente: <http://www.westarco.com/westarco/sp/education/blog/nociones-de-electricidad>)

De acuerdo al tipo de trabajo a realizar se utiliza las siguientes polaridades:

- a) Directa (DCEP): Para alta penetración.
- b) Inversa (DCEN): Para alto depósito.

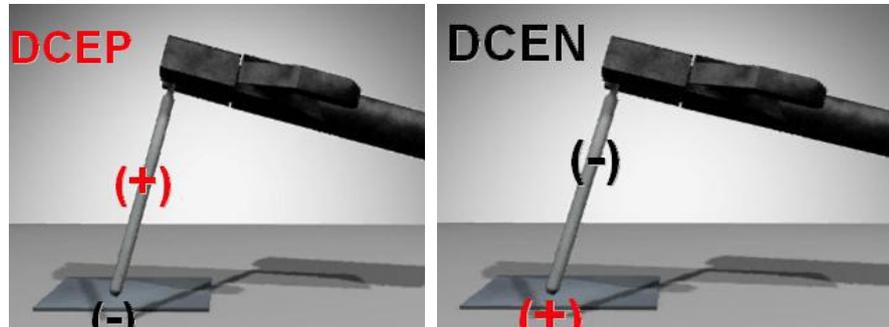


Figura 2. 8. Polaridad en la soldadura.
(Fuente: Soldadura, J. Schafer)

2.3.1.1. Electrodo del proceso SMAW

El electrodo consiste en un núcleo o varilla metálica, rodeado por una capa de revestimiento, y el núcleo es transferido hacia el metal base a través de una zona eléctrica generada por la corriente de soldadura.

El recubrimiento está compuesto por diferentes sustancias químicas que caracterizan el electrodo, dirige el arco, conduciendo a una fusión equilibrada y uniforme, además protege el metal fundido produciendo gases que envuelven el arco impidiendo la entrada del oxígeno y del nitrógeno del aire, que sería muy perjudicial para la soldadura.

El momento de la soldadura el revestimiento produce una escoria que cubre el metal fundido hasta que solidifique y se enfríe. La escoria protege el metal fundido desde el primer momento de la formación de las gotas.

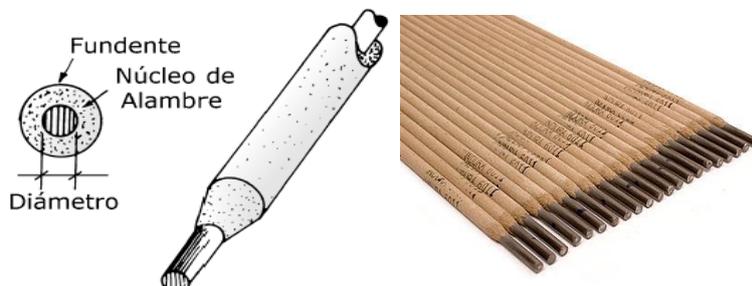


Figura 2. 9. Electrodo del Proceso SMAW
(Fuente: Soldadura, J. Schafer)

Existen tres tipos de electrodos:

- Rutílicos
- Celulósicos
- Básicos

2.3.1.1.1 Rutílicos

El componente principal de los revestimientos de estos electrodos es el óxido de titanio (TiO₂), rutilo, pudiendo contener hasta un 50 % (en peso).

Es un electrodo de fácil encendido, mantenimiento y manejo del arco, y deja un aspecto muy parejo del cordón depositado. La escoria que produce es bastante densa de color opaco, más bien oscuro, y se desprende fácilmente, a tal punto, que a medida que el metal depositado se va enfriando, la capa de escoria comienza a separarse sola del cordón. La característica de este tipo de revestimiento hace que este electrodo sea de suave fusión y poca penetración. Permiten realizar soldaduras en todas posiciones.

Estos electrodos son comúnmente empleados en trabajos de herrerías, carpintería metálica y en estructuras no sometidas a grandes esfuerzos y de poca o muy baja responsabilidad.

2.3.1.1.2 Celulósicos

El componente principal del revestimiento de este tipos de electrodos es la celulosa, que al descomponerse genera mucho CO₂ (dióxido de carbono) y H₂ (hidrógeno), lo cual da una muy buena protección gaseosa.

La característica distintiva de los electrodos celulósicos es su enfriamiento rápido, por tal motivo son utilizables en toda posición, aún en vertical descendente. Es muy agresivo dando como resultado una buena penetración. La escoria producida es escasa y de fácil remoción.

La principal utilización de estos electrodos es en la soldadura de juntas en ductos (gasoductos, oleoductos, acueductos, etc.) en posición vertical descendente, también son empleados para ejecutar la soldadura de raíz (en juntas de penetración total) en todo tipo de cañerías.

2.3.1.1.3 Básicos

En el recubrimiento de estos electrodos predomina la calcita y la fluorita. Contiene a su vez compuestos desoxidantes. Puede contener además una pequeña proporción de rutilo. Se los denomina también de bajo hidrógeno, dado que estando bien secos, los niveles de H₂ en la atmósfera del arco son sustancialmente bajos. Este es un aspecto

de gran importancia, especialmente cuando se deben ejecutar soldaduras de aceros de media y alta aleación, en grandes espesores o juntas con condiciones severas de restricción, donde la presencia de hidrógeno en el metal depositado es sumamente perjudicial, en lo se refiere a posible fisuración por hidrógeno.

Este tipo de electrodo es utilizado masivamente en todas aquellas juntas, ya sea de cañerías, equipos (tanques, recipientes a presión, torres, etc.), conjuntos y estructuras, cuyas soldaduras están sometidas a grandes presiones y/o esfuerzos. Son utilizados en soldaduras de grandes espesores, materiales de difícil soldabilidad y/o exigencias radiográficas.

Según la norma AWS 5.1 los electrodos tienen la siguiente denominación:

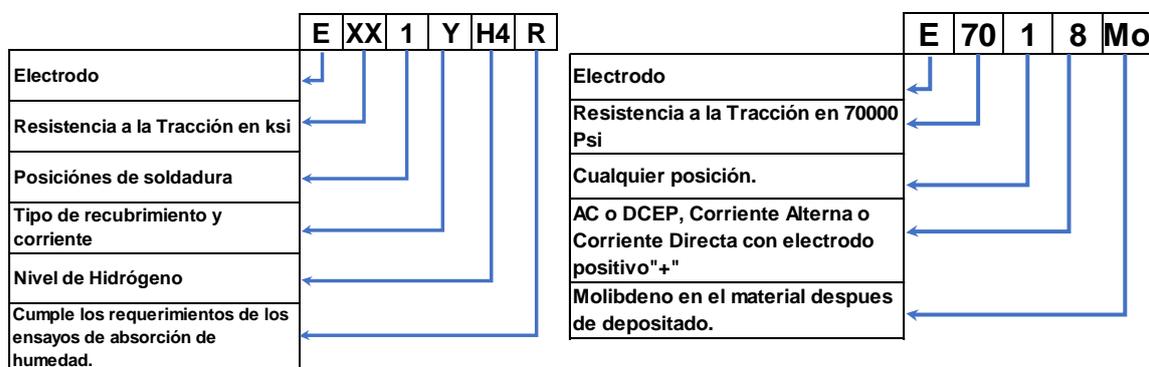


Figura 2. 10 Denominación de los electrodos del proceso SMAW
(Fuente: Soldadura, J. Schafer)

2.3.2. Proceso de Soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding)

La soldadura metálica por arco eléctrico con protección gaseosa es un proceso que produce la unión de los metales por fusión a través de un arco voltaico establecido entre un electrodo metálico continuo (consumible de soldadura) y la pieza. La protección, tanto del arco como de la piqueta de fusión, se consigue a través de un gas o una mezcla de gases. Si este gas es inerte (Argón/Helio), no reacciona con el metal por lo que el proceso también se llama MIG (Metal Inert Gas). Por otra parte, si el gas es activo, reacciona con el metal, (Dióxido de carbono, "CO2", o las mezclas Argón "Ar", Oxígeno "O2", CO2), el proceso se llama MAG (Metal Active Gas).

Los gases inertes puros son utilizados generalmente en la soldadura de aleaciones metálicas no ferrosas (metales aleados cuyo principal constituyente no es el hierro). Mezclas de gases inertes con cantidades pequeñas de gases activos se utilizan generalmente con aceros aleados (aceros a los que se les añade elementos como cromo, molibdeno o níquel en pequeñas cantidades para mejorar determinada propiedad del mismo), mientras que mezclas más ricas en gases activos ó CO2 puro se utiliza en la soldadura de acero al carbono, lo cual es el caso más común.

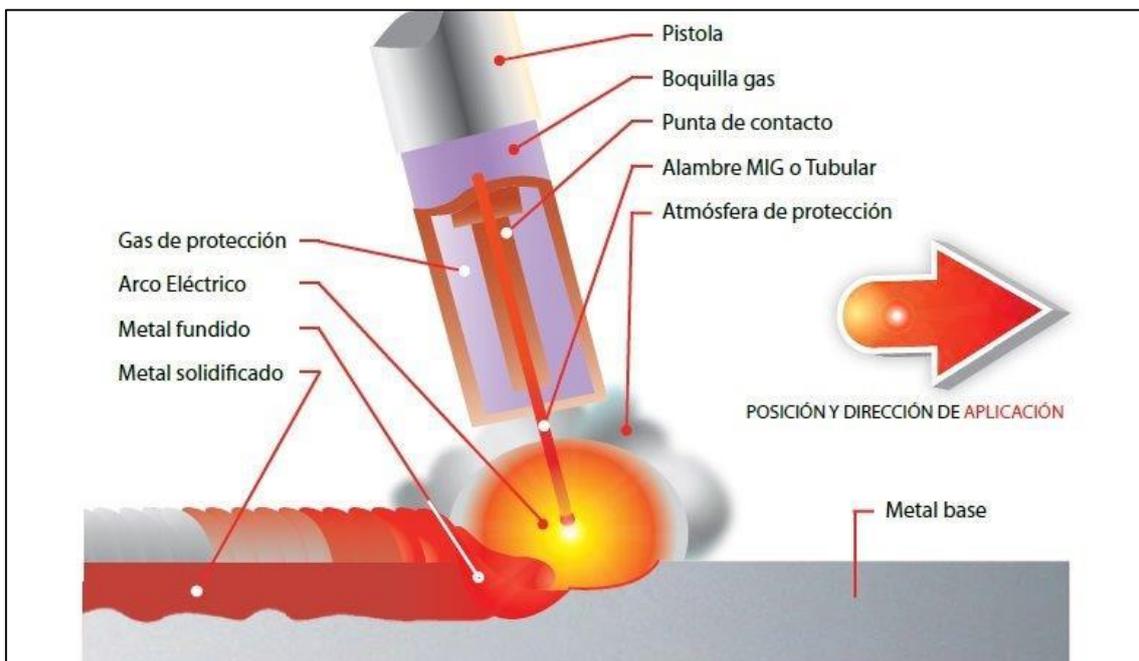


Figura 2. 11. Proceso de Soldadura GMAW
(Fuente: <http://www.seqpanama.com/procesos-2/>)

Este proceso tiene tres formas de aplicación:

- Semiautomático: La tensión de arco, la velocidad de alimentación del hilo, la intensidad de soldadura y el caudal de gas se regulan previamente. El avance de la antorcha de soldadura se realiza manualmente.
- Automático: Todos los parámetros, incluso la velocidad de soldadura, se regulan previamente, y su aplicación en el proceso es de forma automática.
- Robotizado: Todos los parámetros de soldeo, así como las coordenadas de localización de la junta a soldar, se programan mediante una unidad específica para este fin. La soldadura la efectúa un robot al ejecutar esta programación.

2.3.2.1. Equipo de soldadura

El equipo básico para la soldadura GMAW consiste en una fuente de energía, una antorcha, el recipiente de gas y el alimentador del alambre. La fuente de energía eléctrica tiene generalmente una salida de voltaje constante, regulable entre 15 y 50V, la cual es usada en conjunto con un sistema alimentador de alambre con velocidad regulable, que va desde 1 a 20 metros por minuto.

El equipo de soldadura Standard ajusta automáticamente el comportamiento del arco a través de las variaciones de corriente, lo que implica una simplificación de la operación.

La soldadura GMAW es utilizada prácticamente en todas las aplicaciones con corriente continua polaridad directa, con la antorcha conectada en el borne positivo del equipo (CC+). El proceso puede ser utilizado también con corriente alterna (CA) para la soldadura de chapas de pequeños espesores, principalmente en aluminio.

En este proceso de soldadura, más que qué en cualquier otro, la transferencia del metal de aporte a la pileta de fusión puede ser controlada con el ajuste de los parámetros de soldadura, y determina varias de sus características operacionales.

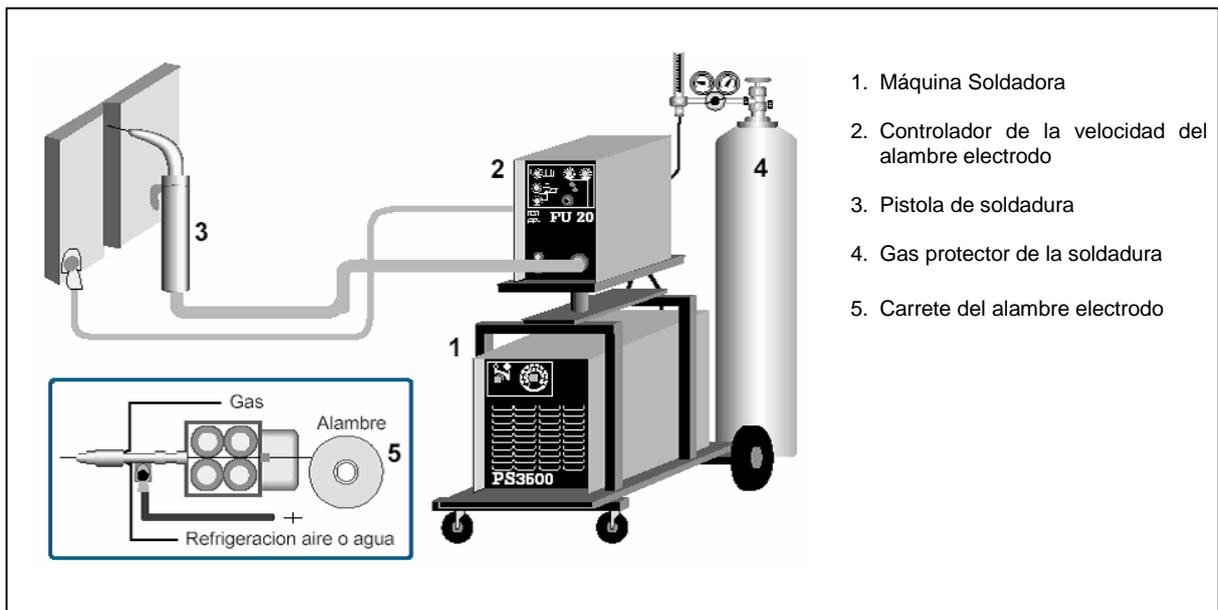


Figura 2. 12. Equipo de Soldadura GMAW
(Fuente: <http://procesosmanufacturau4.weebly.com/ensamble-por-soldadura.html>)

Este proceso se usa en la soldadura de aleaciones ferrosas y no ferrosas, en la construcción de recipientes, estructuras para edificaciones y de vehículos, y herrería en general, es también aplicable en la soldadura de tuberías, etc.

La transferencia del metal de aporte del electrodo, a través del arco, hacia la pileta de fusión se da básicamente por tres modos: Spray (“lluvia” fina de pequeñas gotas), de forma Globular y por Cortocircuitos. Dependiendo del ajuste de los parámetros operacionales, tales como el nivel de corriente y su polaridad, el voltaje, el diámetro del alambre, la composición química, y de la composición del gas de protección, se llega a obtener una transferencia de metal en los distintos modos citados anteriormente.

2.3.2.2. Transferencia por cortocircuito

Este tipo de transferencia se produce por contacto del alambre con la pileta de fusión periódicamente de 20 a 200 veces por segundo, dicha transferencia es producido por acción de la tensión superficial y fuerzas electromagnéticas, generalmente se obtiene cuando la intensidad y la tensión de soldeo son bajas.

Se utiliza para el soldeo en posición vertical, bajo techo y para el soldeo de espesores delgados o cuando la separación en la raíz es excesiva.

Los parámetros típicos oscilan entre los siguientes valores:

- Voltaje 16 a 22 V
- Intensidad de 50 a 150 A

Es la forma más utilizada de transferencia en la soldadura de aceros al carbono especialmente con protección de CO₂; debido a las bajas corrientes de operación que utiliza y a su independencia de la gravedad (peso de la gota). Es un modo de transferencia de baja energía de arco.

Para este tipo de transferencia es fundamental el diámetro del electrodo, el tipo de gas de protección y el procedimiento de soldadura empleado. Se utiliza por lo general alambre que va desde 0,6 a 1,2 mm de diámetro, usando como gas de protección CO₂ al 100%, o una mezcla de 75-80% de Argón, más 25-20% de CO₂. El bajo aporte de calor lo hace ideal para chapas delgadas. Los materiales base típicamente soldados por transferencia por cortocircuito van desde 0,6 a 5,0 mm de espesor.

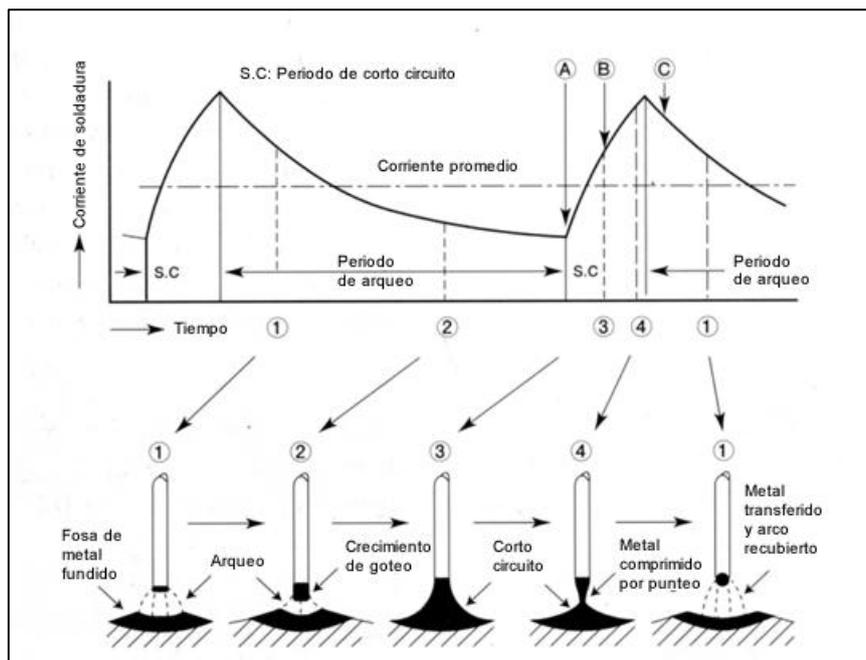


Figura 2. 13. Transferencia por cortocircuito

(Fuente: http://www.kobelco-welding.jp/espanol/education-center/abc/ABC_1998-03.html)

2.3.2.3. Transferencia globular

La transferencia globular se caracteriza por la formación de una gota relativamente grande de metal fundido en el extremo del alambre. La gota se va formando hasta que cae el baño fundido por su propio peso, es decir en el metal base se ejercen fuerzas de reacción que suben desde la pieza hacia el electrodo, las cuales son

responsables de la forma irregular de las gotas y del movimiento de giro hacia arriba de las gotas de metal líquido.

Puede presentar un alto nivel de salpicaduras y son comunes grandes fluctuaciones de corriente y voltaje, y la operación de soldadura está restringida a la posición plana.

Este tipo de transferencia no suele tener aplicaciones tecnológicas por la dificultad de controlar adecuadamente el metal de aportación y porque suele provocar faltas de penetración y sobre espesores elevados.

Los parámetros típicos son:

- Voltaje de 20 a 35 V.
- Intensidad de 70 a 255 A.

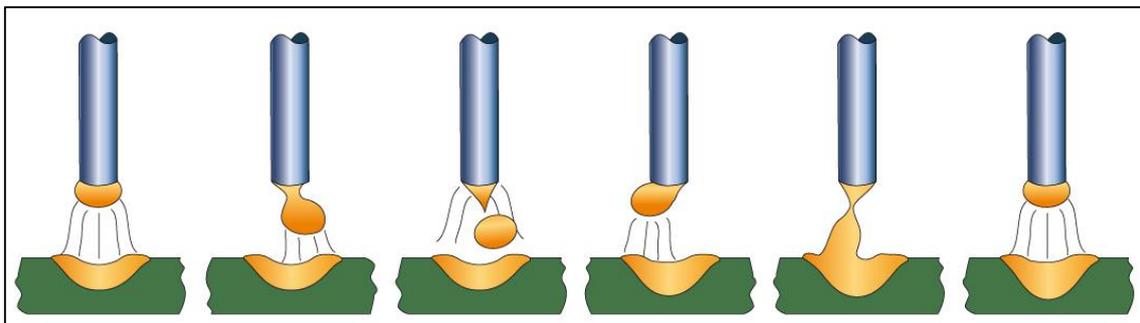


Figura 2. 14. Transferencia Globular
(Fuente: <https://es.slideshare.net/JoseCrisolMartinez/ud5-ef>)

2.3.2.4. Transferencia en spray

Esta forma de transferencia se produce en soldadura DC+ (corriente directa con electrodo conectado al positivo) bajo protección gaseosa de mezclas de gases ricas en argón. Este es el modo de transferencia de mayor energía para el proceso GMAW.

El metal se mueve en forma de gotas muy finas, pueden ser iguales o menores que el diámetro del alambre electrodo, y su transferencia se realiza desde el extremo del alambre al baño fundido en forma de una corriente axial bajo la acción de las fuerzas electromagnéticas con independencia de la gravedad. Las gotas son impulsadas en la dirección del alambre a través del arco hacia el metal base.

Es aplicable a cualquier alambre sólido y se puede utilizar con todas las aleaciones comunes como: aluminio, magnesio, acero al carbono, acero inoxidable, aleaciones de níquel y cobre, es decir se puede aplicar prácticamente a cualquier tipo de material base pero no se puede aplicar a espesores muy finos ya que la corriente de soldeo es muy alta, con este tipo de transferencia se consiguen grandes tasas de deposición y rentabilidad en la soldadura.

El arco resultante es muy estable y con ausencia de salpicaduras. La necesidad de usar altas corrientes da una pileta líquida de fusión muy fluida, que hace difícil o imposible su aplicación fuera de la posición plana (la pileta de fusión tiende a ser grande y difícil de controlar) o su aplicación en piezas de pequeño espesor (dado que puede producir exceso de penetración).

Para la mayoría de los diámetros y aleaciones de metal de aporte, el cambio de transferencia a spray se lleva a cabo desde una transferencia globular.

En soldaduras de acero al carbono, la transferencia spray se aplica a espesores grandes de material base, tanto en filetes como soldadura tipo ranura. El uso de mezclas de gas de protección que contengan más del 10% CO₂ reduce el perfil de penetración.

El decidir pasar a un modo de transferencia spray depende del espesor del material base y la capacidad de poder posicionar la junta a soldar en horizontal o plano.

Para este tipo de transferencia se usan gases inertes con altas intensidades y altos voltajes de la siguiente manera:

- Intensidad de 150 a 500 A
- Voltajes de 24 a 40 V.

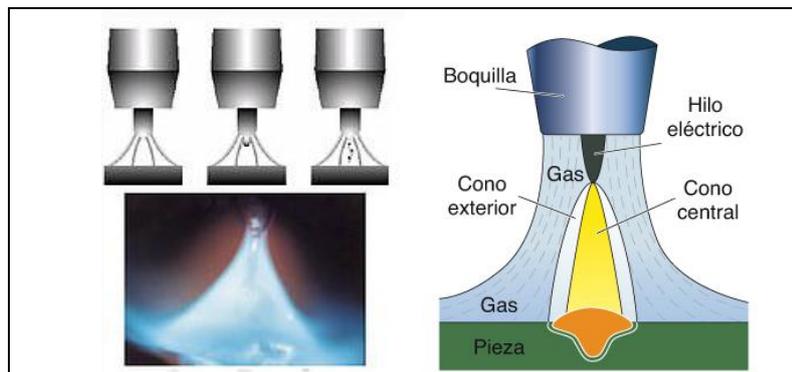


Figura 2. 15. Transferencia por spray.
(Fuente: <https://es.slideshare.net/JoseCrisolMartinez/ud5-ef>)

2.3.2.5. Materiales de aportación

Los electrodos/alambres empleados en el proceso GMAW son de diámetros pequeños (0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.6, 2.0, 3.0 y 3.2 mm) y se suministran en bobinas para colocar directamente en los sistemas de alimentación.

Para conseguir una alimentación suave y uniforme el alambre debe estar bobinado en capas perfectamente planas y es necesario que no esté tirante durante su suministro, sino que exista una cierta holgura entre la bobina y la vuelta que se está desenroscando. Al ser los alambres de pequeño diámetro y la intensidad de soldeo bastante elevada, la velocidad de alimentación del electrodo suele ser elevada del orden de 40 a 340 mm/s

(2.4 a 20.4 m/min.) para la mayoría de los metales y de hasta 600 mm/s (236 m/min.) para las aleaciones de magnesio.

Dados sus pequeños diámetros la relación superficie / volumen es muy alta, por lo que pequeñas partículas de polvo, suciedad grasa, etc. pueden suponer una importante cantidad en relación con el volumen aportado, de aquí que sea de gran importancia la limpieza.

Los alambres de acero reciben a menudo un ligero recubrimiento de cobre que mejora el contacto eléctrico, la resistencia a la corrosión y disminuye el rozamiento con los distintos elementos del sistema de alimentación y la pistola.

Cuando se varía el diámetro del alambre utilizado se debe cambiar el tubo guía, el tubo de contacto y ajustar los rodillos, o cambiarlos en caso de que no fueran adecuados para ese diámetro de alambre.

Según la AWS 5.18 los alambres electrodos tienen la siguiente designación:

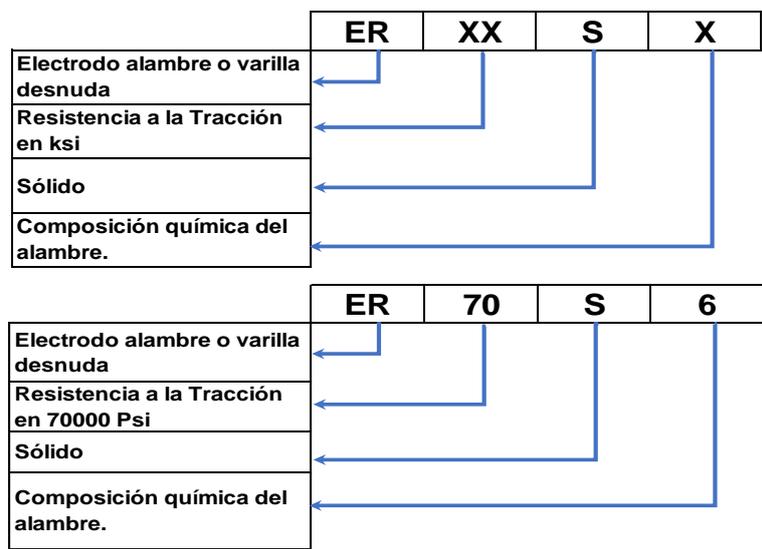


Figura 2. 16. Designación de los Electrodo del Proceso MIG - MAG
(Fuente: Manual de materiales y sistemas de soldadura INDURA)

2.3.3. Proceso de Soldadura FCAW (Flux Cored Arc Welding)

La soldadura por arco con alambre tubular es un proceso en el cual se obtiene la unión de los metales por calentamiento de estos en un arco entre un electrodo tubular continuo y la pieza. El alambre tubular, a diferencia del alambre sólido comúnmente usado, tiene un fundente (flux) interno que desempeña funciones similares al revestimiento del electrodo en el proceso de electrodo revestido, es decir el flux interior aporta a la estabilización del arco, el ajuste de la composición química de la soldadura, la protección, etc.

El proceso FCAW tiene dos variaciones principales que difieren en su método de protección del arco y de la poza de soldadura contra la contaminación por gases atmosféricos (oxígeno y nitrógeno), soldadura auto protegida y con protección gaseosa, en ambos métodos, el material del núcleo del electrodo proporciona una capa de escoria abundante que protege el metal de soldadura durante su solidificación.

2.3.3.1. Soldadura auto protegida (Innershield).

La soldadura auto protegida es cuando el núcleo del alambre (flux), proporciona toda la protección necesaria en la región de soldadura mediante la descomposición y vaporización del mismo a causa del calor generado por el arco, en este proceso no se usa gas de protección.

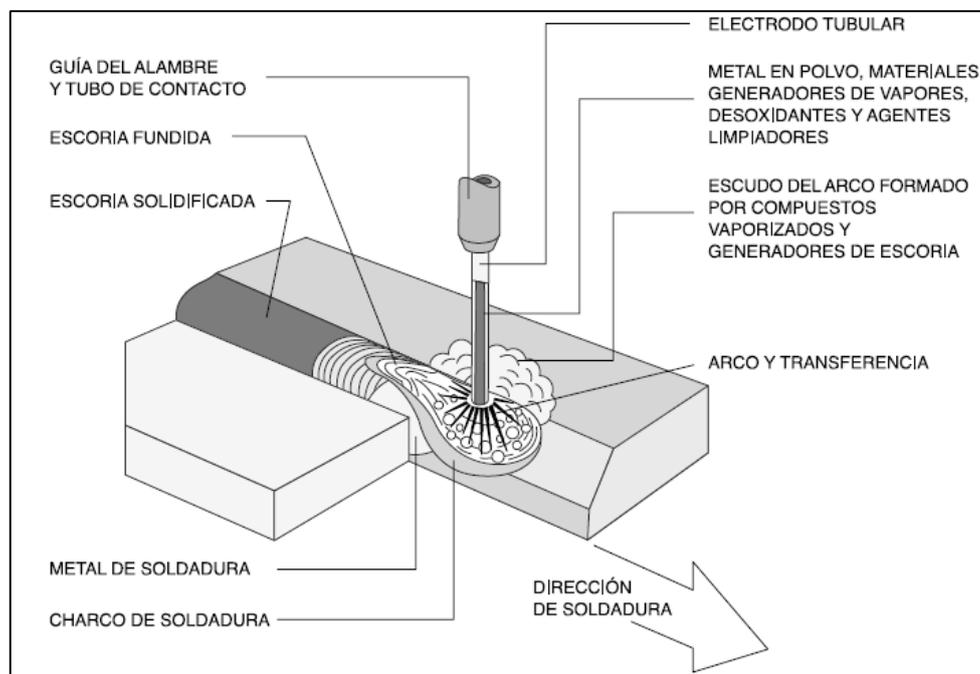


Figura 2. 17. Soldadura por arco con núcleo de fundente y autoprotección.
(Fuente: Manual de materiales y sistemas de soldadura INDURA)

2.3.3.2. Soldadura con protección gaseosa (gas-shielded ó outershielded).

Este proceso utiliza un flujo de gas externo que protege el charco de soldadura al igual que en el proceso GMAW con alambre sólido, generalmente se utiliza una mezcla de argón y dióxido de carbono, también se utiliza 100% dióxido de carbono, el cual puede servir para algunas aplicaciones que se unen con el proceso de soldadura mig/mag.

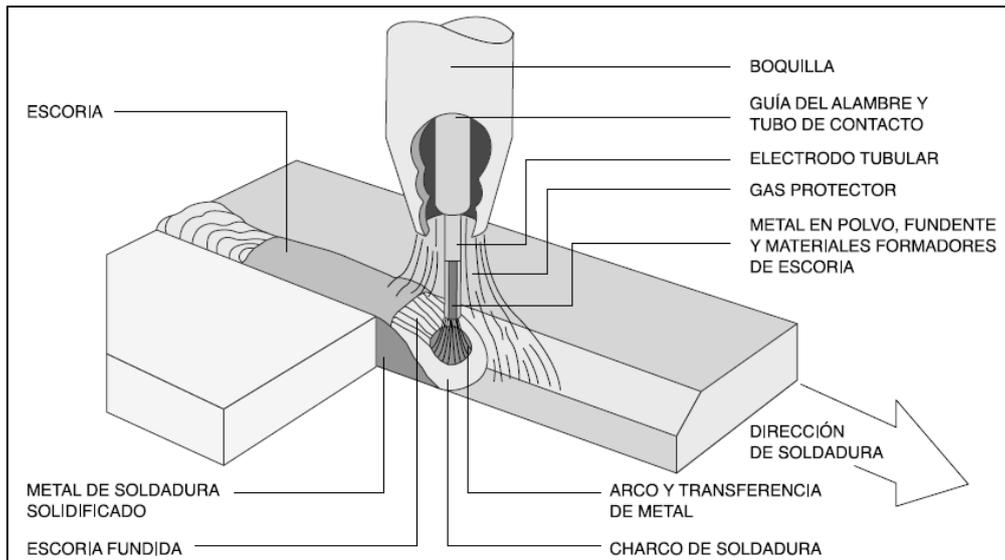


Figura 2. 18. Soldadura por arco con núcleo de fundente protegida con gas.
(Fuente: Manual de materiales y sistemas de soldadura INDURA)

2.3.3.3. Gases de Protección

Los gases utilizados en el soldeo con alambre tubular protegido por gas de cualquier material son:

- CO₂
- Mezclas 25% de CO₂ + Argón
- Argón + 2% Oxígeno

En general se debe utilizar la mezcla de gases recomendada por el fabricante del alambre.

Como principales ventajas del empleo de CO₂ se tiene bajo costo y gran penetración. Cuando se suelda con CO₂ suele producirse transferencia globular, aunque existen algunos fundentes que consiguen transferencia spray incluso con CO₂.

2.3.3.4. Materiales de aportación

Los alambres tubulares son electrodos continuos similares a los empleados en el proceso GMAW, con la diferencia de que en su interior contiene un fundente que tiene funciones similares a las del revestimiento de los electrodos en el proceso SMAW, la cantidad de fundente varía de un 15% a un 35% en peso.

La composición del núcleo de fundente varía de acuerdo con la clasificación del electrodo y con el fabricante.

Las funciones principales de los ingredientes del núcleo de fundente son las siguientes:

- Conferir al metal de soldadura ciertas propiedades mecánicas, metalúrgicas y de resistencia a la corrosión mediante un ajuste de la composición química.
- Promover la integridad del metal de soldadura protegiendo el metal fundido del oxígeno y el nitrógeno del aire.
- Extraer impurezas del metal fundido mediante reacciones con el fundente.
- Producir una cubierta de escoria que proteja el metal del aire durante la solidificación y que controle la forma y el aspecto del cordón de soldadura en las diferentes posiciones para las que es apropiado.
- Estabilizar el arco proporcionándole un camino eléctrico uniforme, para así reducir las salpicaduras y facilitar la deposición de cordones lisos, uniformes y del tamaño correcto.

Según la AWS los alambres tubulares se designan usando una serie de números y letras, la cual está basada en las propiedades mecánicas del depósito de soldadura.

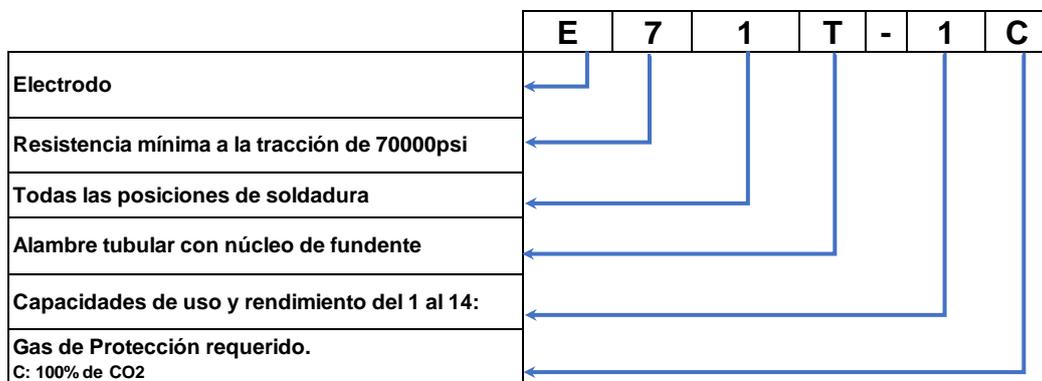
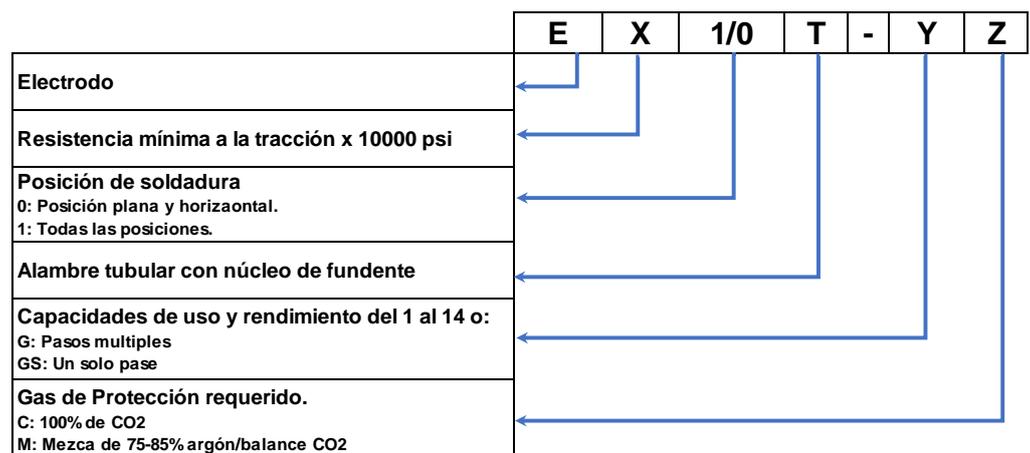


Figura 2. 19. Designación de los electrodos del proceso FCAW.
(Fuente: Manual de materiales y sistemas de soldadura INDURA)

2.4. Monopolos

La antena monopolo es una estructura que está conformado por un solo brazo rectilíneo que irradia las ondas electromagnéticas en posición vertical sobre la tierra y en la base se encuentra conectado un generador, además tiene un terminal conectado a tierra.

La aplicación más común es en las torres de transmisión, emisoras de radio, televisión o celulares, donde básicamente toda la estructura metálica actúa como antena. Se utilizan para la transmisión de frecuencias bajas como son las estaciones de onda media (AM), debido a que en estas frecuencias la longitud de onda es muy elevada, mediante la utilización de monopolos es posible montar antenas de menor longitud física y elevado rendimiento.

Los monopolos se usan a bajas frecuencias, donde es difícil construir dipolos debido a su gran tamaño, por lo que tiene la facilidad de construcción e instalación sobre las distintas superficies. Irradia la mitad de la potencia de la antena dipolo.

La estructura de los monopolos es diseñada y fabricada en secciones tubulares de diámetros variables de acuerdo a condiciones de carga del monopolo y las especificaciones del cliente. Cada monopolo se fabrica con su respectiva escalera de acceso, escalerilla para Guías de Onda, línea de vida y su correspondiente plataforma.



Figura 2. 20. Estructura de los monopolos.
(Fuente: <http://www.jme.pe/proyectos.html>)

La estructura de los monopolos está constituida por secciones tubulares de secciones variables de acuerdo a las condiciones de carga del monopolo, por tal motivo se construyen estructuras modulares o tramos de 3 a 6 metros de longitud, para el

momento del ensamblaje total de la estructura alcanzar alturas máximas de 18, 24, 30, 36 y 42 mts.

Cada tramo está constituido por dos bridas que facilita el ensamblaje en campo, escalerillas para guías de onda, soportes para antenas de microondas en la cantidad especificada de acuerdo al diseño del monopolo.



Figura 2. 21. Montaje de la estructura para monopolos
(Fuente: Imágenes de Instrumental INC.)

2.4.1. Proceso de fabricación de Monopolos

El proceso de fabricación de monopolos implica varios procesos, dentro de los cuales el más importante es el proceso de soldadura, ya que al ser una estructura metálica rígida debe cumplir los requerimientos de la norma AWS D1.1 (Código de soldadura estructural), y para brindar una buena resistencia a la corrosión a causa de las condiciones ambientales debe cumplir con los requerimientos de la norma ASTM 123 (Standard Specification for Zinc Hot-Dip Galvanized Coatings on Iron and Steel Products).

El proceso de fabricación de las estructuras para monopolos se representa en el siguiente diagrama de flujo:

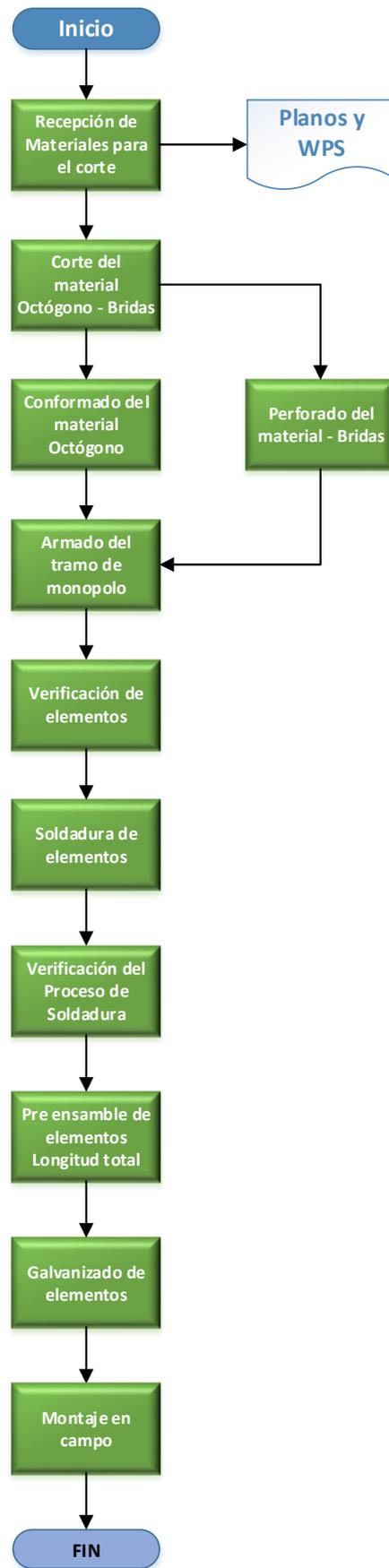


Figura 2. 22. Proceso de fabricación de monopolos.
(Fuente: Imágenes de Instrumental INC.)

2.4.2. Definición de los problemas de soldadura

El proceso de soldadura GMAW es el más común empleado para la fabricación de monopolos, lo cual implica varios defectos en la soldadura a causa de la falta de control en el proceso mencionado, los defectos más comunes se enuncian a continuación:

- a) Porosidades.- Las porosidades se pueden generar a causa de:
 - El material base está contaminado y existe excesiva cantidad de corrosión.
 - Extensión visible (“stickout”) muy grande.
 - Caudal de gas muy bajo o muy alto, lo que produce una protección defectuosa.
 - Gas de protección contaminado.
 - Excesivas corrientes de viento.
 - Velocidad de soldadura elevada.

- b) Falta de fusión o penetración.- La falta de fusión generalmente se da en el soldeo de metales de espesores superiores a 12 mm, los cuales pueden ser causados por:
 - Parámetros de soldeo no adecuados.
 - Manipulación del alambre inadecuada.
 - Diseño inapropiado de la junta o del bisel.

- c) Grietas.- Las grietas son defectos poco frecuentes y son causados por:
 - Embridamiento excesivo.
 - Alambre electrodo inadecuado.

- d) Agujeros.- Los agujeros en ciertas zonas de la estructura son causados por:
 - Intensidad de corriente muy elevada.
 - Movimiento de avance muy lento.
 - Los bordes de las chapas metálicas están muy separados.



Figura 2. 23. Defectos de soldadura en la fabricación de monopolos.
(Fuente: Imágenes en probetas de Instrumental INC.)

Para la corrección de los defectos mencionados es importante realizar un análisis mediante un diseño experimental para la implementación del control del proceso de soldadura.

CAPITULO III

ANÁLISIS DE DATOS DEL PROCESO DE SOLDADURA

3.1. Diseño experimental

El diseño experimental es el planteamiento de un conjunto de pruebas, de tal manera que los datos generados puedan analizarse estadísticamente para obtener conclusiones válidas, por lo cual el diseño experimental puede ser considerado como parte del proceso científico y una forma de aprender el funcionamiento de los sistemas o procesos. En un diseño experimental el investigador establece un conjunto de circunstancias, de causa y efecto bajo condiciones específicas, para lo cual se aplica el método científico al observar, medir y evaluar los resultados obtenidos.

Cada investigación presenta características específicas, lo que hace que la aplicación sea única; para lo cual el investigador debe tener claridad, acerca de los principios y características de cada uno de los diseños. Es importante lograr la eliminación de las variables exógenas para alcanzar resultados confiables de tal manera que, en el momento de formalizar la investigación, el modelo escogido sea el que se ajuste a las condiciones del entorno.

Si se reduce la variación en el diseño de experimentos se establece el control del proceso, por lo que es importante identificar los factores que pueden tener influencia en el resultado de la investigación, tales como la estimación del error experimental, la homogenización del entorno, la selección del material disponible, la distribución aleatoria de los tratamientos y de las replicaciones con los cuales se logra obtener una valoración más precisa del efecto de cualquier variación.

En el diseño de experimentos, es importante definir el tamaño de la unidad experimental y el marco de referencia por unidad en estudio, lo que asegura el aumento del nivel de confianza de la investigación.

Para determinar los factores y variables, se deberá definir rangos, interacciones y niveles de medición teniendo en cuenta el efecto del muestreo y la confiabilidad de métodos de prueba, al igual que las limitaciones de talento humano, tiempo, costo, materiales, equipos y condiciones del lugar.

El análisis y comparación con estudios similares o que traten el mismo problema son vitales, para ello se emplean pruebas universales que dan confiabilidad a las conclusiones y valoración a la investigación, lo que conlleva a identificar y plantear nuevas hipótesis para realizar investigaciones futuras.

En el diseño experimental se emplea la estadística multi-variada para demostrar la relación de causa y efecto entre las variables. En una investigación se debe tener claridad sobre el tiempo, forma e instrumentos, con los que se harán las mediciones. Con frecuencia aparecen dificultades aleatorias en el diseño en la toma de datos por lo que es recomendable realizar un experimento piloto, el cual permite encontrar nuevas fuentes de variación y simplificar el procedimiento experimental antes de realizarlo. Todo proceso o sistema productivo se puede representar mediante el modelo mostrado en la siguiente figura.

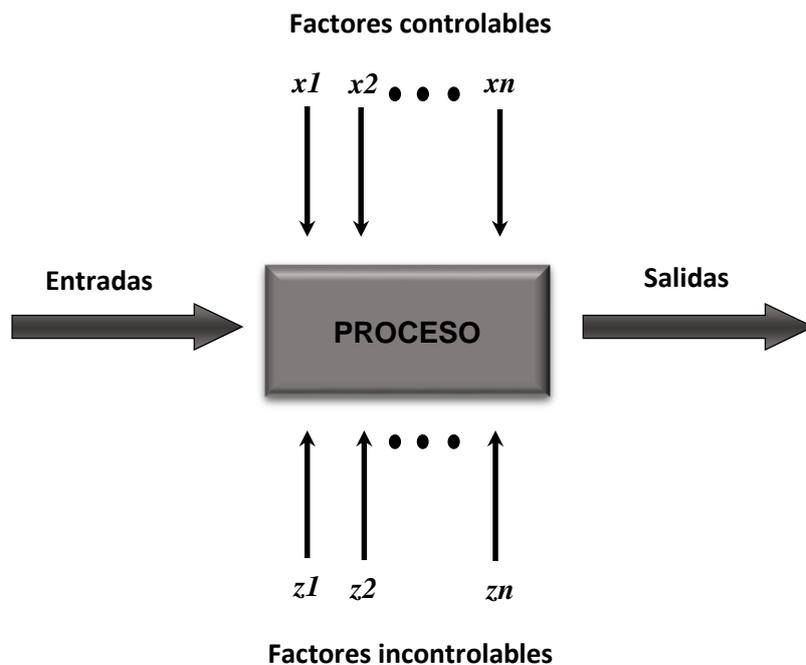


Figura 3. 1. Modelo de un proceso o sistema.
(Fuente: Diseño experimental, Montgomery Douglas)

Es decir, que puede ser visualizado como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos que transforman alguna entrada (materia prima), en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas variables dentro del proceso son controlables, mientras que otras son incontrolables.

Un experimento diseñado tiene por objetivo:

- Determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia en la variable de respuesta.

- Determinar el mejor valor de las variables controlables que influyen en la respuesta, de manera que ésta, tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado.
- Determinar la mejor combinación de las variables controlables que ayuden a reducir la variabilidad de la respuesta.
- Establecer la combinación óptima de las variables controlables, con el objetivo de minimizar los efectos de las variables incontrolables.

El diseño experimental es un medio de importancia en la Ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura, así como en el desarrollo de nuevos productos. Su aplicación en una fase temprana de la evolución de un proceso puede dar como resultado una mejora del rendimiento del proceso, la reducción de la variabilidad y aumento del apego a especificaciones técnicas o valor objetivo con una minimización de costos.

3.1.1. Tipos de variabilidad

Uno de los principales objetivos de los modelos estadísticos y, en particular, de los modelos de diseño de experimentos, es controlar la variabilidad de un proceso aleatorio que puede tener diferente origen. De hecho, los resultados de cualquier experimento están sometidos a tres tipos de variabilidad cuyas características se mencionan a continuación.

3.1.1.1. Variabilidad sistemática y planificada

Esta variabilidad viene originada por la posible dispersión de los resultados debida a diferencias sistemáticas entre las distintas condiciones experimentales impuestas en el diseño por expreso deseo del experimentador. Es el tipo de variabilidad que se intenta identificar con el diseño estadístico.

Cuando este tipo de variabilidad está presente y tiene un tamaño importante, se espera que las respuestas tiendan a agruparse formando grupos (clusters). Es deseable que exista esta variabilidad y que sea identificada y cuantificada por el modelo.

3.1.1.2. Variabilidad típica de la naturaleza del problema y del experimento

Es la variabilidad debida al ruido aleatorio. Este término incluye, entre otros, a la componente de variabilidad no planificada denominada error de medida. Es una variabilidad impredecible e inevitable.

Esta variabilidad es la causante de que si en un laboratorio se toman medidas repetidas de un mismo objeto ocurra que, en muchos casos, la segunda medida no sea igual a la primera y, más aún, no se puede predecir sin error el valor de la tercera. Sin embargo,

bajo el aparente caos, existe un patrón regular de comportamiento en esas medidas: todas ellas tenderán a fluctuar en torno a un valor central y siguiendo un modelo de probabilidad que será importante estimar.

Esta variabilidad es inevitable pero, si el experimento ha sido bien planificado, es posible estimar (medir) su valor, lo que es de gran importancia para obtener conclusiones y poder hacer predicciones. Es una variabilidad que va a estar siempre presente pero que es tolerable.

3.1.1.3. Variabilidad sistemática y no planificada

Esta variabilidad produce una variación sistemática en los resultados y es debida a causas desconocidas y no planificadas. En otras palabras, los resultados están siendo sesgados sistemáticamente por causas desconocidas. La presencia de esta variabilidad supone la principal causa de conclusiones erróneas y estudios incorrectos al ajustar un modelo estadístico, para lo cual existen dos estrategias básicas para tratar de evitar la presencia de este tipo de variabilidad: la aleatorización y la técnica de bloques.

3.1.2. Realización de experimentos

La realización de un experimento tiene inmerso varios niveles cuando existe más de un factor, para lo cual se eligen unidades experimentales que deben generar una variable de respuesta que facilita el análisis del experimento.

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones.

La forma tradicional que se utilizaba en la experimentación para el estudio de estos problemas, se basa en estudiar los factores uno a uno, lo que implica variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. Esta metodología presenta grandes inconvenientes tales como un gran número de pruebas y las conclusiones obtenidas en el estudio de cada factor tienen un campo de validez muy restringido.

Las técnicas de diseño de experimentos se basan en estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, son más eficaces y proporcionan mejores resultados con un menor coste.

A continuación se enumeran las etapas que deben seguirse para una correcta planificación de un diseño experimental, las cuales deben ser ejecutadas de forma secuencial.

- a) Definir los objetivos del experimento. Identificar todas las posibles fuentes de variación, incluyendo:
 - Factores tratamiento y sus niveles.
 - Unidades experimentales.
 - Factores (factores bloque, factores ruido y covariables).
- b) Elegir una regla de asignación de las unidades experimentales a las condiciones de estudio (tratamientos).
- c) Especificar las medidas con que se trabajará (la respuesta), el procedimiento experimental y anticiparse a las posibles dificultades.
- d) Realizar la experimentación de acuerdo con el plan previamente establecido en el diseño.
- e) Esquematizar los pasos del análisis
- f) Determinar el tamaño muestral.
- g) Analizar estadísticamente los resultados obtenidos y comprobar si las hipótesis establecidas y el modelo de diseño elegido se adecuan a la situación estudiada.
- h) Realizar las modificaciones oportunas para ampliar o modificar el diseño.
- i) Obtener las conclusiones apropiadas.

El momento de realizar el análisis estadístico de datos se puede cometer diferentes errores, los más comunes son la inconsistencia de los datos, variables con fuerte correlación o el rango de las variables controladas es limitado

3.1.2.1. Inconsistencia de los datos

Los procesos cambian con el tiempo, se producen varios cambios (cambios de personas, mejoras del personal por procesos de aprendizaje, motivación, etc.), cambios en las máquinas (reposiciones, reparaciones, envejecimiento, etc.), estos cambios tienen influencia en los datos recogidos, lo que hace que los datos históricos sean poco fiables, sobre todo si se han recogido en un amplio espacio de tiempo.

3.1.2.2. Variables con fuerte correlación

Puede ocurrir que en el proceso existan dos o más variables altamente correlacionadas que pueden llevar a situaciones confusas.

Por ejemplo, en el proceso hay dos variables X1 y X2 fuertemente correlacionadas que influyen en la respuesta, pero si en los datos que se tiene aumenta al mismo tiempo el valor de las dos variables no es posible distinguir si la influencia es debida a una u otra o a ambas variables (confusión de los efectos). Otra situación problemática se presenta si solo se dispone de datos de una variable (por ejemplo de X1 y no de X2), lo que puede llevar a pensar que la variable influyente es la X1 cuando, en realidad, la variable influyente es la X2 (variable oculta).

3.1.2.3. El rango de las variables controladas es limitado

Si el rango de una de las variables importantes e influyentes en el proceso es pequeño, no se puede saber su influencia fuera de ese rango y puede quedar oculta su relación con la variable de interés o los cambios que se producen en la relación fuera del rango observado. Esto suele ocurrir cuando se utilizan los datos recogidos al trabajar el proceso en condiciones normales y no se experimentales (cambiando las condiciones de funcionamiento) para observar el comportamiento del proceso en situaciones nuevas.

3.2. Análisis de datos del proceso de soldadura

Para efecto de análisis se toma como referencia el diseño experimental mencionado en el numeral anterior, para lo cual se establecieron una muestra en los diferentes elementos soldados para la construcción de los monopolos, tomando en cuenta espesores del material y posición de soldadura en el ensamblaje, los cuales se mencionan a continuación:

a) Unión brida - octógono

Esta junta es de vital importancia ya que es la base de la estructura y la que garantiza la estabilidad de la misma, dicha junta tiene inmersa varios factores tales como: corriente, voltaje, abertura de raíz, espesores de elementos, posición y velocidad de soldadura.

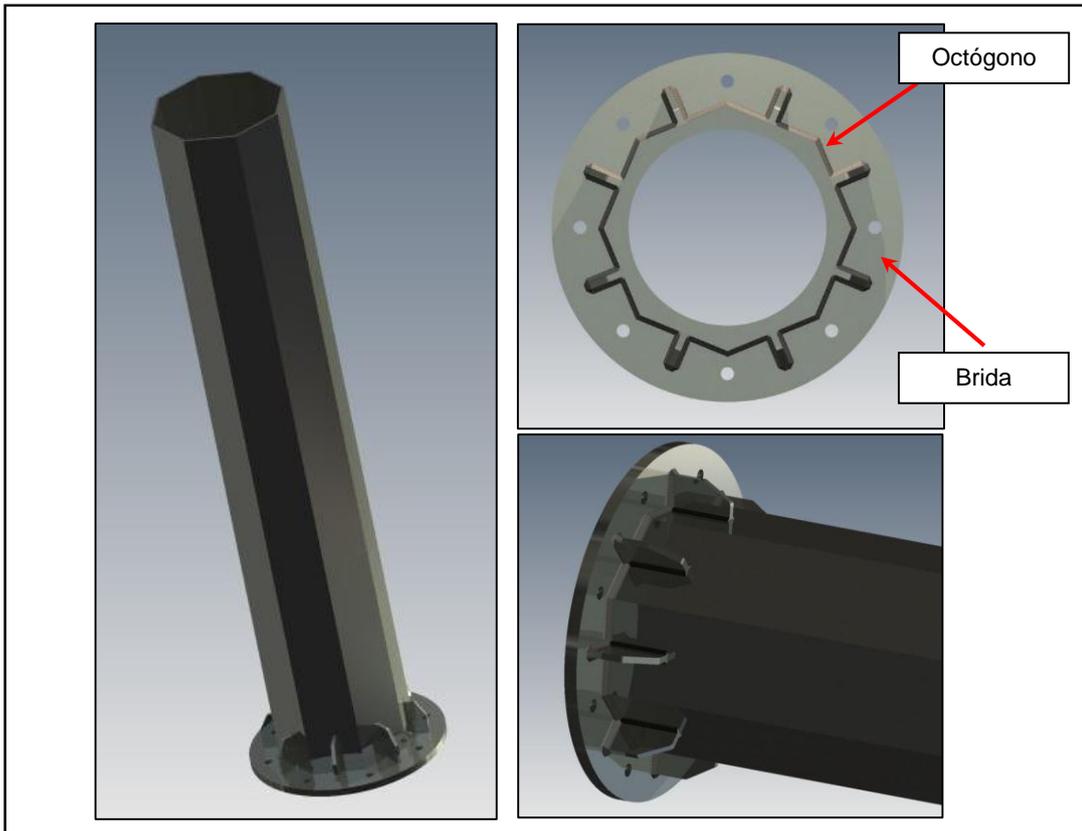


Figura 3. 2. Unión Octógono – Brida.
 (Fuente: Esquema del software de diseño Inventor)

b) Unión octógono - octógono

Esta junta es el cuerpo de la estructura y es la que proporciona la rigidez en sentido longitudinal, tiene inmersa factores tales como: corriente, voltaje, abertura de raíz, espesores de elementos, posición y velocidad de soldadura.

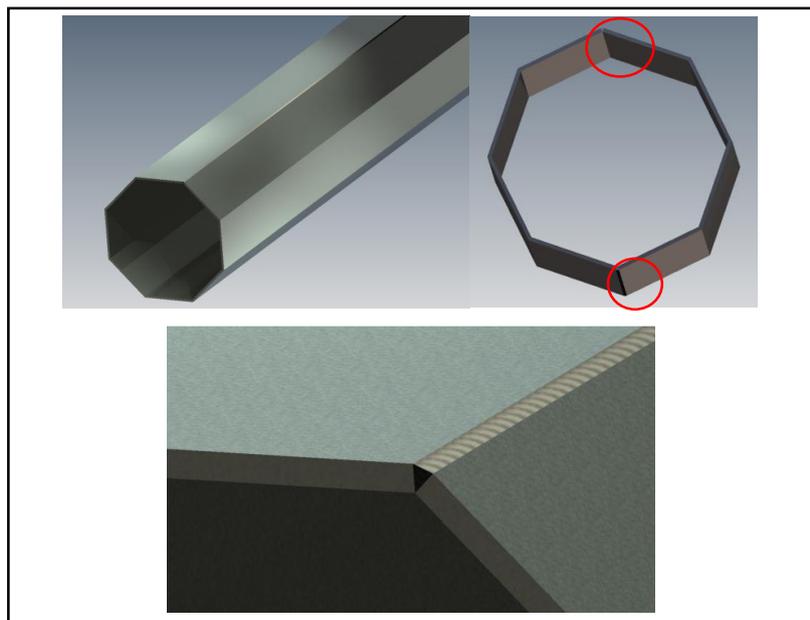


Figura 3. 3. Unión Octógono – Octógono.
 (Fuente: Esquema del software de diseño Inventor)

En los casos mencionados anteriormente se tienen combinaciones de espesores según la altura de la estructura.

3.2.1. Definición de los objetivos del ensayo

Para el ensayo propuesto se identifican los siguientes objetivos:

- a) Verificar el estado de la soldadura mediante radiografías en las distintas juntas soldadas.
- b) Verificar la resistencia de las juntas soldadas mediante ensayos de doblado, para el análisis respectivo se toma como unidad experimental una estructura de 36 m. de longitud, compuesta de 6 tramos de 6 metros, para lo cual se toman 12 probetas de diferentes secciones de la estructura, las mismas que son soldadas en condiciones normales de trabajo para la fabricación de monopolos.
- c) Verificar la microestructura del material y defectos microscópicos de soldadura mediante micrografías.
- d) Verificar las zonas de soldadura en distintas probetas con un mismo procedimiento.
- e) Analizar estadísticamente las variables principales de soldadura y los defectos presentes en las probetas.
- f) Identificar las variables con mayor variabilidad para darles un tratamiento especial.
- g) Verificar si el ensayo fue el adecuado o se necesitan características adicionales para un nuevo ensayo.

3.2.2. Identificación de las fuentes de variación

Para el análisis de este ensayo se toman a consideración las variables del proceso GMAW que afectan la penetración de la soldadura, dichas fuentes de variación son:

- Corriente de Soldadura
- Polaridad
- Velocidad de Alimentación del Electrodo
- Voltaje de Arco (Longitud de Arco)
- Velocidad de Avance
- Extensión del Electrodo (Stick out)
- Orientación del Electrodo (Ángulo de Empuje o Ángulo de Arrastre)
- Posición de la Junta a Soldar
- Diámetro del Electrodo
- Composición del Gas de Protección y Flujo de Salida del Gas
- Experiencia y habilidad del soldador

- Tipo de material de aporte y proveedor
- Condiciones del material de aporte
- Proceso de soldadura

3.2.3. Regla de asignación de las unidades experimentales

Se escogen las probetas que resisten la mayor cantidad de cargas para analizar su macro y microestructura, las demás se analizarán mediante ensayos destructivos de doblado y los datos de las variables esenciales serán analizados estadísticamente.

3.2.4. Realización del ensayo

El ensayo se realizó mediante el proceso GMAW en acero A572 - G50, para lo cual se tomó una muestra de 12 probetas en las cuales se realizó los respectivos ensayos destructivos, macrografías y micrografías respectivas.

3.2.5. Ensayos de doblado

Para este tipo de ensayo se tomaron probetas de la unión octógono – octógono en diferentes espesores y una probeta de la unión octógono – brida, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. 1 Ensayo de doblado

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Imágenes			
Tipo de Unión	Octógono - Octógono	Octógono - Octógono	Octógono - Octógono
Ensayo	Doblado de cara	Doblado de raíz	Doblado de raíz
Espesor (mm)	6 - 6	6 - 6	10 - 10
Grietas	X	X	X
Cráteres	X		
Falta de fusión	X	X	X
Porosidades		X	X
Chorro de material de aporte		X	X
	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6

Imágenes			
Tipo de Unión	Brida - Octógono	Octógono - Octógono	Octógono - Octógono
Ensayo	Doblado de raíz	Doblado de raíz	Doblado de raíz
Espesor (mm)	15 - 8	6 - 6	8 - 8
Grietas	X	X	X
Cráteres	No existe	No existe	No existe
Falta de fusión	X	X	X
Porosidades	X	X	X
Chorro del material de aporte	X	X	X

(Fuente: Ensayo experimental)

Una vez realizados los ensayos respectivos es importante cuantificar los defectos encontrados en las diferentes probetas, para darle un tratamiento más profundo a las variables que causan los defectos, los mismos que podemos observar en la siguiente tabla:

Tabla 3. 2 Detalle de defectos encontrados en el ensayo.

Defectos	Cantidad	Porcentaje
Grietas	6	100%
Cráteres	1	17%
Falta de fusión	6	100%
Porosidades	5	83%
Chorro del material de aporte	5	83%

(Fuente: Ensayo experimental)

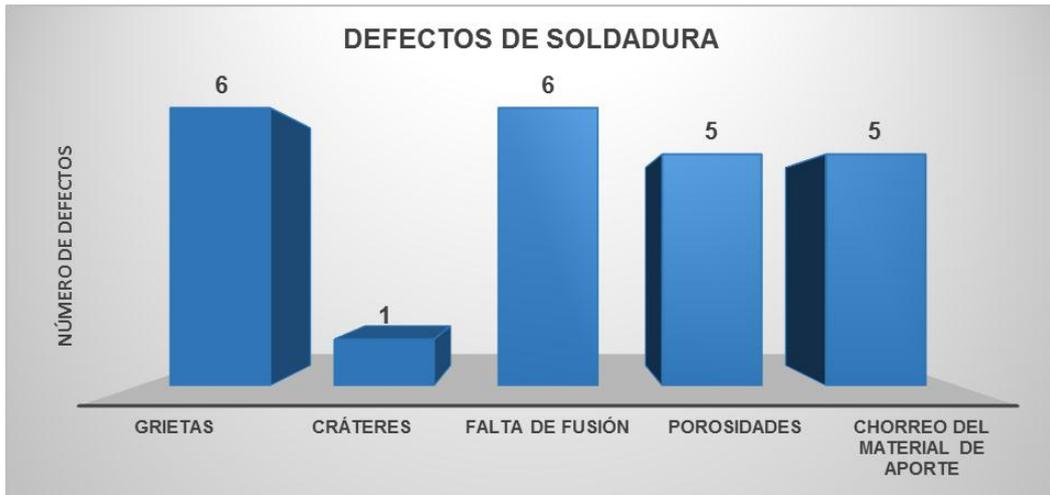


Figura 3. 4 Cantidad de defectos presentes en el ensayo.

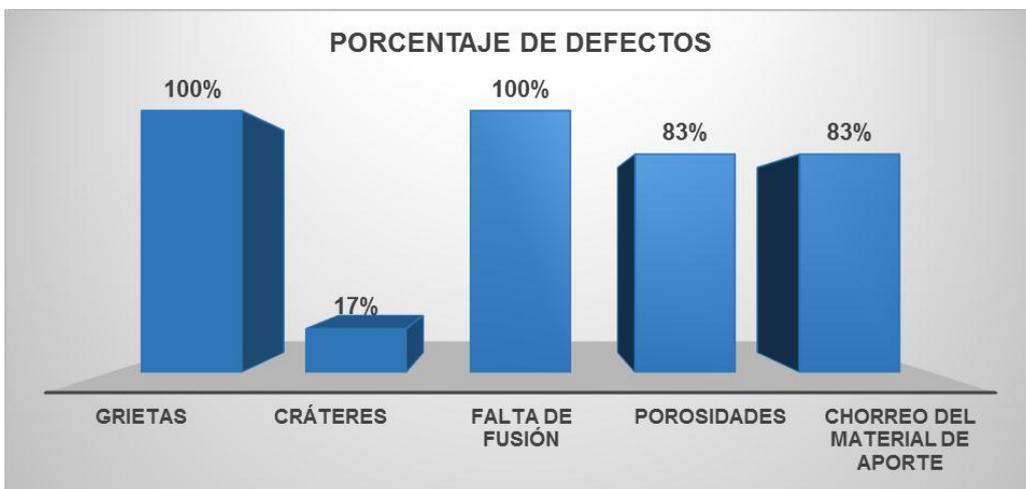


Figura 3. 5 Porcentaje de defectos presentes en el ensayo.

3.2.5.1. Radiografía de las probetas del ensayo

Las pruebas radiográficas sirven para ver discontinuidades internas del cordón y permite analizar si amerita o no reparación, a continuación se observa la prueba radiográfica del ensayo de la unión entre las caras del octógono:

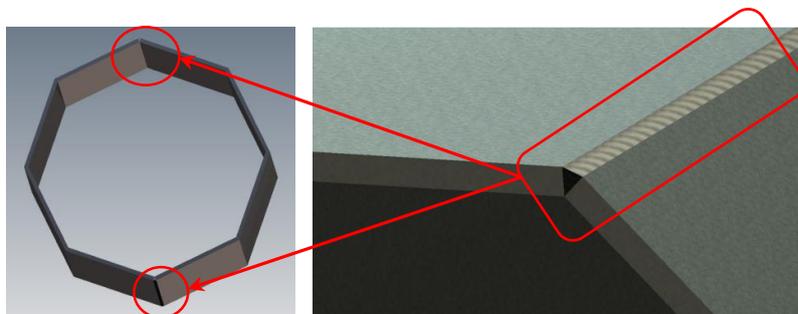


Figura 3. 6. Ubicación de la probeta para radiografía.
(Fuente: Esquema del software de diseño Inventor)

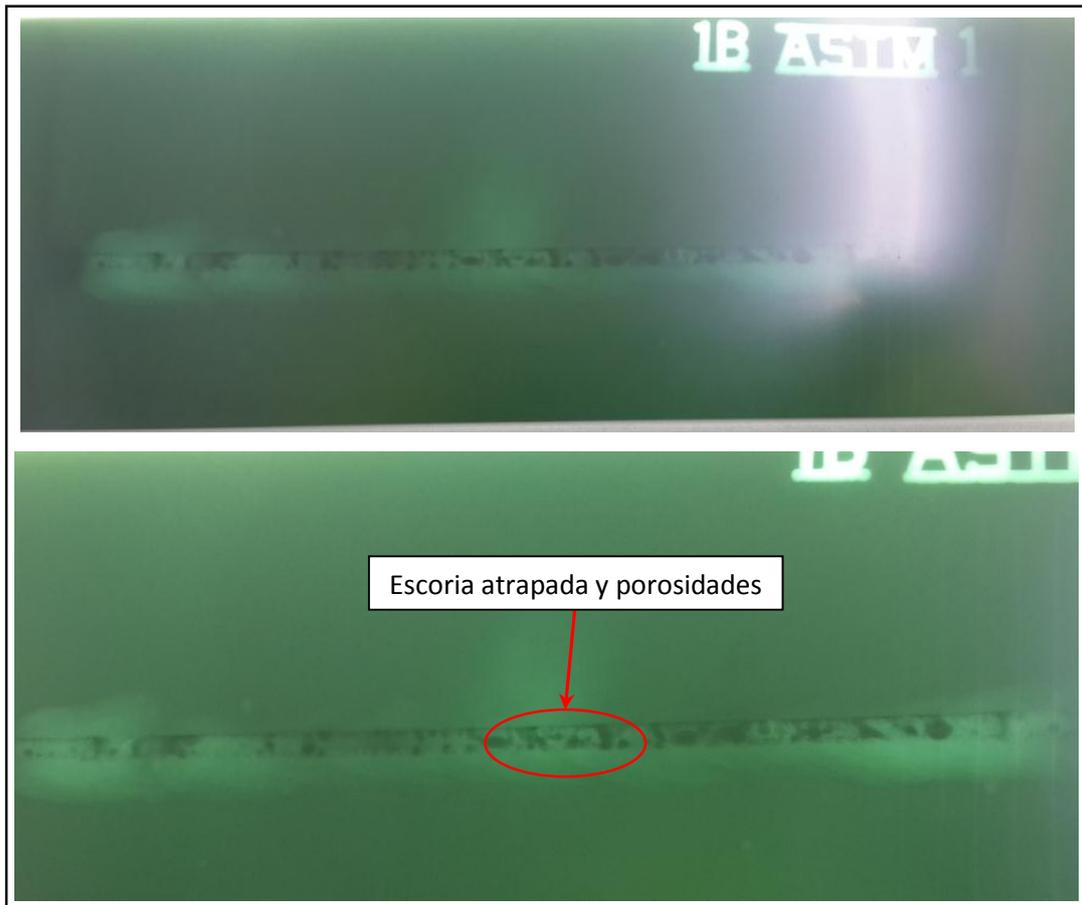


Figura 3. 7. Radiografía de la junta Octógono – Octógono.
(Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de END)

Las pruebas radiográficas de la probeta analizada muestran varias discontinuidades a lo largo del cordón de soldadura, por lo que se ven claramente escoria atrapada y porosidades, adicionalmente no existe una buena fusión entre el material base y el material de aporte ya que se aprecian aristas vivas en la zona de soldadura, dichas discontinuidades no son permitidas de acuerdo el código de soldadura AWS D1.1, por lo que es de vital importancia realizar la reparación respectiva del cordón para evitar fallas en la soldadura.

3.2.5.2. Macrografías del ensayo

El ensayo macrográfico pretende determinar la geometría de la unión soldada y el grado de penetración de los cordones de soldadura en el material base, principalmente en las uniones más críticas que son la unión Brida – Octógono.

A continuación se observa las imágenes de cuatro probetas que fueron analizadas para determinar si los defectos son repetitivos.

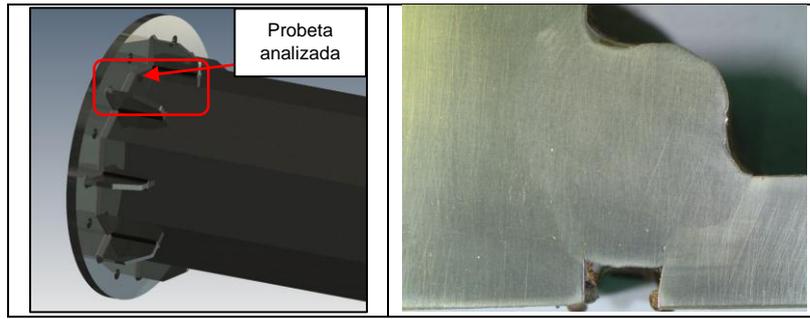


Figura 3. 8. Ubicación de la Probeta.
 (Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

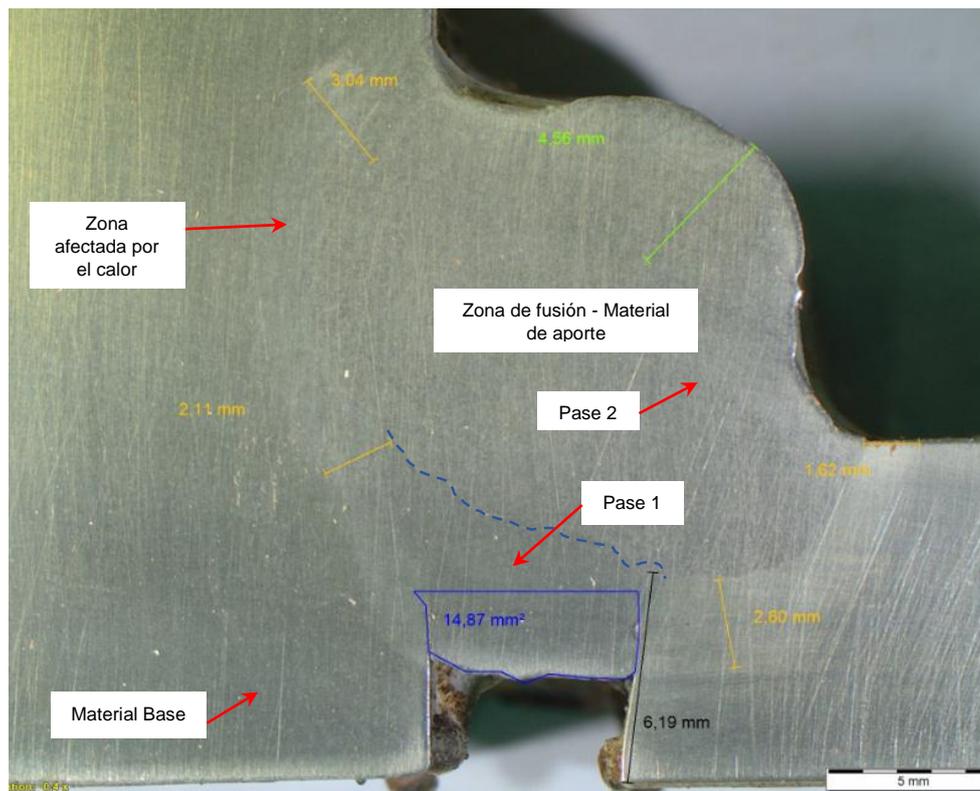


Figura 3. 9. Macrografía de la probeta 1, zonas afectadas por el calor.
 (Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)



Figura 3. 10. Macrografía Probeta 1.
 (Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

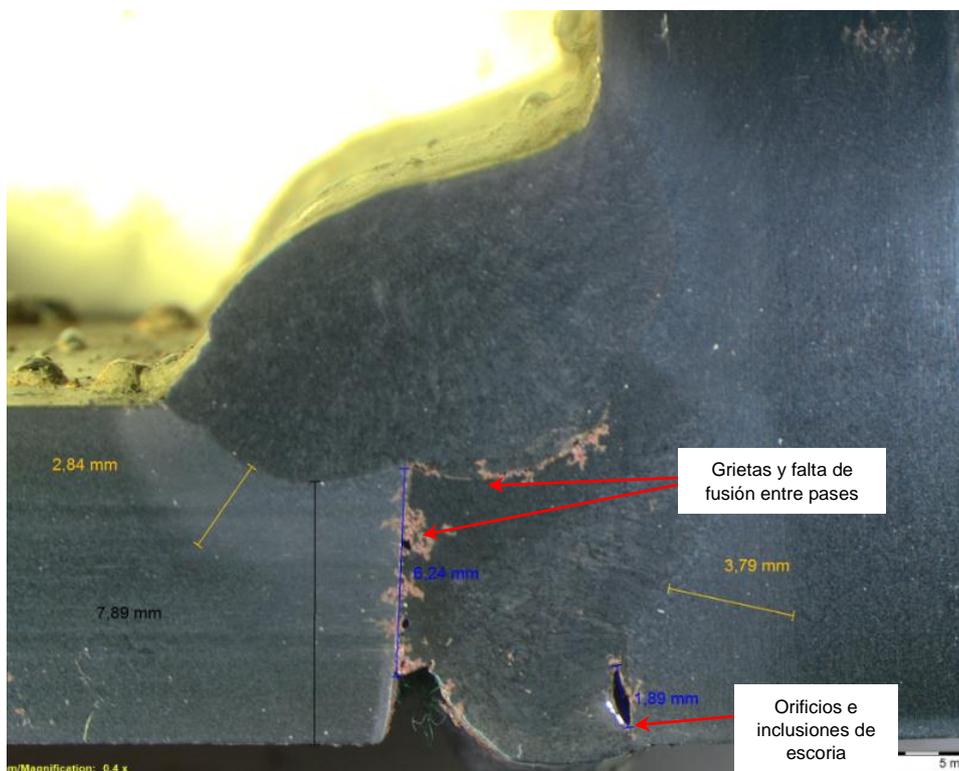


Figura 3. 11. Macrografía Probeta 2.
 (Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

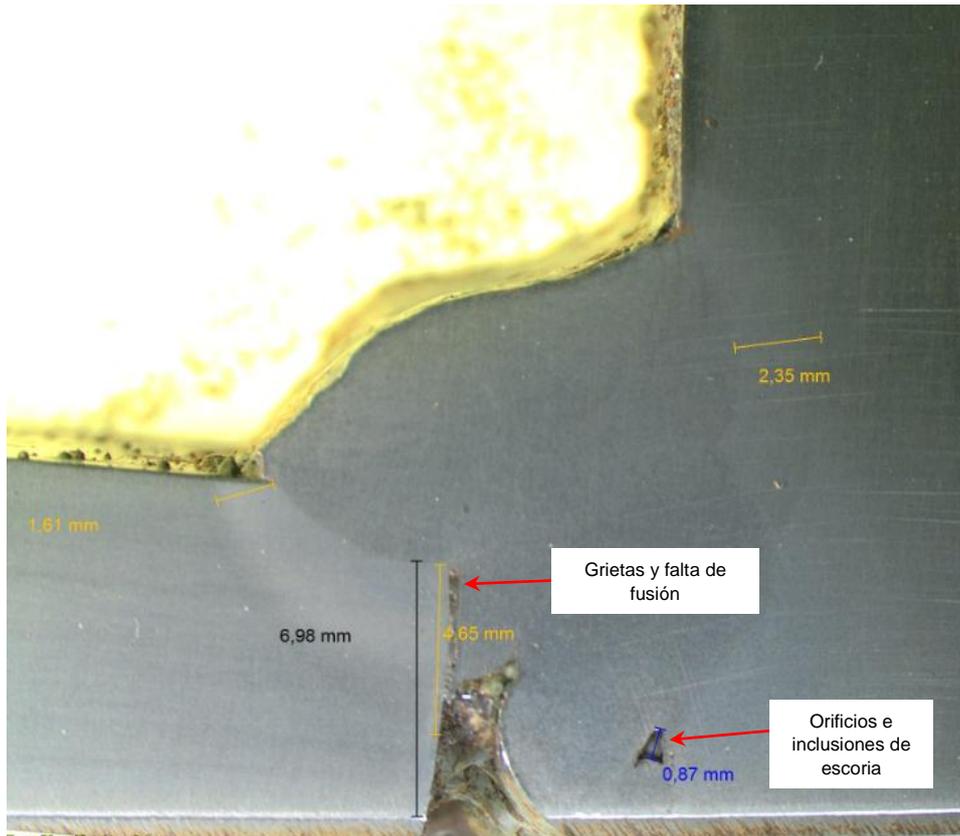


Figura 3. 12. Macrografía Probeta 3
 (Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

En las macrografías del ensayo se puede observar claramente zonas de falta de fusión, penetración y grietas, lo que muestra que el procedimiento de soldadura no está con parámetros de corriente, voltaje, y velocidad de soldadura adecuados.

En lo referente a las zonas afectadas por el calor se puede observar que no son uniformes y varían en su espesor desde 1,61 mm hasta 2,35 mm en una misma probeta y en el mismo pase del cordón de soldadura, por lo que una variable más es la técnica de soldadura y el metal de aporte utilizado.

En la figura 3.7 y 3,9, se puede observar que del espesor de 10 mm, solamente se logró fundir 3,8 mm del metal base, por lo que es necesario cambiar el procedimiento de soldadura e incrementar un pase para tener mayor fusión entre los metales.

Adicionalmente existe un área de 14,87 mm² correspondiente al material de aporte fundido pero que no se logró fusionar con el metal base, por lo que hay un desperdicio de material más no una soldadura adecuada.

En las figuras 3.8 y 3.9 se pueden observar porosidades internas ocasionadas por escoria atrapada y por falta de limpieza del metal base y en el cordón de soldadura entre pases, lo que favorece a que la soldadura falle al momento de aplicar las cargas.

En las tres probetas es muy común ver la formación de grietas por falta de fusión lo que supone que aparte del procedimiento de soldadura debe haber una mejor preparación de la junta y un metal de aporte con mejores propiedades.

En las probetas analizadas anteriormente se puede observar que hay ausencia de un control de calidad durante el proceso de soldadura, razón por la cual existen diversos factores que favorecen a que el proceso sea inestable y genere defectos en el producto final.

3.2.5.3. Micrografías del ensayo

El examen de la microestructura es muy útil para determinar si el metal satisface las especificaciones para las que fue construido, además verificar la composición general al momento de la soldadura, la microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales.

A continuación se detallan las micrografías respectivas:

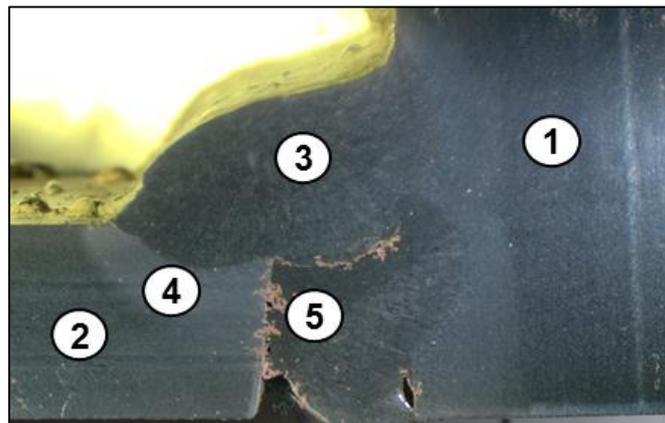


Figura 3. 13. Ubicación de las zonas analizadas para la micrografía.
(Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

1. Metal Base 1	2. Metal Base 2

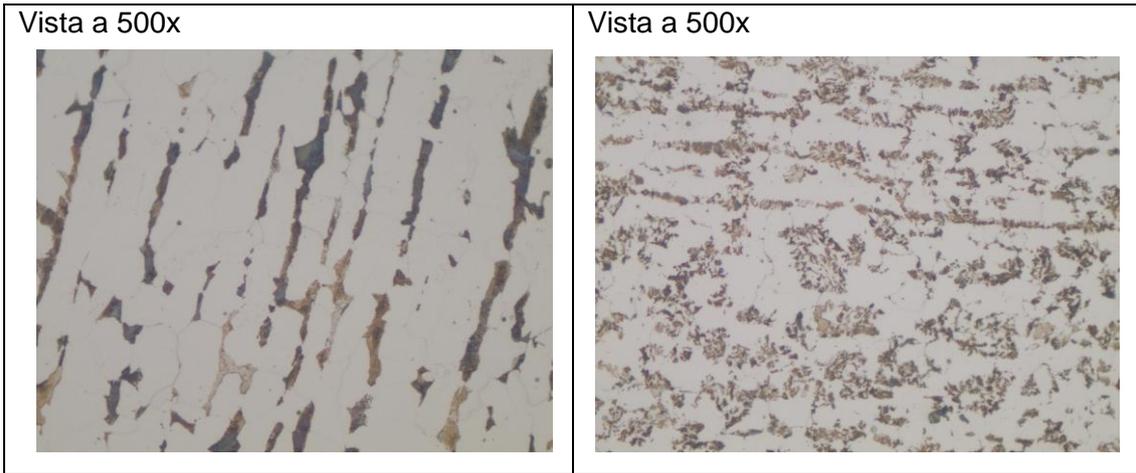


Figura 3. 14. Microestructuras de los metales base.
(Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

Como se puede apreciar en las imágenes a pesar que son aceros ASTM A572 Gr 50, los materiales tienen diferente microestructura lo que puede generar un tamaño no homogéneo el momento de la soldadura.

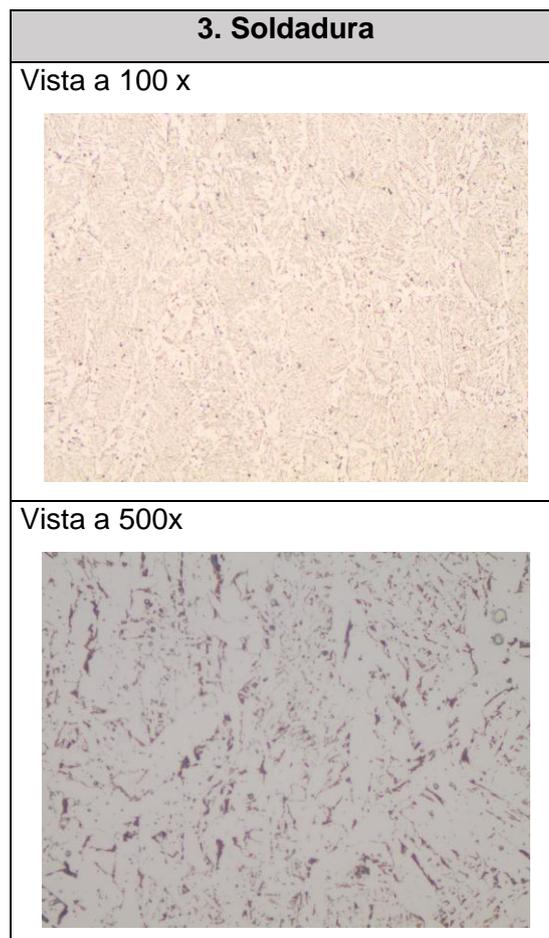


Figura 3. 15. Micrografía de la soldadura.
(Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

La zona de soldadura presenta un tamaño de grano homogéneo y no presenta defectos microscópicos en la zona de la garganta del cordón de soldadura.

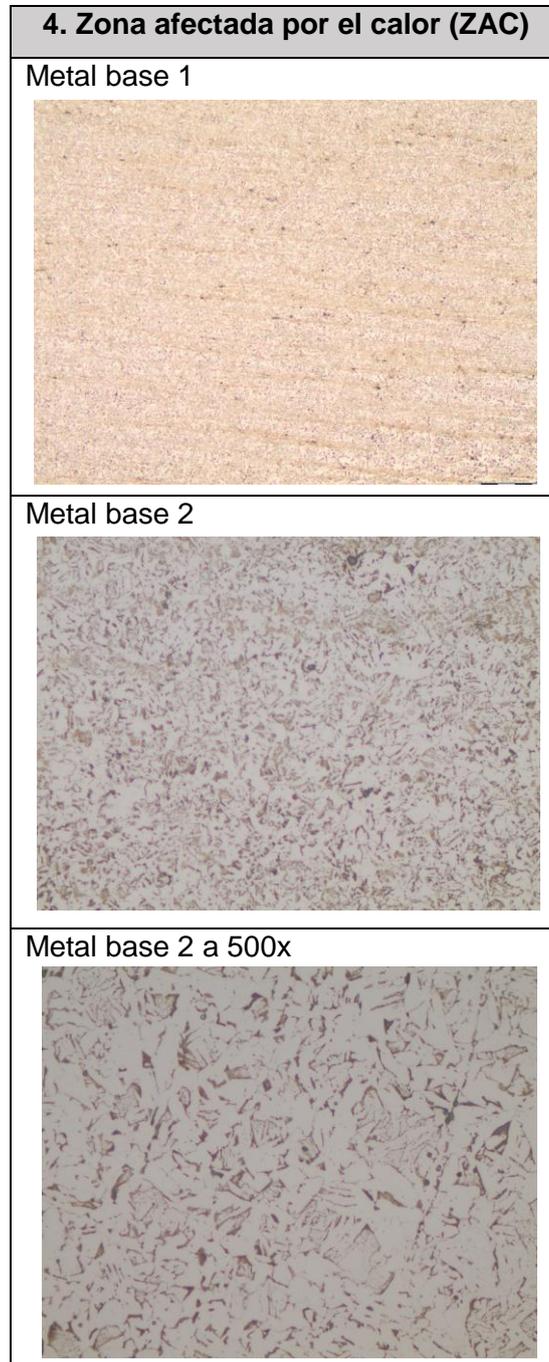


Figura 3. 16. Micrografía de las zonas afectadas por el calor.
(Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

Las estructuras de los metales base cambian a causa del calor provocado por la soldadura, en el primer caso el tamaño de grano se hace más delgado facilitando la fusión con el metal de aporte, en el segundo caso el tamaño de grano también es

disminuye pero es mayor que el del metal base 1, lo que quiere decir que el calor no es suficiente para la formación de una estructura homogénea.

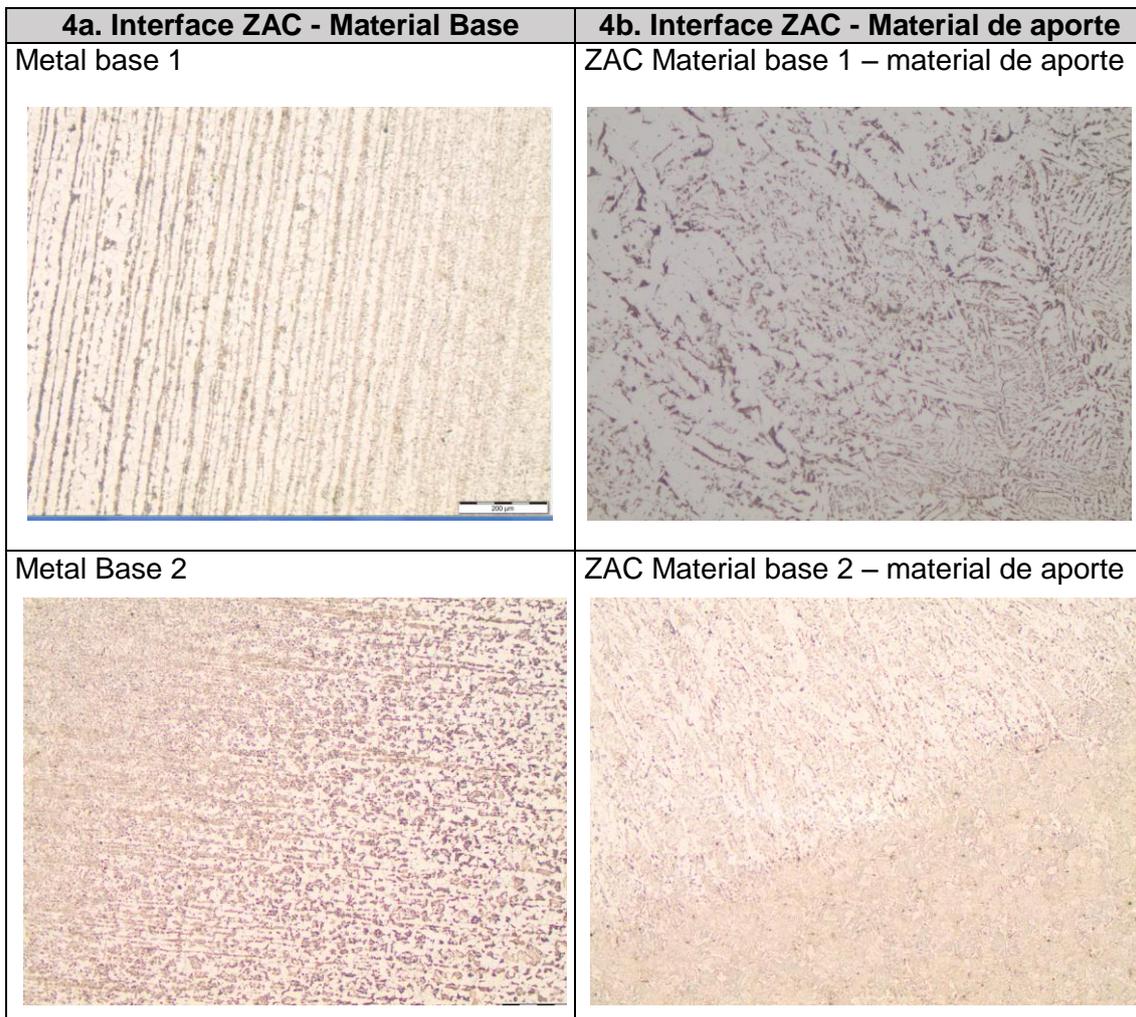


Figura 3. 17. Micrografía de la interface ZAC - Material de aporte.
(Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

Las interfaces entre el metal de aporte y la zona afectada por el calor no presentan problemas, pero es notorio el cambio de grano entre el metal base y la zona del metal de aporte, se puede apreciar claramente la correcta fusión en las zonas de la micrografía.

5. Defectos de soldadura

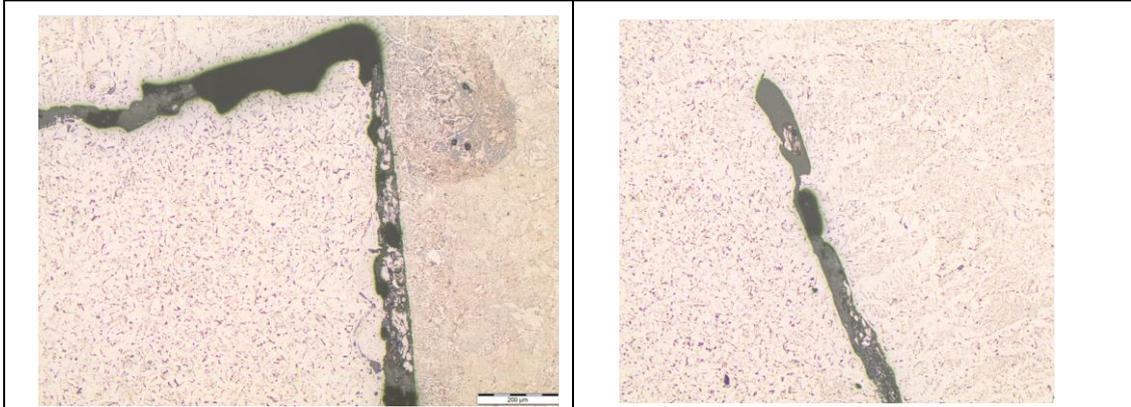


Figura 3. 18. Grietas en la zona de soldadura.
(Fuente: Imágenes proporcionadas por el laboratorio de Metalografía)

Las grietas son notorias en las zonas de soldadura a causa de la falta de fusión, el tamaño de grano del material de aporte es claramente definido entre las fases de soldadura. Las grietas son una causa para que la soldadura falle el momento de la aplicación de cargas.

3.2.5.4. Análisis estadístico de las variables de soldadura

Para el análisis estadístico del ensayo se tomó como referencia las variables esenciales del proceso de soldadura GMAW entre otras, para lo cual se calcula la desviación estándar, el promedio, la capacidad del proceso, el centramiento del proceso y el 6 sigma.

A continuación se presentan los datos tomados el momento de la soldadura en la unión Brida – Octógono, lo cual es una Junta en “T” con una soldadura de filete tal como se presenta en la siguiente figura:

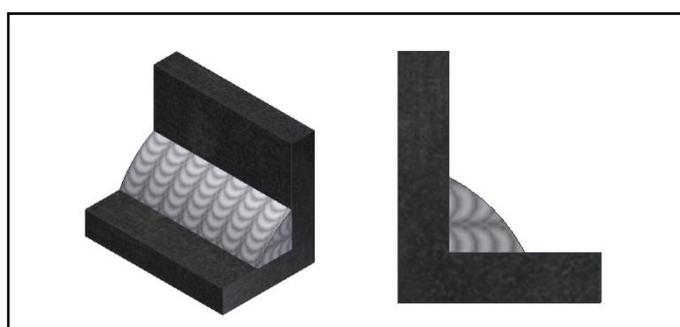


Figura 3. 19. Diseño de la probeta para análisis de datos.
(Fuente: Esquema del software de diseño Inventor)

Tabla 3. 3. Variables principales del ensayo de la Junta de prueba en "T".

No.	DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO	MATERIAL BASE	ESPESORES [mm]	PROCESO DE SOLDADURA	TIPO DE JUNTA	NÚMERO DE PASADAS	CORRIENTE (Amperios)	VOLTAJE (Voltios)	VELOCIDAD DE SOLDADURA (mm /min)
1	A1	A572 Gr 50	20 - 10	GMAW	EN "T"	Pase 1	171,42	24,27	122,0
2	A1				EN "T"	Pase 2	197,67	24,13	200,0
3	A2	A572 Gr 50	20 - 10	GMAW	EN "T"	Pase 1	180,96	25,94	125,0
4	A2				EN "T"	Pase 2	204,20	22,37	108,7
5	A3	A572 Gr 50	20 - 10	GMAW	EN "T"	Pase 1	197,33	24,25	76,9
6	A3				EN "T"	Pase 2	252,13	24,30	200,0
7	A5	A572 Gr 50	20 - 10	GMAW	EN "T"	Pase 1	177,50	24,55	150,0
8	A5				EN "T"	Pase 2	179,62	22,18	112,8
9	A6	A572 Gr 50	20 - 10	GMAW	EN "T"	Pase 1	218,54	23,90	200,0
10	A6				EN "T"	Pase 2	185,50	22,44	79,8
11	A7	A572 Gr 50	20 - 10	GMAW	EN "T"	Pase 1	194,91	26,20	140,2
12	A7				EN "T"	Pase 2	265,50	27,85	96,8
13	B1	A572 Gr 50	15-8	GMAW	EN "T"	Pase 1	189,62	26,43	263,2
14	B1				EN "T"	Pase 2	193,77	29,15	200,0
15	B2	A572 Gr 50	15-8	GMAW	EN "T"	Pase 1	190,08	26,45	300,0
16	B2				EN "T"	Pase 2	158,24	22,13	112,8
17	B3	A572 Gr 50	15-8	GMAW	EN "T"	Pase 1	177,88	26,55	272,7
18	B3				EN "T"	Pase 2	134,83	21,35	98,0
19	C1	A572 Gr 50	10-8	GMAW	EN "T"	Pase 1	161,83	25,70	333,3
20	C1				EN "T"	Pase 2	186,25	29,10	140,2
21	C2	A572 Gr 50	10-8	GMAW	EN "T"	Pase 1	178,14	26,53	357,1
22	C2				EN "T"	Pase 2	124,92	22,81	109,5
23	C3	A572 Gr 50	10-8	GMAW	EN "T"	Pase 1	185,25	26,42	357,1
24	C3				EN "T"	Pase 2	129,04	21,85	84,7

(Fuente: Datos tomados el momento del ensayo.)

Se realiza un análisis con 24 datos de corriente en todos los pases para que la muestra sea representativa. El rango de valores de corriente, voltaje y velocidad de soldadura es el especificado en el WPS respectivo, es decir de 120 a 170 Amperios, al igual que el voltaje en el cual los límites de control son 18 y 24 voltios.

Adicionalmente se realiza un control en la velocidad de soldadura cuyos límites de control son 140 y 170 mm/min. Ver anexo 1

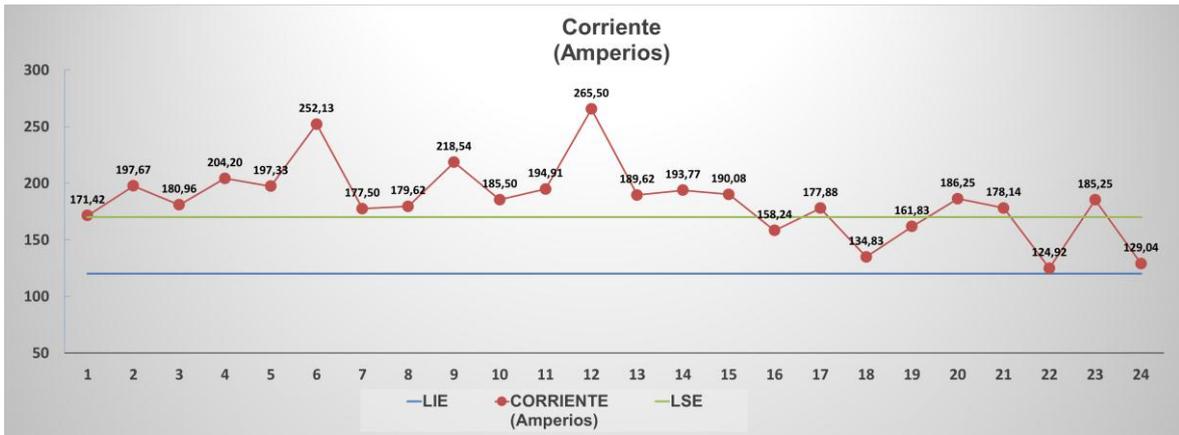


Figura 3. 20. Representación de la corriente de soldadura en los límites de control.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

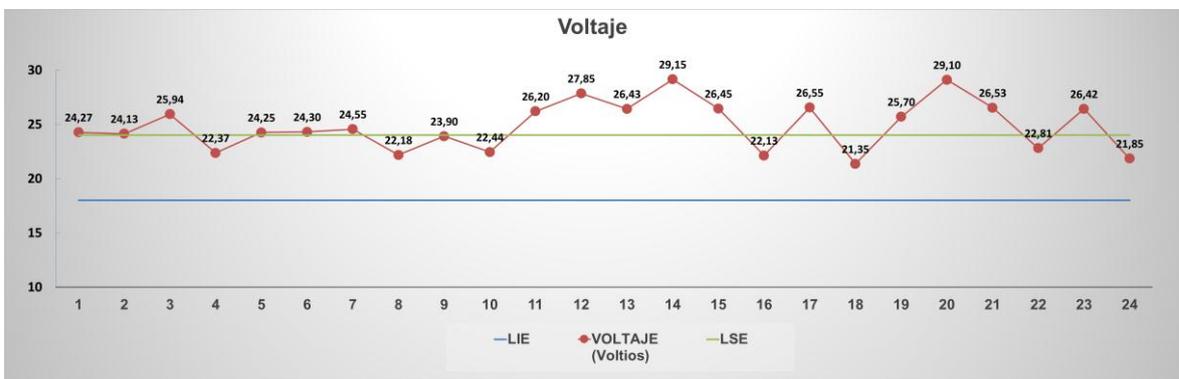


Figura 3. 21. Representación del Voltaje en los límites de control.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)



Figura 3. 22. Representación de la velocidad de avance de soldadura.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Para un mejor análisis estadístico se toman los datos independientes de cada probeta y para cada una de las pasadas, para lo cual se realizará el cálculo de la capacidad del proceso y del centramiento del proceso, tomando como referencia para los límites de control los valores especificados en el WPS, ver Anexo 1.

Probeta A1:

Se consideran las mínimas variaciones de voltaje el momento de la soldadura a pesar que las máquinas son generadores de voltaje constante.

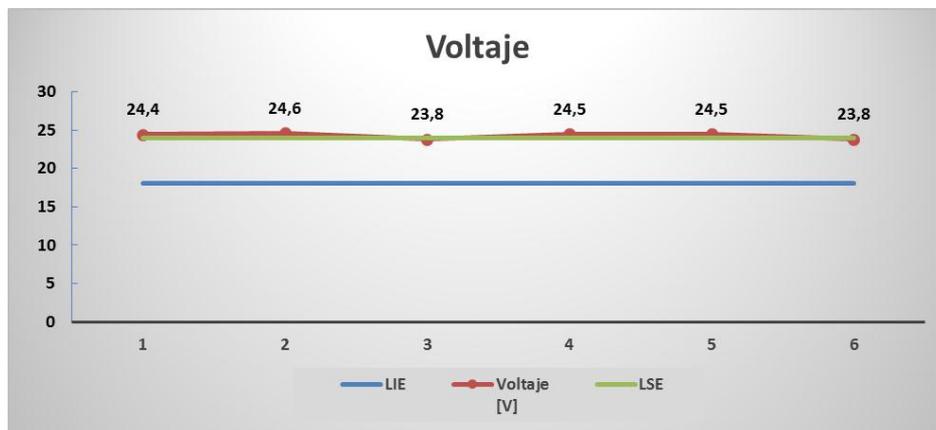


Figura 3. 23. Representación de datos del voltaje.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

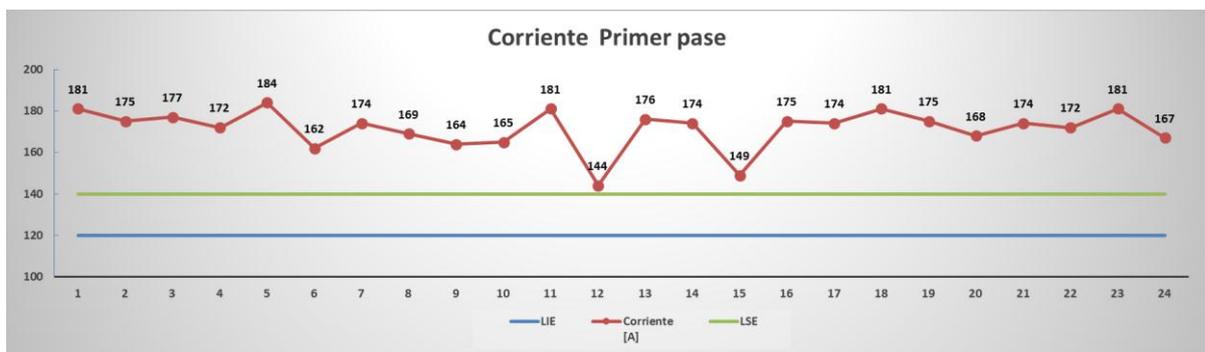


Figura 3. 24. Representación de la corriente en el primer pase.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

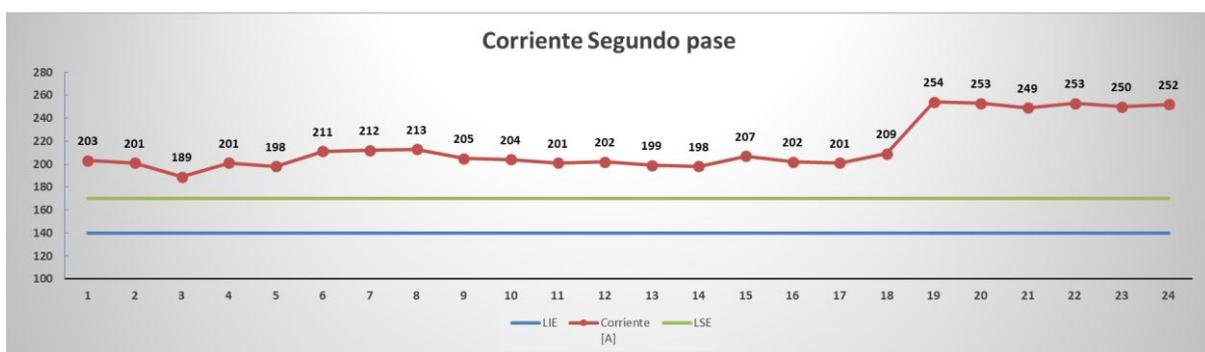


Figura 3. 25. Representación de la corriente en el segundo pase.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Como se puede observar en los gráficos de la probeta A1 los parámetros de corriente tanto del primero como del segundo pase están totalmente fuera de los límites de control e incluso en el primer cordón no presenta una estabilidad adecuada, lo cual puede

generar problemas en las juntas soldadas por falta de fusión al no tener el suficiente calor para la fusión de los metales en la profundidad deseada.

Tabla 3. 4. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta A1.

LIE	PROBETA A1			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	171,42	24,27	215,29	24,13
Valor Máximo	184	24,6	254	24,4
Valor Mínimo	144	23,8	189	24
Desviación estándar σ	9,600	0,367	22,149	0,231
Capacidad del Proceso Cp	0,347	2,725	0,226	4,330
Centramiento del proceso Cpk	-1,091	-0,242	-0,682	-0,192

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

En la tabla 3.4 se puede observar claramente que los valores de capacidad del proceso “Cp” para la corriente del primero y segundo pase son inferiores a 1, lo cual indica que el proceso no cumple con la especificación deseada.

En lo referente al centramiento del proceso tampoco cumple ya que se tiene un valor negativo lo cual indica que el proceso está totalmente fuera de los límites de control y no presenta estabilidad.

A continuación se presentan el resumen del análisis de las probetas en los diferentes espesores:

Tabla 3. 5. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A2.

LIE	PROBETA A2			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	180,96	25,94	204,20	22,37
Valor Máximo	224	26,2	213	22,4
Valor Mínimo	107	25,8	198	22,3
Desviación estándar σ	43,468	0,151	5,074	0,058
Capacidad del Proceso Cp	0,077	6,640	0,985	17,321
Centramiento del proceso Cpk	-0,314	-4,289	-2,247	9,430

Tabla 3. 6. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A3.

LIE	PROBETA A3			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	197,33	24,25	252,13	24,30
Valor Máximo	208	24,5	256	24,8
Valor Mínimo	183	24	249	23,8
Desviación estándar σ	6,578	0,354	2,357	0,707
Capacidad del Proceso Cp	0,507	2,828	2,122	1,414
Centramiento del proceso Cpk	-2,905	-0,236	-11,616	-0,141

Tabla 3. 7. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A5.

LIE	PROBETA A5			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	177,50	24,55	179,62	22,18
Valor Máximo	191	24,8	188	22,2
Valor Mínimo	144	24,3	173	22,1
Desviación estándar σ	22,487	0,354	4,177	0,050
Capacidad del Proceso Cp	0,148	2,828	1,197	20,000
Centramiento del proceso Cpk	-0,556	-0,519	-0,768	12,167

Tabla 3. 8. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A6.

LIE	PROBETA A6			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	218,54	23,90	185,50	22,44
Valor Máximo	232	24	191	22,6
Valor Mínimo	200	23,8	179	22,3
Desviación estándar σ	8,579	0,141	3,688	0,114
Capacidad del Proceso Cp	0,389	7,071	1,356	8,771
Centramiento del proceso Cpk	-3,052	0,236	-1,401	4,561

Tabla 3. 9. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta A7.

LIE	PROBETA A7			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	194,91	26,20	265,50	27,85
Valor Máximo	213	26,4	268	28,2
Valor Mínimo	122	26	263	27,5
Desviación estándar σ	25,355	0,283	1,871	0,495
Capacidad del Proceso Cp	0,131	3,536	2,673	2,020
Centramiento del proceso Cpk	-0,722	-2,593	-17,016	-2,593

Tabla 3. 10. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta B1.

LIE	PROBETA B1			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	189,62	26,43	193,77	29,15
Valor Máximo	213	26,7	202	29,4
Valor Mínimo	159	26,3	182	28,8
Desviación estándar σ	13,830	0,189	6,623	0,243
Capacidad del Proceso Cp	0,241	5,283	0,755	4,117
Centramiento del proceso Cpk	-1,196	-4,270	-1,196	-7,067

Tabla 3. 11. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta B2.

LIE	PROBETA B2			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	190,08	26,45	158,24	22,13
Valor Máximo	201	26,7	203	22,4
Valor Mínimo	177	26,2	142	21,9
Desviación estándar σ	7,561	0,354	13,896	0,170
Capacidad del Proceso Cp	0,441	2,828	0,360	5,867
Centramiento del proceso Cpk	-2,208	-2,310	0,282	3,660

Tabla 3. 12. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta B3.

LIE	PROBETA B3			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	177,88	26,55	134,83	21,35
Valor Máximo	195	26,7	171	21,8
Valor Mínimo	163	26,4	118	21
Desviación estándar σ	13,559	0,129	13,855	0,242
Capacidad del Proceso Cp	0,246	7,746	0,361	4,140
Centramiento del proceso Cpk	-0,931	-6,584	-0,124	3,657

Tabla 3. 13. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta C1.

LIE	PROBETA C1			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	161,83	25,70	186,25	29,10
Valor Máximo	187	26,1	198	29,4
Valor Mínimo	142	25,3	175	28,8
Desviación estándar σ	14,945	0,566	7,485	0,200
Capacidad del Proceso Cp	0,223	1,768	0,668	5,000
Centramiento del proceso Cpk	-0,487	-1,002	-0,724	-8,500

Tabla 3. 14. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta C2.

LIE	PROBETA C2			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	178,14	26,53	124,92	22,81
Valor Máximo	191	26,6	135	23,5
Valor Mínimo	159	26,4	109	22,2
Desviación estándar σ	10,221	0,115	7,186	0,329
Capacidad del Proceso Cp	0,326	8,660	0,696	3,041
Centramiento del proceso Cpk	-1,244	-7,313	-0,700	1,208

Tabla 3. 15. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura Probeta C3.

LIE	PROBETA C3			
	Primer Pase		Segundo Pase	
	Corriente [A]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	140	24	170	24
Límite Inferior LIE	120	18	140	18
Promedio	185,25	26,42	129,04	21,85
Valor Máximo	205	26,6	211	22,3
Valor Mínimo	177	26,2	101	21,5
Desviación estándar σ	9,146	0,179	20,852	0,237
Capacidad del Proceso Cp	0,364	5,590	0,240	4,222
Centramiento del proceso Cpk	-1,649	-4,509	-0,175	3,025

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

A continuación se analizan el número de valores que no cumplen con la especificación de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3. 16. Valores para el análisis de la Capacidad del Proceso.

Valor del Cp.	Clase de proceso	Decisión
$Cp. > 2$	Clase mundial	Tiene calidad seis sigma
$1.33 \leq Cp. \leq 2$	1	Mas que adecuado
$1 \leq Cp. < 1.33$	2	Adecuado para el trabajo, pero requiere de un control estricto conforme el Cp. se acerca a uno.
$0.67 \leq Cp. < 1$	3	No adecuado para el trabajo. Un análisis del proceso es necesario. Requiere modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria
$Cp. < 0.67$	4	No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones serias.

(Fuente: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial-calidad/capacidad-de-proceso/>).

Tabla 3. 17. Análisis de la Capacidad del proceso y Centramiento del proceso - corriente.

Análisis de corriente				
Probetas	Primer Pase		Segundo Pase	
	Capacidad del Proceso Cp	Centramiento del proceso Cpk	Capacidad del Proceso Cp	Centramiento del proceso Cpk
A1	0,347	-1,091	0,226	-0,682
A2	0,077	-0,314	0,985	-2,247
A3	0,507	-2,905	2,122	-11,616
A5	0,148	-0,556	1,197	-0,768
A6	0,389	-3,052	1,356	-1,401
A7	0,131	-0,722	2,673	-17,016
B1	0,241	-1,196	0,755	-1,196
B2	0,441	-2,208	0,360	0,282
B3	0,246	-0,931	0,361	-0,124
C1	0,223	-0,487	0,668	-0,724
C2	0,326	-1,244	0,696	-0,700
C3	0,364	-1,649	0,240	-0,175
Probetas que cumplen con la especificación Cp y Cpk $\geq 1,33$	0	0	3	0
Probetas que cumplen parcialmente la especificación $1 \geq Cp$ y $Cpk \geq 1,33$	0	0	1	0
Probetas que no cumplen la especificación Cp y Cpk ≤ 1	12	12	8	12

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Todos los valores de la tabla 3.16 resaltados de color rojo indican que no cumplen con la especificación requerida en el WPS, los que están en color amarillo indican que cumplen parcialmente y los que están en color verde cumplen con la especificación del proceso y superan el valor de 1,33.

A continuación se puede ver el porcentaje de probetas que cumplen con la especificación del WPS.

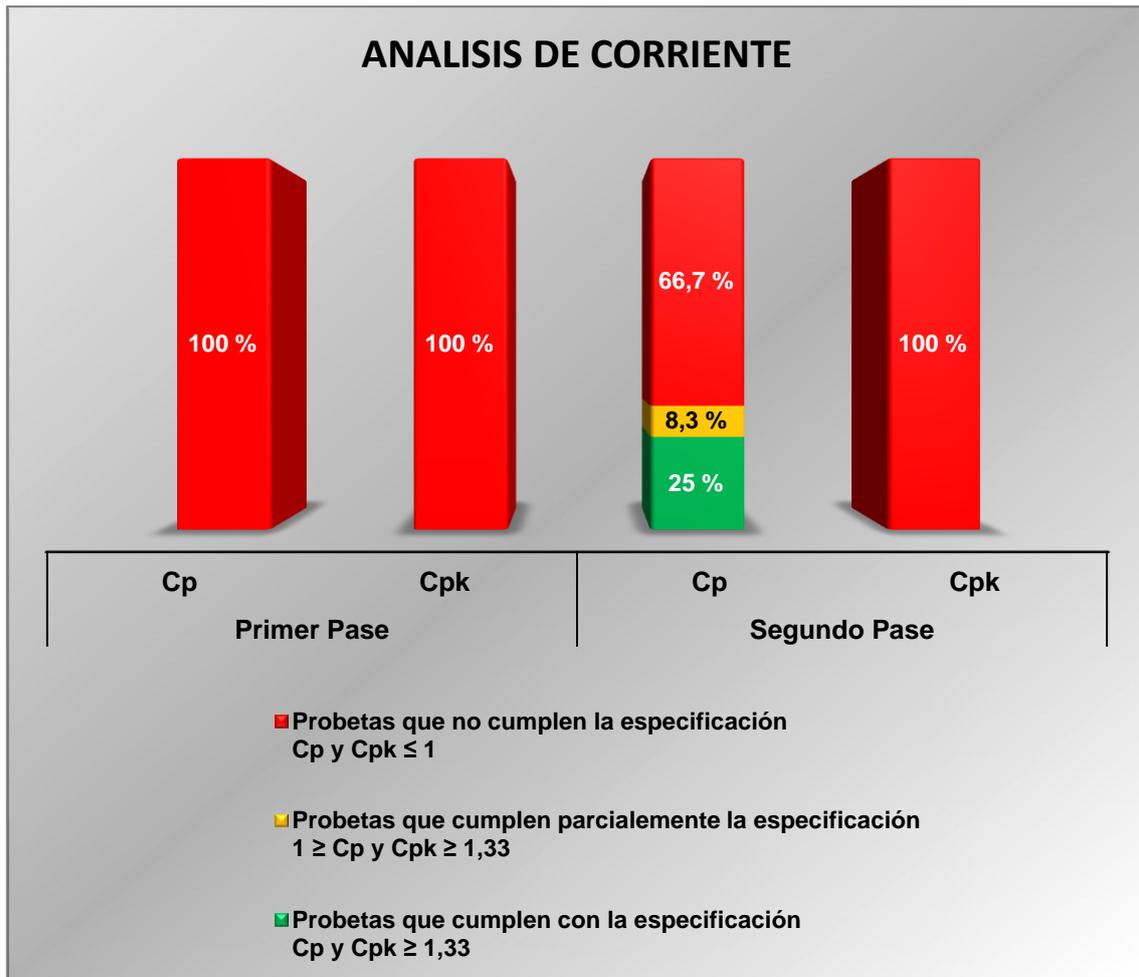


Figura 3. 26. Análisis de datos de Cp y Cpk Corriente.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Adicional se realiza un análisis exhaustivo para los valores de voltaje para cada una de las probetas, ya que a pesar que dicho parámetro permanece constante tiene algunas variaciones significativas tal como se muestra en la tabla 3.17.

Tabla 3. 18. Análisis de la Capacidad del proceso y Centramiento del proceso - voltaje.

Análisis de Voltaje				
Probetas	Primer Pase		Segundo Pase	
	Capacidad del Proceso Cp	Centramiento del proceso Cpk	Capacidad del Proceso Cp	Centramiento del proceso Cpk
A1	2,725	-0,242	4,330	-0,192
A2	6,640	-4,289	17,321	9,430
A3	2,828	-0,236	1,414	-0,141
A5	2,828	-0,519	20,000	12,167
A6	7,071	0,236	8,771	4,561
A7	3,536	-2,593	2,020	-2,593
B1	5,283	-4,270	4,117	-7,067
B2	2,828	-2,310	5,867	3,660
B3	7,746	-6,584	4,140	3,657
C1	1,768	-1,002	5,000	-8,500
C2	8,660	-7,313	3,041	1,208
C3	5,590	-4,509	4,222	3,025
Probetas que cumplen con la especificación Cp y Cpk $\geq 1,33$	12	0	12	6
Probetas que cumplen parcialmente la especificación $1 \geq Cp$ y $Cpk \geq 1,33$	0	0	0	1
Probetas que no cumplen la especificación Cp y $Cpk \leq 1$	0	12	0	5

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Los valores de voltaje tanto en el primero como en el segundo pase cumplen con la capacidad del proceso Cp según especificación del WPS, se muestran valores aceptables pero la máquina está trabajando con valores fuera de los límites de especificación o muy cercanos al límite, cabe recalcar que las pequeñas variaciones de voltaje producen una gran variación en la corriente de soldadura.

Existe un 50% de máquinas que cumplen con el centramiento del proceso en el segundo pase por lo cual es necesario calibrar dichas máquinas para mantener el voltaje constante durante la soldadura y a través del tiempo; y en caso de ser necesario replantear los límites de control.

A continuación se muestran los porcentajes de las probetas que cumplen con la especificación respectiva.

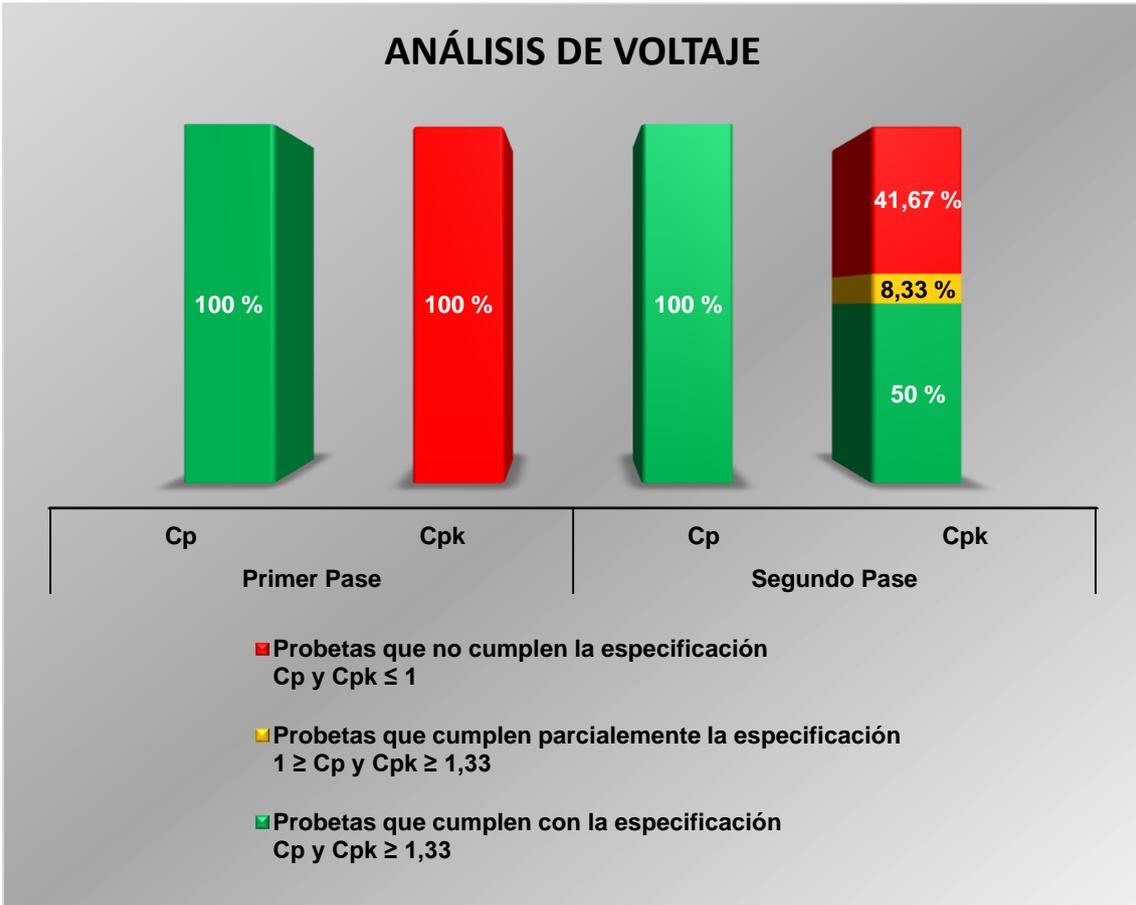


Figura 3. 27. Análisis de datos de Cp y Cpk Voltaje.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

A continuación se presentan los datos tomados el momento de la soldadura en la unión Octógono – Octógono, lo cual es una Junta a tope con una soldadura en la posición plana tal como se presenta en la siguiente figura:

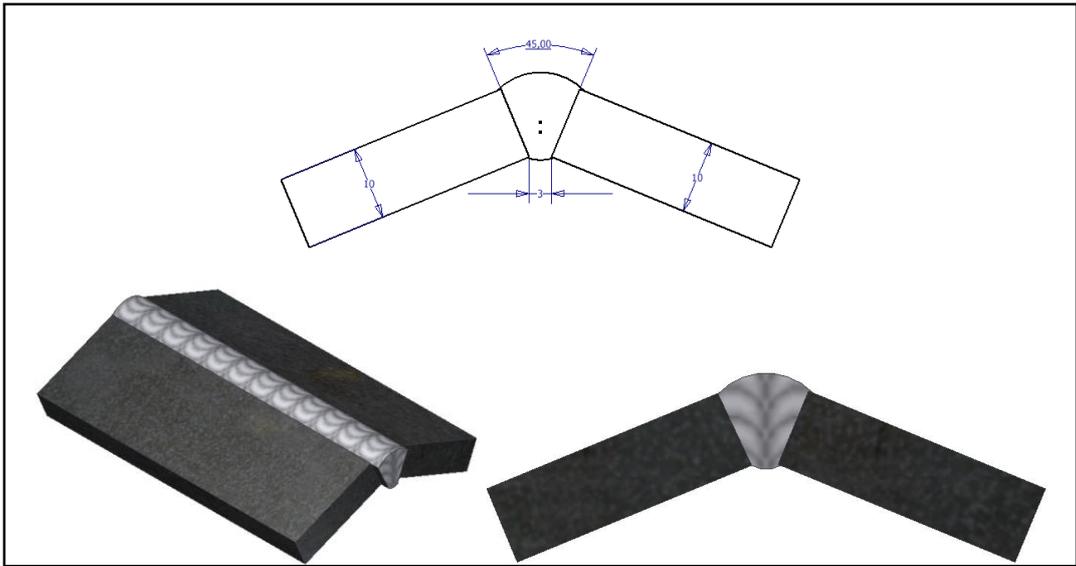


Figura 3. 28. Esquema de la junta de prueba Octógono - Octógono.
(Fuente: Esquema del software de diseño Inventor)

Tabla 3. 19. Variables principales del ensayo de la Junta de prueba a tope

No.	DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO	MATERIAL BASE	ESPESES [mm]	PROCESO DE SOLDADURA	TIPO DE JUNTA	NÚMERO DE PASADAS	CORRIENTE (Amperios)	VOLTAJE (Voltios)	VELOCIDAD DE SOLDADURA (mm /min)
1	O1	A572 Gr 50	10 - 10	GMAW	A TOPE	Pase 1	243,50	26,20	250,00
3	O2	A572 Gr 50	10 - 10	GMAW	A TOPE	Pase 1	253,25	26,15	250,00
5	O3	A572 Gr 50	10 - 10	GMAW	A TOPE	Pase 1	258,00	26,33	187,50
7	O4	A572 Gr 50	6 - 6	GMAW	A TOPE	Pase 1	231,40	26,30	375,00
9	O5	A572 Gr 50	6 - 6	GMAW	A TOPE	Pase 1	226,25	26,30	375,00
11	O6	A572 Gr 50	6 - 6	GMAW	A TOPE	Pase 1	228,60	26,56	375,00
13	O7	A572 Gr 50	6 - 6	GMAW	A TOPE	Pase 1	180,63	26,13	300,00
15	O8	A572 Gr 50	6 - 6	GMAW	A TOPE	Pase 1	180,63	26,13	375,00
17	O9	A572 Gr 50	6 - 6	GMAW	A TOPE	Pase 1	176,13	26,50	375,00

(Fuente: Valores tomados el momento del ensayo)

Al igual que el ensayo anterior se realiza un análisis de datos de corriente, voltaje y velocidad de soldadura según los límites indicados en el WPS (Ver anexo 1) de todas las probetas en un mismo gráfico para verificar su variación, para lo cual se utilizan los siguientes valores:

- a) Corriente: 120 a 140 Amperios.
- b) Voltaje: 18 a 24 Voltios.
- c) Velocidad de Avance: 140 a 160 mm/min.

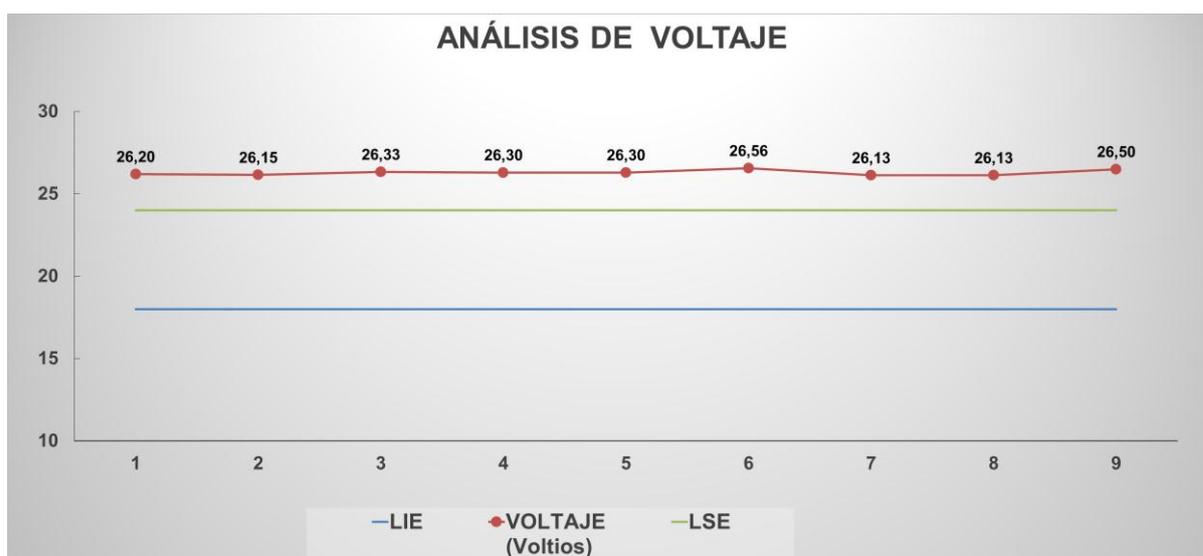


Figura 3. 29. Representación del Voltaje en los límites de control.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

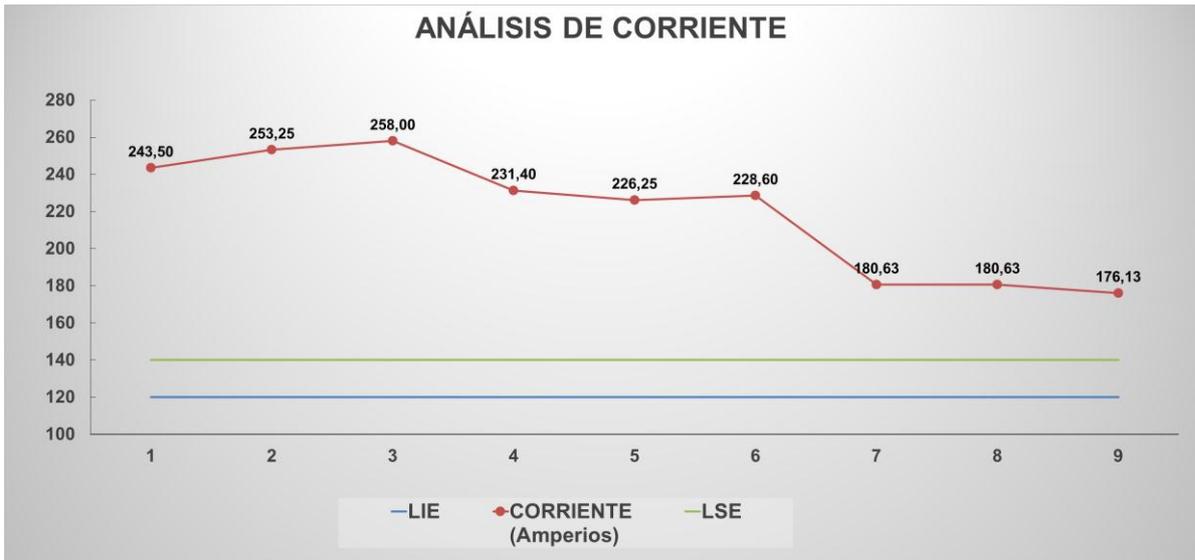


Figura 3. 30. Representación de la Corriente de soldadura en los límites de control.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

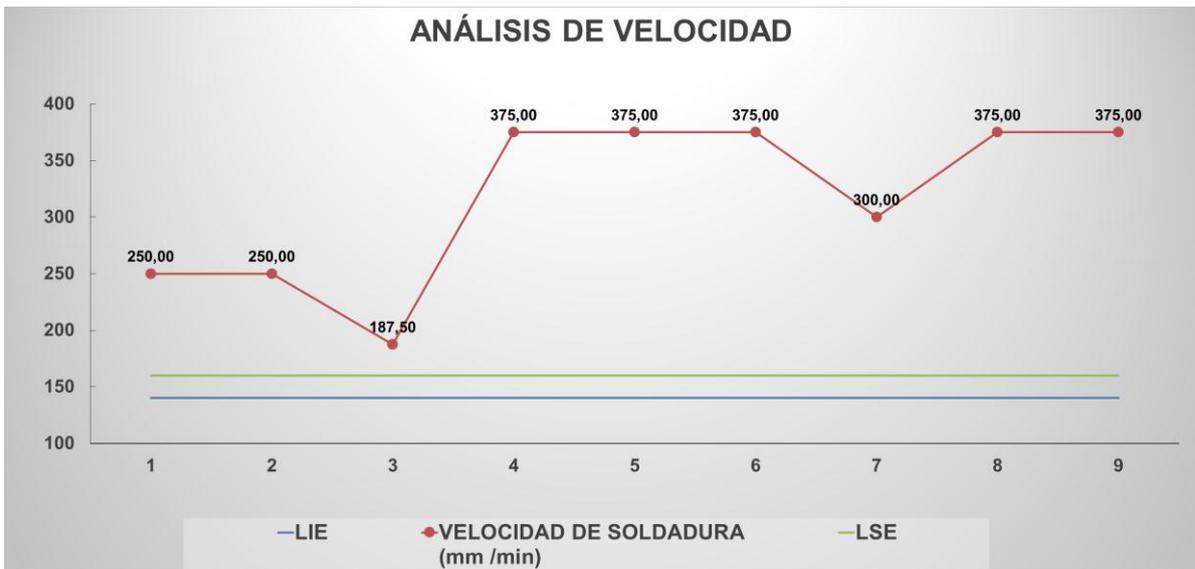


Figura 3. 31. Representación de la Velocidad de soldadura en los límites de control.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Como se puede observar en este tipo de probetas tampoco se cumplen con los parámetros de corriente, voltaje y velocidad de soldadura, ya que los valores medidos están totalmente fuera de los límites de control, lo que puede ocasionar diferentes discontinuidades en la soldadura.

Para un mejor análisis estadístico se toman los datos independientes de cada probeta, para lo cual se realizará el cálculo de la capacidad del proceso y del centramiento del proceso, tomando como referencia para los límites de control los valores especificados en el WPS del Anexo 1.

Probeta O1:

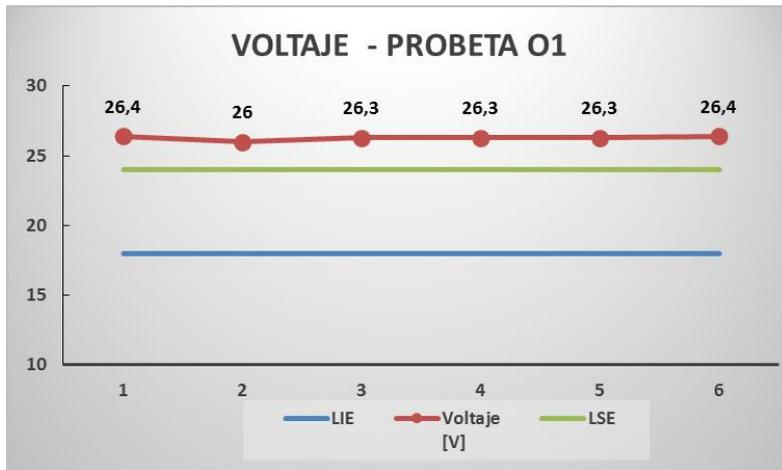


Figura 3. 32. Representación del Voltaje - Probeta O1.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

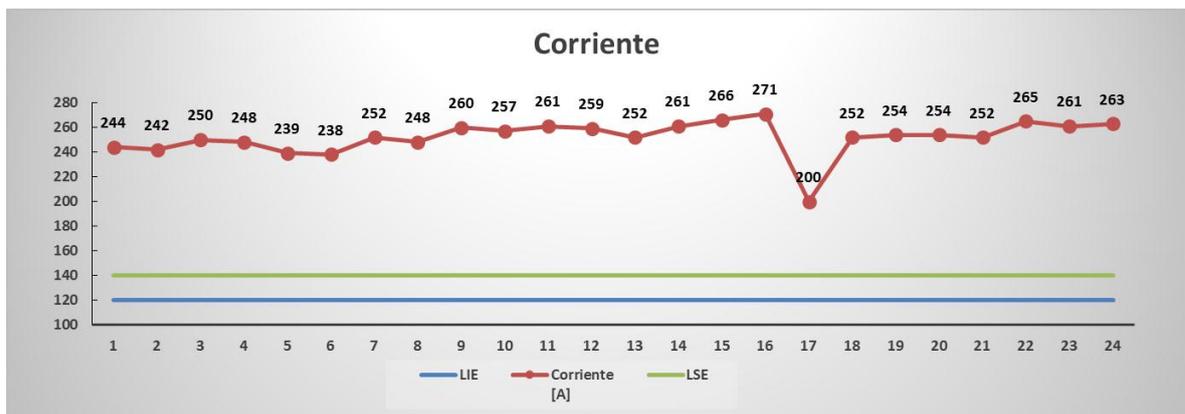


Figura 3. 33. Representación del Corriente - Probeta O1.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Tabla 3. 20. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O1.

	PROBETA O1	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	252,04	26,28
Valor Max	271	26,4
Valor Mín	200	26
Desviación estándar σ	13,995	0,147
Capacidad del Proceso Cp	-0,238	-6,794
Centramiento del proceso Cpk	-3,145	-18,758

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

En este tipo de probetas se puede observar que tampoco se cumplen con la capacidad del proceso Cp y Centramiento del Proceso Cpk, ya que los valores medidos están muy alejados de los límites de control, lo cual ratifica una de las posibles causas para que se produzcan soldaduras con defectos como falta de fusión, porosidades, entre otras.

A continuación se presenta el resumen del análisis estadístico de las probetas de este tipo de unión:

Probeta O2:

Tabla 3. 21. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O2.

	PROBETA O2	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	253,25	26,15
Valor Max	271	26,3
Valor Mín	200	26
Desviación estándar σ	17,985	0,212
Capacidad del Proceso Cp	-0,185	-4,714
Centramiento del proceso Cpk	-2,470	-12,806

Probeta O3:

Tabla 3. 22. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O2.

	PROBETA O3	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	258,00	26,33
Valor Max	265	26,4
Valor Mín	250	26,3
Desviación estándar σ	5,060	0,058
Capacidad del Proceso Cp	-0,659	-17,321
Centramiento del proceso Cpk	-9,092	-48,113

Probeta O4:

Tabla 3. 23. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O4

	PROBETA O4	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	231,40	26,30
Valor Max	236	26,5
Valor Mín	226	26,1
Desviación estándar σ	4,336	0,283
Capacidad del Proceso Cp	-0,769	-3,536
Centramiento del proceso Cpk	-8,564	-9,782

Probeta O5:

Tabla 3. 24. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O5.

	PROBETA O5	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	226,25	26,30
Valor Max	232	26,6
Valor Mín	221	26
Desviación estándar σ	4,573	0,424
Capacidad del Proceso Cp	-0,729	-2,357
Centramiento del proceso Cpk	-7,744	-6,521

Probeta O6:

Tabla 3. 25. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O6.

	PROBETA O6	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	228,60	26,56
Valor Max	234	26,8
Valor Mín	224	26,4
Desviación estándar σ	3,847	0,152
Capacidad del Proceso Cp	-0,866	-6,594
Centramiento del proceso Cpk	-9,410	-18,814

Probeta O7:

Tabla 3. 26. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O7.

	PROBETA O7	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	180,63	26,13
Valor Max	189	26,3
Valor Mín	167	25,9
Desviación estándar σ	7,981	0,171
Capacidad del Proceso Cp	-0,418	-5,855
Centramiento del proceso Cpk	-2,532	-15,858

Probeta O8:

.Tabla 3. 27. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O8.

	PROBETA O8	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	170,63	26,14
Valor Max	189	26,3
Valor Mín	167	25,9
Desviación estándar σ	7,981	0,171
Capacidad del Proceso Cp	-0,418	-5,85
Centramiento del proceso Cpk	-2,53	-15,8

Probeta O9:

Tabla 3. 28. Análisis de estadístico de las variables principales de soldadura, Probeta O9.

	PROBETA O9	
	Corriente [A]	Voltaje [V]
Límite superior LSE	120	18
Límite Inferior LIE	140	24
Promedio	176,13	26,50
Valor Max	186	26,9
Valor Mín	169	26,2
Desviación estándar σ	6,357	0,294
Capacidad del Proceso Cp	-0,524	-3,397
Centramiento del proceso Cpk	-2,943	-9,624

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

A continuación se realiza una recopilación de todos los datos de la capacidad del Proceso Cp, y del Centramiento del Proceso Cpk para Corriente:

Tabla 3. 29. Análisis de la Capacidad del proceso y Centramiento del proceso - Corriente.

Análisis de corriente		
Probetas	Pase Único	
	Capacidad del Proceso Cp	Centramiento del proceso Cpk
O1	-0,238	-3,145
O2	-0,185	-2,470
O3	-0,659	-9,092
O4	-0,769	-8,564
O5	-0,729	-7,744
O6	-0,866	-9,410
O7	-0,418	-2,532
O8	-0,418	-2,532
O9	-0,524	-2,943
Probetas que cumplen con la especificación Cp y Cpk $\geq 1,33$	0	0
Probetas que cumplen parcialmente la especificación $1 \geq Cp$ y $Cpk \geq 1,33$	0	0
Probetas que no cumplen la especificación Cp y Cpk ≤ 1	9	9

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

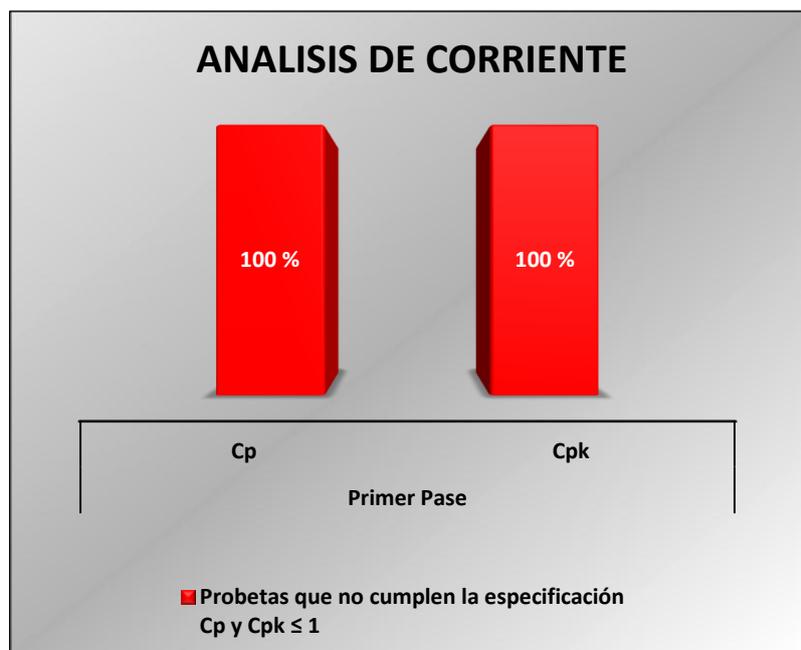


Figura 3. 34. Análisis de datos de Cp y Cpk Corriente.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Tabla 3. 30. Análisis de la Capacidad del proceso y Centramiento del proceso - Voltaje.

Análisis de Voltaje		
Probetas	Pase Único	
	Capacidad del Proceso Cp	Centramiento del proceso Cpk
O1	-6,794	-18,758
O2	-4,714	-12,806
O3	-17,321	-48,113
O4	-3,536	-9,782
O5	-2,357	-6,521
O6	-6,594	-18,814
O7	-5,855	-15,858
O8	-5,855	-15,858
O9	-3,397	-9,624
Probetas que cumplen con la especificación Cp y Cpk $\geq 1,33$	0	0
Probetas que cumplen parcialmente la especificación $1 \geq Cp$ y $Cpk \geq 1,33$	0	0
Probetas que no cumplen la especificación Cp y Cpk ≤ 1	9	9

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

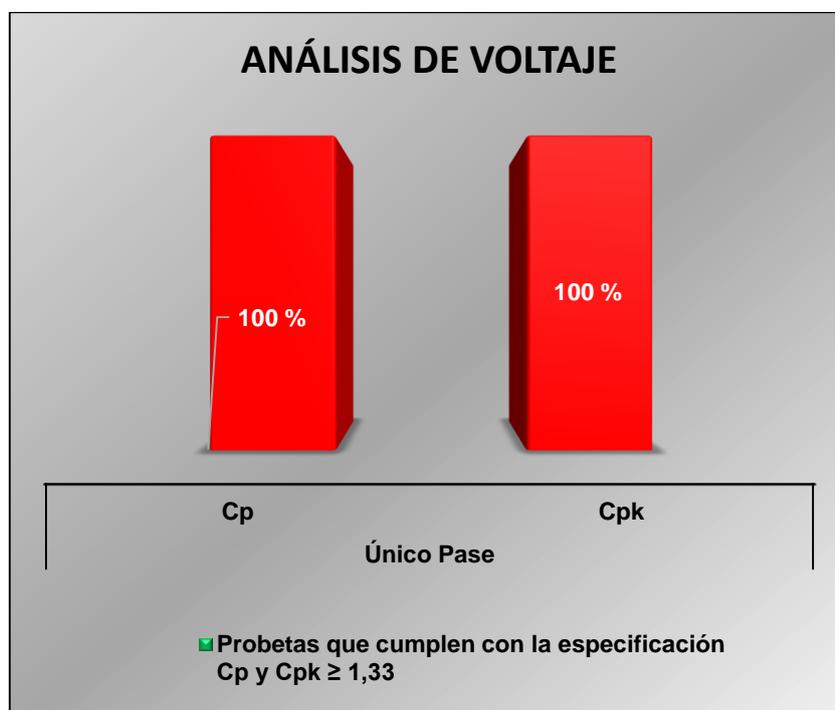


Figura 3. 35. Análisis de datos de Cp y Cpk Voltaje.
(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

3.2.5.5. Cálculo de 6 SIGMA

Cabe mencionar que el 6 Sigma es una metodología estadística que se basa en el método científico para conseguir reducciones significativas en los ratios de las variables con mayor número de problemas que generan defectos, para lo cual en el siguiente capítulo se definirán las metas para la reducción de los defectos.

Para el cálculo del 6 sigma se procede con el cálculo del nivel sigma del proceso basado en las mediciones que están dentro de especificación y las que están fuera según los límites de control.

Para el cálculo del nivel Sigma del Proceso se utilizan las siguientes definiciones:

- Defectos por unidad (DPU): Es la cantidad de defectos en un producto

$$DPU = \frac{D}{U \times O} \quad (1)$$

- Oportunidad de defectos (O): Porcentaje de productos o características que se han medido o verificado para detectar si son conformes o no.
- Productividad o Rendimiento del proceso: Indica las probabilidades de que el producto salga conforme.
- Nivel de calidad sigma del proceso: Indica el número de desviaciones típicas que el proceso puede aceptar para que el producto sea conforme.

Una vez que se obtienen los valores del Sigma del Proceso se procede a comparar con la siguiente Tabla:

Tabla 3. 31. Porcentajes y cantidad de defectos según los niveles "Sigma"

NIVEL SIGMA	DEFECTOS POR MILLÓN DE OPORTUNIDADES DPMO	RENDIMIENTO
6	3,4	99,9997%
5	233	99,98%
4	6210	99,30%
3	66807	99,30%
2	308537	69,15%
1	690000	30,85%
0	933200	6,68%

(Fuente: http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/014873/014873_01.pdf)

Para la variable corriente se toman una muestra de 360 datos entre los dos pases y tomando en cuenta todas las probetas de la junta en "T" para evaluar el nivel Sigma, ya que el 100% de datos de la Junta a tope están fuera de especificación.

Se obtuvieron 310 medidas fuera de especificación y se verifican los monopolos en un 95% (inspección visual y verificación sin registro de los parámetros de soldadura).

Tabla 3. 32. Cálculo del nivel sigma de la variable corriente.

1. Número de unidades procesadas	N=	360
2. Porcentaje de posibilidades de encontrar el defecto	O=	95%
3. Numero de defectos detectados	D=	310
4. Porcentaje de Defectos	$DPU=D/(N \times O)$	90,6%
5. Rendimiento del proceso	$=(1-DPU) \times 100$	9,4%
6.	Nivel sigma del proceso DPMO =	0,18

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Como se puede observar en los datos calculados el DPMO es del 0,18 lo que equivale a un rendimiento del proceso de un 9,4%, es decir que aproximadamente puede haber 905000 defectos por cada millón de datos tomados.

Para los datos de voltaje de igual manera se procede solamente con los valores de la Junta en "T" ya que el 100 % de los valores de las probetas de la junta a tope (Unión octógono-octógono) están fuera de especificación.

Tabla 3. 33Cálculo del nivel sigma de la variable Voltaje.

1. Número de unidades procesadas	N=	113
2. Porcentaje de posibilidades de encontrar el defecto	O=	95%
3. Numero de defectos detectados	D=	83
4. Porcentaje de Defectos	$DPU=D/(N \times O)$	77,3%
5. Rendimiento del proceso	$=(1-DPU) \times 100$	22,7%
6.	Nivel sigma del proceso DPMO =	0,75

(Fuente: Análisis estadístico de las pruebas de soldadura)

Como se puede observar en los datos calculados el DPMO es del 0,75 lo que equivale a un rendimiento del proceso de un 22,7%, es decir que aproximadamente puede haber 770000 defectos por cada millón de datos tomados.

Cabe mencionar que los límites de control de especificación deben ser analizados en base a los ensayos para validar si los ensayos destructivos cumplen con la norma AWS D1.1.

CAPITULO IV

AJUSTES DEL PROCESO DE SOLDADURA

4.1. Análisis de datos del proceso de soldadura.

Para el análisis de las variables a ajustar se realiza un estudio utilizando las herramientas de Calidad con los datos obtenidos en el Capítulo III, para lo cual se inicia con las herramientas mencionadas en el Capítulo 1:

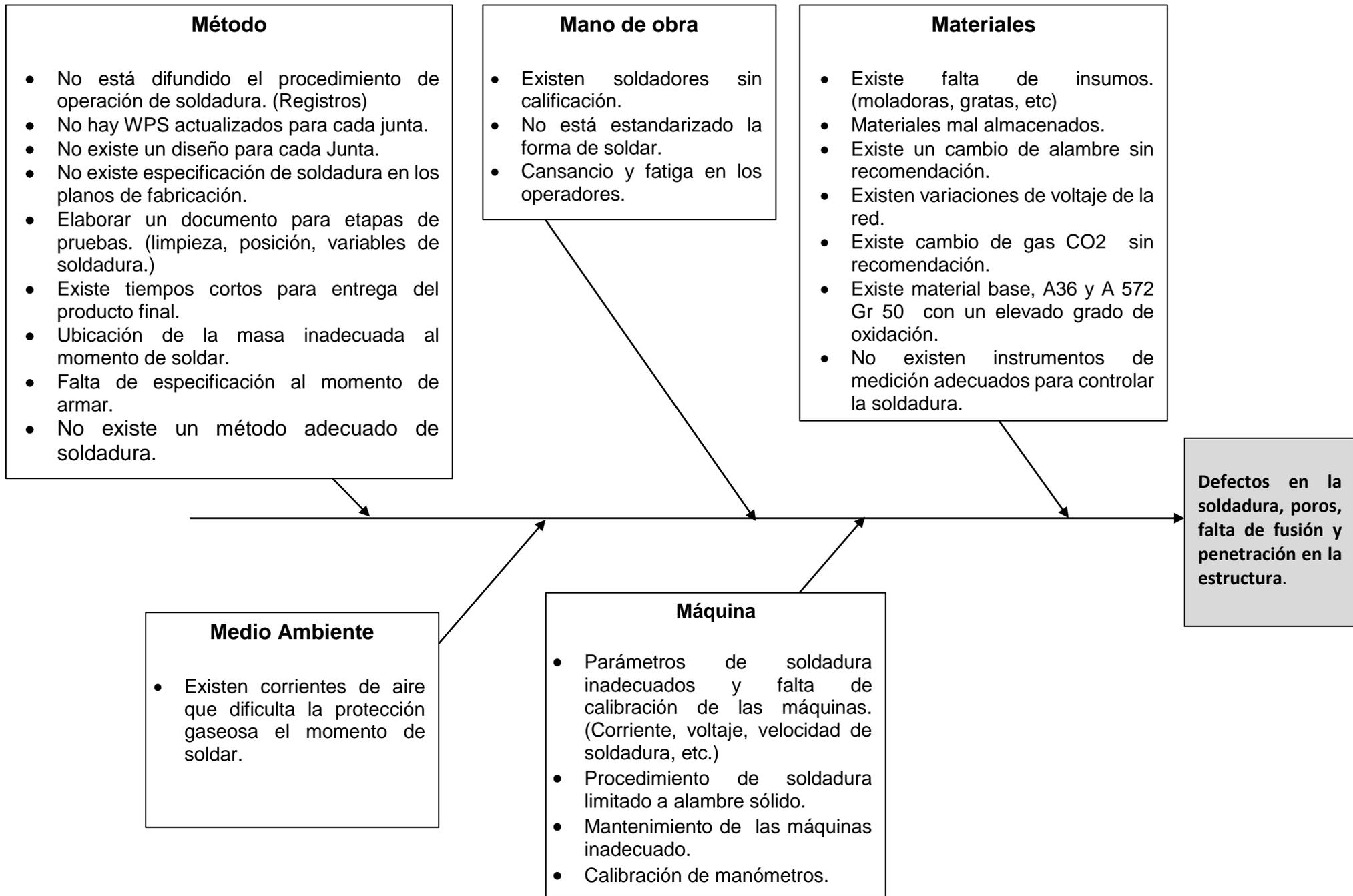
- Diagrama de Causa – Efecto (Ishikawa)
- Diagrama de Pareto
- Lista de Chequeo o Verificación (Check list)
- Diagramas de Flujo
- Histograma
- Diagrama de Dispersión o Correlación
- Estratificación
- Gráficos de Control

4.1.1. Diagrama de causa – Efecto (Ishikawa)

Como se pudo observar en el capítulo anterior existen varias fuentes de variación para la cual se analiza cada una de las mismas en base al diagrama de causa y efecto, para cada una de las fuentes de variación existe una acción de mejora para que la implementación del control de calidad en el proceso sea eficiente y eficaz.

A continuación se menciona el diagrama de causa y efecto tomando en cuenta las siguientes variables:

- Método
- Mano de Obra
- Materiales
- Medio ambiente
- Máquina



4.1.2. Diagrama de Pareto

Para el diagrama de Pareto se toman en cuenta todos los problemas mencionados y se les dará el nivel de importancia para evaluar el problema que mayor peso tiene.

Tabla 4. 1. Observaciones por cada una de las causas.

Causas	Número de Características
Método	9
Mano de Obra	3
Materiales	7
Medio ambiente	1
Máquina	4

(Fuente: Tabla de datos de Excel)

Tabla 4. 2. Frecuencias acumuladas para cada una de las causas.

Causas	Número de observaciones	% de Observaciones	% Acumulado
Método	9	37,5%	37,5%
Materiales	7	29,2%	66,7%
Máquina	4	16,7%	83,3%
Mano de Obra	3	12,5%	95,8%
Medio ambiente	1	4,2%	100,0%

(Fuente: Tabla de datos de Excel)

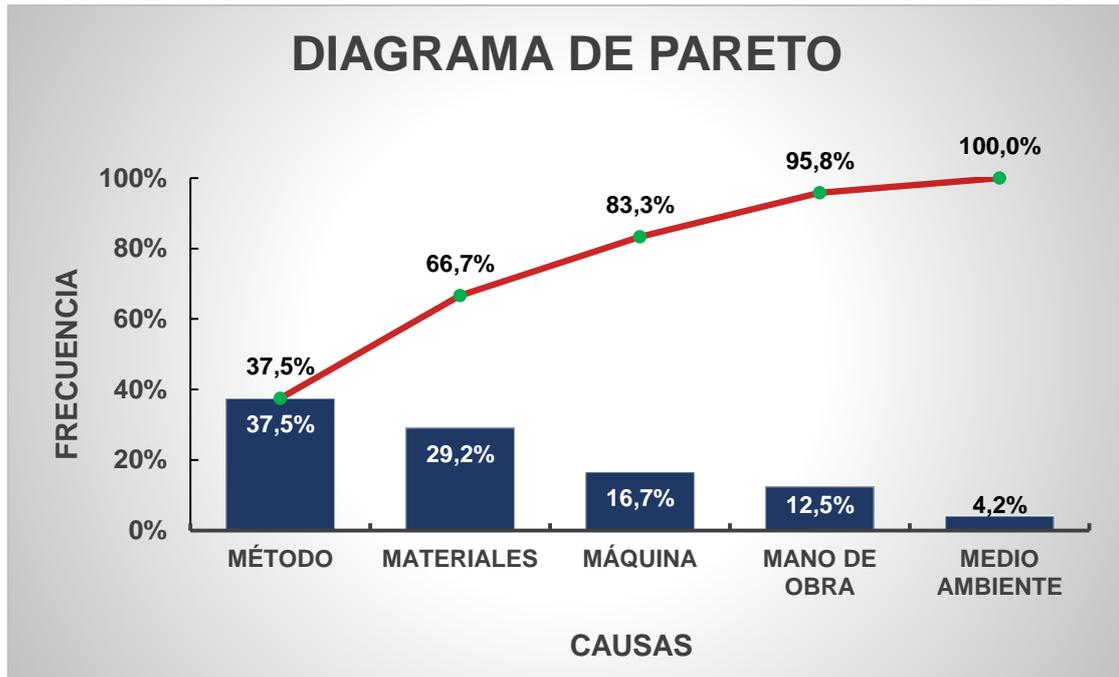


Figura 4. 1. Diagrama de Pareto
(Fuente: Tabla de datos de Excel)

Como se puede observar las observaciones del método, materiales y máquina abarcan el 83,3 % de los problemas, los mismos que están centralizados en el proceso y control de soldadura por lo cual se proponen las siguientes soluciones que incluso pueden atacar varias observaciones a la vez.

Modificar el procedimiento de soldadura de tal manera que garantice la correcta operación el momento de soldar, con los registros adecuados.

Actualizar el instructivo de soldadura el cual incluya los parámetros de control de las variables de soldadura.

Implementación y validación de los Procedimientos de Soldadura (WPS), con su respectivo control estadístico en el proceso.

Implementar un plan de control para el armado de elementos que facilite la soldadura.

Implementar un control de calidad en el proceso de soldadura y calibración de equipos.

Capacitar al personal acerca de los procedimientos de soldadura y las herramientas de calidad a implementar.

Una vez que se encuentren ejecutadas las soluciones mencionadas se analizarán los resultados en base a ensayos técnicos, destructivos y no destructivos para la validación de resultados.

4.1.3. Lista de Chequeo o Verificación

Este documento es un medio para registrar de manera eficiente los datos, dicho documento debe estar lo suficientemente claro para que la persona que lleva el control de las operaciones y mejoras implementadas puedan ser medidas.

Adicionalmente una lista de verificación de datos son los registros en los cuales el operador pueda recopilar los valores precisos y la persona responsable de control de calidad pueda analizar dicha información en una base de datos para un control en el proceso, por tal motivo se implementó una documentación digital nueva dentro del sistema de gestión de INSTRUMENTAL INC, en el cual se puede visualizar el comportamiento al detalle según el WPS y los datos de las variables esenciales de soldadura en el proceso. (Ver Anexo 2)

4.2. Implementación del control de calidad en el proceso de soldadura.

El control de calidad en el proceso de soldadura se realiza mediante una verificación exhaustiva de cada etapa del proceso, dicha verificación está detallada dentro del “Procedimiento de Soldadura OP.04_PE.02” (Anexo 3), dicho documento está dentro del sistema de gestión documental de INSTRUMENTAL INC, en el cual se hace referencia a lo siguiente:

- Definiciones técnicas de soldadura.
- Responsables de cada etapa del proceso.
- Soldabilidad de los materiales. (OP.04_PE.02_FR.04) Anexo 4.
- Normas de referencia para la fabricación de elementos.
- Plan de Control (OP.04_PE.02_DG.03). Anexo 5.
- Registros de calibración de equipos (OP.04_PE.02_FR.03) Anexo 6.
- Registros de control del proceso (OP.04_PE.02_FR.02) Anexo 7.
- Registros de control de calidad de soldadura (OP.04_PE.02_FR.01) Anexo 8.
- Instructivo de operación de Soldadura (OP.04_PE.02_IT.01) Anexo 9.

Para una mejor descripción del proceso de control de calidad en el proceso de soldadura se implementaron los siguientes documentos:

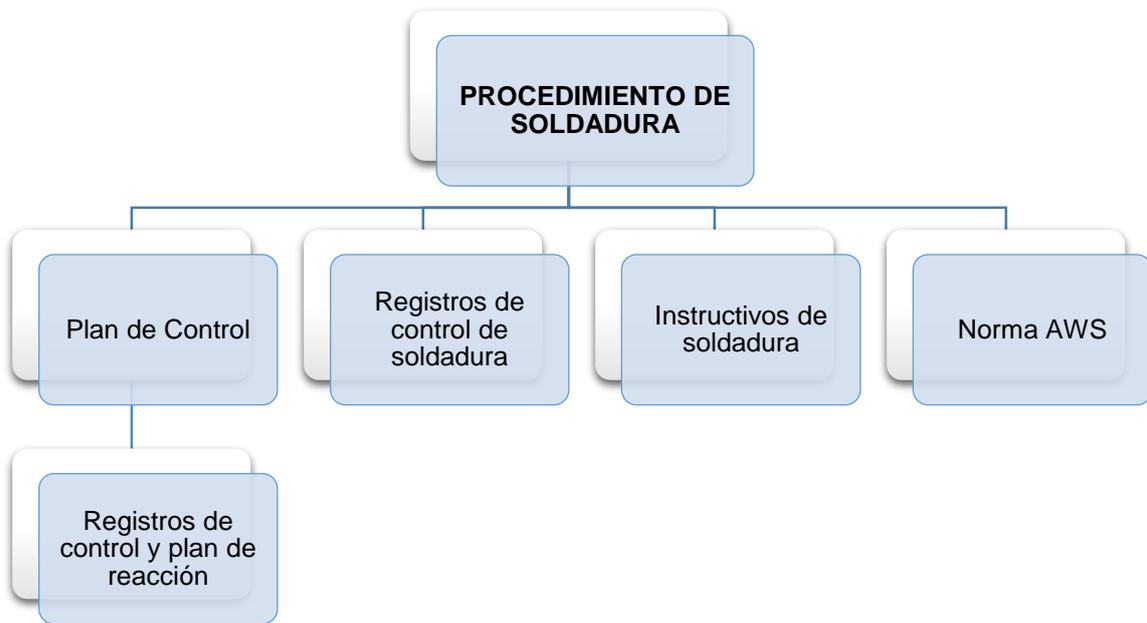


Figura 4. 2. Estructura de la documentación para el proceso de Soldadura.
(Fuente: Control de la documentación de INSTRUMENTAL INC)

A continuación se presenta un flujograma del proceso Implementado:

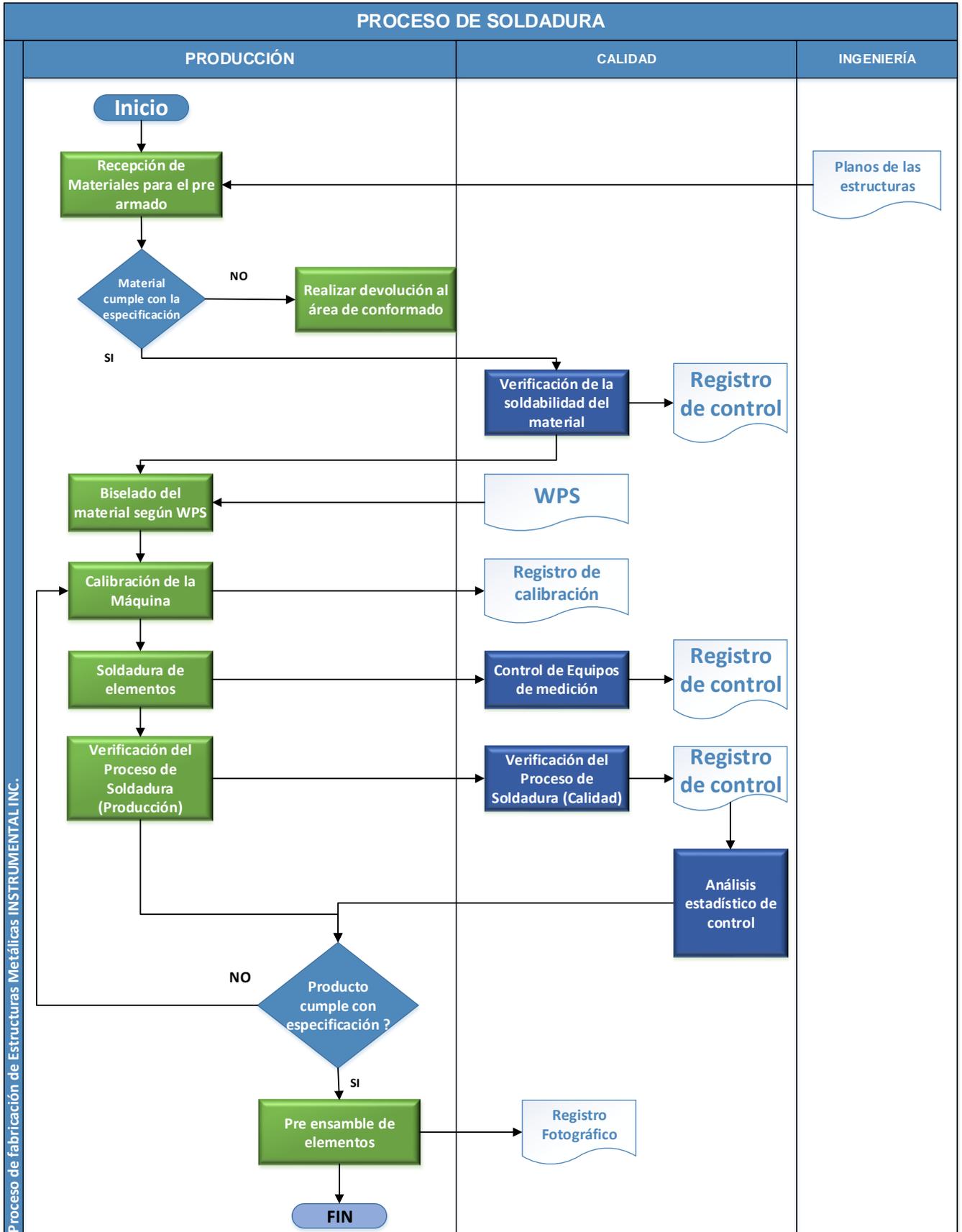


Figura 4. 3. . Flujograma del Proceso de fabricación de estructuras soldadas.
(Fuente: Procedimiento de Soldadura INSTRUMENTAL INC)

4.2.1. Soldabilidad de materiales

En este documento se registran los valores del porcentaje de los elementos químicos de cada material a soldar obtenidos del certificado de origen de la materia prima con la finalidad de establecer una metodología clara para el proceso de soldadura. En esta hoja de cálculo se analiza el material según el contenido de carbono y carbono equivalente (Ceq) según la norma AWS D1.1, en la cual se verificará en el gráfico respectivo si los materiales son de fácil, media o difícil soldabilidad tal como se explicó en el Capítulo 2.

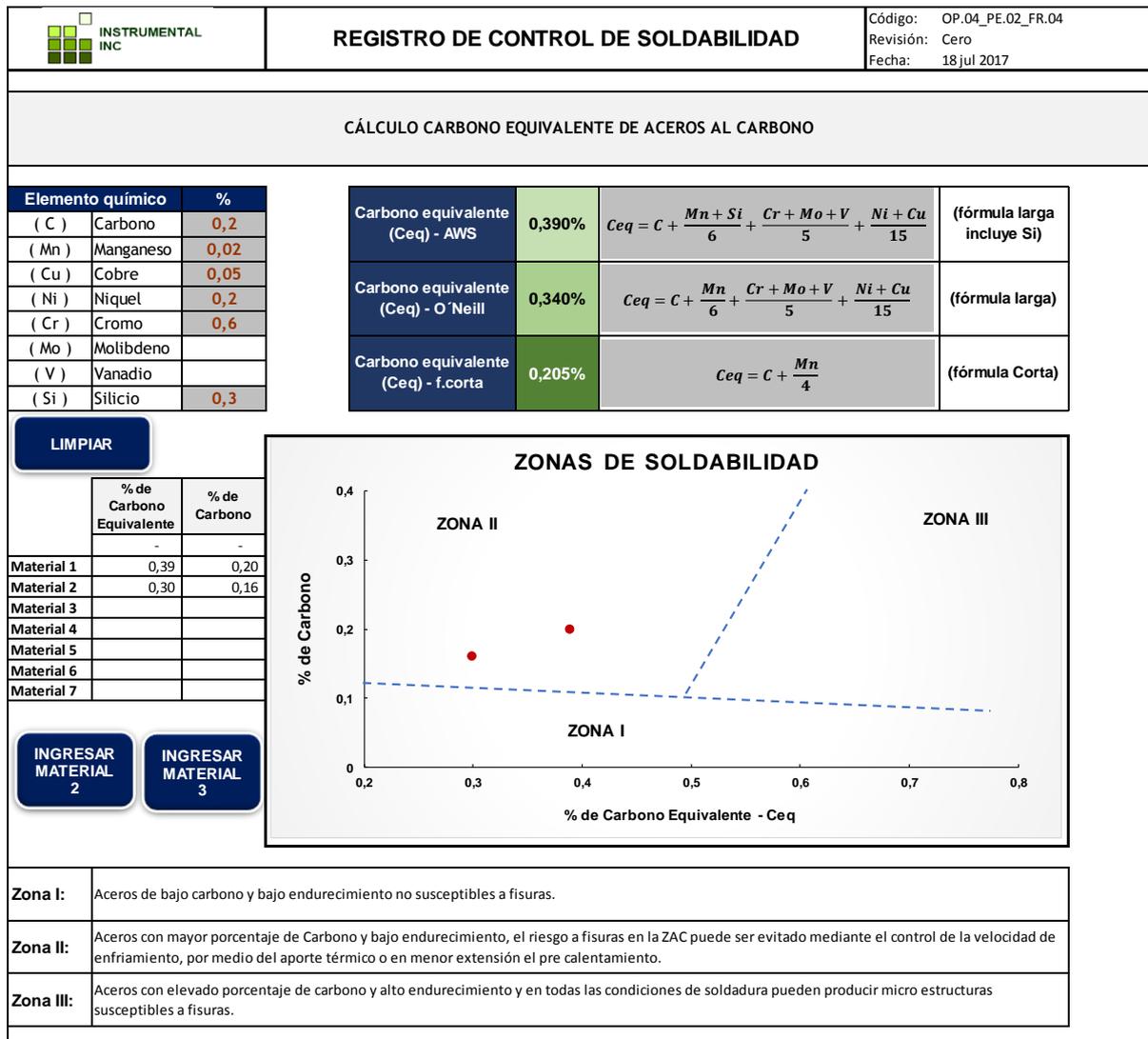


Figura 4. 4. Registro de verificación de soldabilidad de materiales.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.2.2. Plan de control

El plan de control es un documento en el cual se especifica todos los criterios de control que afectan tanto al proceso y al producto, basados en la especificación de la norma AWS D1.1.

En el Plan de control se menciona cada operación del proceso de soldadura y el control de cada una de ellas al igual que los registros usados, la frecuencia de control, los dispositivos de medición utilizados y el plan de reacción en caso de que haya alguna no conformidad en el producto.

El cumplimiento de este documento asegura que las operaciones se realicen de una manera secuencial y con un control en cada operación evitando errores y defectos fuera de línea.

INSTRUMENTAL INC		PLAN DE CONTROL DE CALIDAD						Código: OP.04_PE.02_DG.03 Edición: cero	
Nombre de la Operación: Soldado de Elementos Estructurales		Especificación: AWS D1.1		Revisado por:		Aprobado:		Fecha:	
Entrada: Orden de Trabajo Material a Soldar		Salida: Reporte de Producción/ Reporte de Inspección Soldado de Elementos Estructurales.				Cliente: Aseguramiento de Calidad / Cliente Final			
Código de Operación	Operación:	Característica Crítica	Producto	Proceso	Especificaciones / Criterio Aceptación	Método/ Equipo de Control	Frecuencia de Control:	Registro	Plan de Reacción
010	Verificación de la materia prima	Porcentaje de contenido de carbono elevado		X	Verificar que el contenido de carbono esté en una de las tres zonas óptimas para soldadura.	Base de datos según norma AWS D1.1	100%		
020	Armado de elementos	Cuadratura de elementos	X	X	Verificación de dimensiones de perfiles para poste +/- 2mm.	Flexómetro	100%	OP.04_PE.02_FR.01	
		Perpendicularidad de Elementos	X		90 grados entre elementos armados (Brida - Octógono)	Escuadra	100%		
		Rectitud de la Estructura (alineación)	X		Flecha max : 3 mm	Visual / Cordon plástico	100%		
		Punteado (Electrodo Revestido).	X		Para la unión de octógonos, un cordón de 10mm cada 250mm.	Visual	100%		
030		Limpieza del material base a soldar	X	X	Material libre de Grasa, Humedad, Oxido, Escoria, pintura o calamina.	Visual	Al inicio de la soldadura		
040		Estado del Electrodo y del Material de Aporte		X	Electrodos y Material de Aporte Libre de Humedad e Impurezas	Visual	100%		
050	Soldado de Elementos	Proceso de soldadura		X	Según Especificación del WPS que aplique.	Visual	100%	OP.04_PE.02_FR.02	Si existen defectos de soldadura como poros, mordeduras, fisuras o falta de fusión se debe reparar el cordón según numeral 5.26 de la norma AWS D1.1
		Soldadura libre de poros y cráteres (MIG, OUTERSHIELD, INERSHIELD, ELECTRODO REVESTIDO)	X		La presencia de poros no debe ser mayor que un poro de diámetro 2 mm cada 102 mm	Visual/ Flexómetro/ Calibrador	100%		
		Cordón de Soldadura.	X		Catetos y garganta según requerimiento.	Catetómetro	Intervalo de 1m. de distancia cada metro		
		Tipo de Electrodo		X	Según Especificación del WPS, y en condiciones adecuadas para su uso.	Visual	100%		

Figura 4. 5. Plan de control de Soldadura.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.2.3. Registro de calibración de equipos

El registro de calibración de equipos es un documento en el cual se registran las mediciones de los equipos de control como flexómetros, galgas, escuadras, goniómetros,

etc., en el cual se verifica si el equipo de medición es apto para la operación y los valores de las medidas que indican cada equipo son las adecuadas.

El registro de calibración de equipos de medición permite la comparación de un equipo de medición respecto a un patrón el cual está verificado, calibrado y certificado por un ente de control certificado, permite el cálculo de la incertidumbre del equipo, el error máximo de medición correspondiente al 0,5 %, la frecuencia de control y las respectivas firmas de responsabilidad.

INSTRUMENTAL INC		REGISTRO DE CALIBRACION OP.04_PE.02_FR.03															
INFORMACION DEL EQUIPO DE MEDICION												CONDICIONES AMBIENTALES Reporte N°: 42C031-02					
DESCRIPCION: Regla 20 mm												TEMPERATURA: 21° C					
CODIGO: 42C031		UNIDAD DE MEDICION: mm										CALCULO DE INCERTIDUMBRES					
MARCA: PTCo.		RESOLUCION (r): 1										INCERTIDUMBRE DE CALIBRACION: $U_e = U / k$		INCERTIDUMBRE DE LA MEDIDA: $U_x = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$			
MODELO: 18873		FRECUENCIA DE CALIBRACION: ANUAL										INCERTIDUMBRE DE CLASE: $U_a = \frac{r}{\sqrt{3}}$		INCERTIDUMBRE DE LA MEDICION: $U_y = \sqrt{U_e^2 + U_a^2 + U_x^2}$			
SERIE: ---		INSTRUCTIVO DE CALIBRACION: IN-00313															
PATRONES DE CALIBRACION UTILIZADOS																	
CALIBRADOR PIE DE REY						REGLA METALICA											
CODIGO: 41C006		CERTIFICADO DE CALIBRACION: LPC-L-2011-083										CODIGO: 42B001		CERTIFICADO DE CALIBRACION: INEN-2001			
MARCA: MITUTOYO		FECHA DE CALIBRACION: 01-mar-12										MARCA: STAINLESS		FECHA DE CALIBRACION: 01-mar-12			
MODELO: 500-196-20B		PROXIMA CALIBRACION: 01-mar-13										MODELO: INCH		PROXIMA CALIBRACION: 01-mar-13			
SERIE: 08911878		INCERTIDUMBRE: 0,0019000 Um										SERIE:		INCERTIDUMBRE:			
TABLA DE VALORES																	
VALOR DEL PATRON	NUMERO DE MEDICIONES	VALORES MEDIDOS					PROMEDIO	ERROR	DESVIACION ESTANDAR	INCERTIDUMBRE DE LA MEDIA	INCERTIDUMBRE DE CALIBRACION	INCERTIDUMBRE DE CLASE	INCERTIDUMBRE DE LA MEDICION	ERROR MAXIMO PERMISIBLE	CRITERIO DE ACEPTACION		EVALUACION
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅									\bar{X}	e	
10,00	5	9,92	9,94	10,00	9,83	10,00	9,94	-0,062	0,070143	0,031369	0,000950	0,000000	0,031383	0,500	SI	SI	OK
5,00	5	4,93	4,98	5,05	4,99	4,90	4,97	-0,030	0,057879	0,025884	0,000950	0,000000	0,025902	0,250	SI	SI	OK
1,50	5	1,45	1,42	1,41	1,42	1,47	1,43	-0,066	0,025100	0,011225	0,000950	0,000000	0,011265	0,075	SI	SI	OK
2,00	5	1,85	2,01	1,96	1,96	1,91	1,94	-0,062	0,060581	0,027092	0,000950	0,000000	0,027109	0,100	SI	SI	OK
5,00	5	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	0,000	0,000000	0,000000	0,000950	0,000000	0,000950	0,250	SI	SI	OK
10,00	5	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	0,000	0,000000	0,000000	0,000950	0,000000	0,000950	0,500	SI	SI	OK
15,00	5	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	0,000	0,000000	0,000000	0,000950	0,000000	0,000950	0,750	SI	SI	OK
20,00	5	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	0,000	0,000000	0,000000	0,000950	0,000000	0,000950	1,000	SI	SI	OK
VALOR DEL PATRON	INCERTIDUMBRE AMPLIADA (U)					FECHA DE CALIBRACION: 07-may-17				PROXIMA CALIBRACION: 07-may-18				OSERVACIONES			
	Vp	U _y	U = k U _y (con k = 2)				ELABORO: CARLOS HERNÁNDEZ				APROBO:						
10,00	0,031383	0,062766															
5,00	0,025902	0,051804															
1,50	0,011265	0,022530															
2,00	0,027109	0,054218															
5,00	0,000950	0,001900															
10,00	0,000950	0,001900															
15,00	0,000950	0,001900															
20,00	0,000950	0,001900															

Figura 4. 6. Registro de calibración de equipos.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.2.4. Registro de control del proceso

El registro del control del proceso es un documento en el cual el operador toma los datos de las variables esenciales del proceso de soldadura y el control dimensional del cordón con las observaciones respectivas, dicha información es tomada el momento de la ejecución del proceso de soldadura con el fin de que dicho proceso cumpla los estándares establecidos en el Plan de control y en el WPS, luego de que el registro esté lleno, el supervisor de calidad registra dicha información en una base de datos para un control estadístico del proceso, para luego tomar las acciones necesarias en caso que el resultado del análisis presente alguna observación o inestabilidad en el proceso.

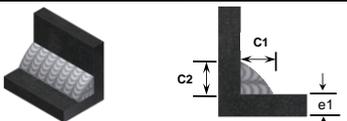
INSTRUMENTAL INC		CONTROL DEL PROCESO DE SOLDADURA										Código:	OP-04_PE.02_FR.02		
												Revisión:	00		
												Fecha:	20_jul_2017		
CLIENTE: _____				SOLDADOR: _____											
PROYECTO: _____				LOTE: _____											
FECHA: _____															
Item	DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO	MATERIAL BASE	WPS No.	PROCESO DE SOLDADURA	CORRIENTE (Amperios)	VOLTAJE (Volts)	LONGITUD (mm)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD (mm/min)	NÚMERO DE PASADAS	STICKOUT	DIMENSIONES DEL CORDÓN			
												C1 (mm)	C2 (mm)	GARGANTA (mm)	
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
Soldadura de ranura						Soldadura de Filete									
															
OBSERVACIONES:															
<hr/> <hr/>															
ELABORADO POR:							REVISADO POR:								

Figura 4. 7. Registro de control del Proceso.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.2.5. Registro de control de calidad de soldadura del producto final

El registro de control del producto final es un documento para registrar los valores cualitativos y cuantitativos del producto final como resultado de una inspección final al 100% del producto tanto por parte del área de Producción como del área de Calidad, en el cual se inspecciona las discontinuidades de soldadura, las características dimensionales y superficiales, dicho registro adicionalmente consta de firmas de responsabilidad garantizando al cliente que el producto fabricado está en óptimas condiciones bajo las especificaciones de la norma AWS D1.1.

		CONTROL DE CALIDAD DE SOLDADURA												Código: CP-04_PE02_FR.01 Revisión: 01 Fecha: 20 jul 2017		
CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS																
CLIENTE: PROYECTO:								CODIGO: DESTINO:								
Item	SOLDADOR	CODIGO ELEMENTO	LONGITUD	INSPECCIÓN VISUAL						INSPECCIÓN DIMENSIONAL		INSPECCIÓN SUPERFICIAL			OBSERVACIONES	
				Grietas	Fusión Incompleta	Ausencia de crateres	Socavado	Porosidad	PRUEBA TINTAS PENETRANTES	Deformación por calor	Variación de Longitud	Salpicaduras	Corrosión	Pintura/Galvanizado	Otros defectos	Reparación
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
OBSERVACIONES:																
ELABORADO POR:								REVISADO POR:								
FIRMA:								FIRMA:								
NOMBRE:								NOMBRE:								
Supervisor de Calidad								Supervisor de Planta								
C = Cumple NC = No cumple NA = No aplica																

Figura 4. 8. Registro de control de calidad de soldadura.
 (Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

En base al registro de control del proceso y del registro del producto final INSTRUMENTAL INC emite un Certificado de Calidad el cual es la garantía del producto fabricado con la respectiva trazabilidad y las condiciones bajo las cuales fue fabricado.

El Certificado de Calidad consta de las respectivas características dimensionales, de soldadura y recubrimiento, la evaluación de la conformidad de la materia prima utilizada según las normas aplicables, la evaluación de la inspección, el resultado del cumplimiento de la especificación y las firmas de responsabilidad de manufactura del producto, en el cual la empresa se responsabiliza de los valores emitidos en el certificado de calidad.



CERTIFICADO DE CALIDAD

DOCUMENTO: _____ FECHA: 21 jun 2017

CLIENTE: _____

PRODUCTO: _____ CANTIDAD: _____ UNIDAD: _____

El presente documento certifica que el producto (NOMBRE DEL PRODUCTO) comercializado por INSTRUMENTAL INC cumple con la especificación en la norma AWS D1.1 para soldadura de estructuras metálicas, ASTM 123 para galvanizado y la correspondiente para materia prima, tal como se muestran en la siguiente tabla:

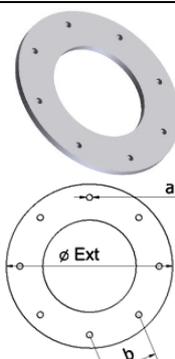
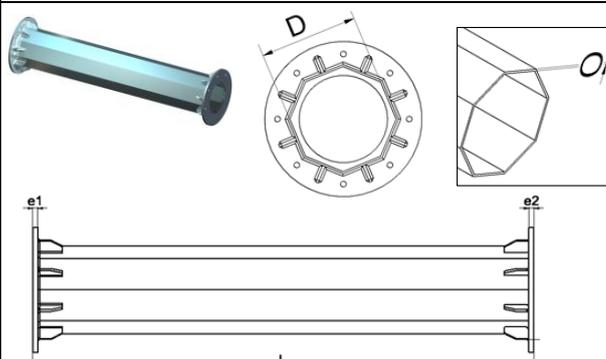
MATERIA PRIMA					
ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL	NORMA DE ESPECIFICACIÓN	RESULTADO DE LA INSPECCIÓN			
DIMENSIONES DEL MATERIAL					
Brida	Cuerpo de la estructura				
					
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	ESPECIFICACIÓN (mm)			VALOR MEDIDO	RESULTADO
	Mínimo	Máximo	Nominal		
BRIDA					
Diámetro exterior del elemento					CUMPLE
Espesor 1 (e1)					CUMPLE
Espesor 2 (e2)					CUMPLE
Número de agujeros					CUMPLE
Diámetro de las perforaciones (a)					CUMPLE
Distancia entre perforaciones (b)					CUMPLE
CUERPO DEL MONOPOLO					
Longitud Total (L)					CUMPLE
Espesor del octógono (O)					CUMPLE
Diámetro exterior del Octógono (D)					CUMPLE
Número de lados					CUMPLE
Ángulo entre lados					CUMPLE
Rectitud (Alineación)					CUMPLE
Perpendicularidad (Brida - Octógono)					CUMPLE
RECUBRIMIENTO					
Espesor de galvanizado Brida (Micras µ)					CUMPLE
Espesor de galvanizado cuerpo (Micras µ)					CUMPLE
Espesor de Pintura (Micras µ)					CUMPLE
SOLDADURA					
EVALUACIÓN POR ATRIBUTOS					
EVALUACIÓN DE LA INSPECCIÓN				RESULTADO	
Ausencia de porosidades					
Ausencia de cráteres					
Ausencia de fisuras					
Fusión completa					
Tintas penetrantes					
OBSERVACIONES					
Elaborado por:	Aprobado por:				
_____ Vladimir Álvarez Supervisor de Calidad	_____ Byron Narvaez Gerente de Planta				

Figura 4. 9. Formato de Certificado de Calidad.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.2.6. Instructivo de operación soldadura

El instructivo de soldadura es un documento en el cual se describe cada actividad de manera secuencial y al detalle la ejecución de la operación de soldadura incluyendo temas de calidad, ambiente y seguridad con sus respectivas fotografías, de tal manera que la operación se realice de manera óptima y segura evitando posibles fallos el momento de la ejecución de la operación.

	INSTRUCTIVO DE SOLDADORA	Código: OP.04_PE.02.IT.01 Revisión: 00 Fecha: 06-Ene-15
---	---------------------------------	--

OBJETIVO:

No.	GUIA VISUAL/FLUJOGRAMA	DESCRIPCION	RESPONSABLE	CRITERIO DE CONTROL
1.		Equipo de Protección Personal	Soldador	<p>Previo al uso del equipo de soldadura, el Soldador deberá utilizar los siguientes equipos de protección según especificaciones A.P.I.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Máscara de soldar - Mandil y mangas de cuero - Guantes - Capucha de protección - Ropa de trabajo - Zapatos punta de acero
2.		Alimentación de energía eléctrica	Soldador	<p>La máquina debe trabajar con una toma trifásica de 220V.</p> <p>El Soldador debe verificar que la toma se encuentre en perfecto estado.</p>

	INSTRUCTIVO DE SOLDADORA	Código: OP.04_PE.02.IT.01 Revisión: 00 Fecha: 06-Ene-15
---	---------------------------------	--

3.		Alimentación del CO2	Soldador	<p>La manipulación debe hacerse con las manos libres de grasa, aceite o combustibles.</p> <p>Al cambiar el tanque de CO2 se debe cerrar la válvula del tanque y luego abrir la válvula del manómetro.</p> <p>Referencia a la tabla No-1</p>
4.		Regulación del manómetro	Soldador	<p>Se debe regular el manómetro de entrada a 1000 psi. y el de salida entre 15 a 20 psi.</p>

Figura 4. 10. Instructivo de operación de soldadura.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.3. Control estadístico de las variables de soldadura.

El control estadístico de las variables de soldadura permite mantener las variables principales dentro del rango establecido en el WPS, evitando defectos en la soldadura y reparaciones luego de la fabricación del producto, además de la verificación constante de la máquina para el correcto funcionamiento dentro de los parámetros óptimos de trabajo para la soldadura.

El análisis estadístico de un proceso permite distinguir las variaciones de fondo en base al monitoreo del centro del proceso, por tal motivo se han escogido para el respectivo análisis a las variables principales de soldadura como corriente, voltaje y velocidad de soldadura.

4.3.1. Control de Corriente

La intensidad de corriente eléctrica es el parámetro más importante a controlar, ya que pequeños movimientos a causa del operador o de la variación de voltaje generan grandes variaciones de corriente, generando falta de fusión o exceso de la misma, por tal motivo según el WPS OP.04_PE.02_GR.02/ WPS - INSTRUMENTAL – 01 (Anexo 10) referente a la unión Brida - Octógono se toman como límites superior e inferior los siguientes valores:

Primer pase: 195 – 165 A

Segundo al cuarto pase: 225 – 195 A

Para lo cual se implementó una base de datos en la cual se ingresan los valores de corriente y se pueden verificar los valores de la Capacidad del Proceso C_p y centramiento del Proceso C_{pk} de manera automática, al igual que los valores promedio y la variación en el transcurso del tiempo, dichas variaciones permiten controlar mejor el proceso ya que se disponen de rangos móviles y una gráfica por cada uno de los pases, lo cual garantiza un seguimiento adecuado de los parámetros el momento de la soldadura.

A continuación se presenta la base de cálculo del análisis estadístico de datos:

ITEM	WPS	ANALISIS Cp Y Cpk CORRIENTE						Requerimiento: Cp y Cpk > 1,33			Ingresar datos	Unidades		ESTATUS
		Máquina	N° PASE	TIPO DE CORRIENTE	Rangos de corriente			Capacidad de proceso Cp	Centramiento de proceso Cpk	Periodo de actualizacion				
					MIN LIE (A)	MAX LSE (A)	NOM Tgt (A)			28-jul		01-jul		
1	WPS - INSTRUMENTAL - 01	M1.01	1	DC +	165,0	195,0	180	2,02	1,96	Ingresar datos	28-jul	01-jul	✓	
2		M1.02	2	DC +	195,0	225,0	210	1,36	1,32				!	
3		M1.03	3	DC +	195,0	225,0	210	1,38	1,03				!	
4		M1.04	4	DC +	195,0	225,0	210	1,61	0,55				✗	
5	WPS - INSTRUMENTAL - 02	M1.05	1	DC +	165,0	195,0	180	1,37	1,14	Ingresar	28-jul	01-jul	!	
6		M1.06	2	DC +	195,0	225,0	210	1,96	0,82				✗	
7	WPS - INSTRUMENTAL - 03	M1.07	1	DC +	235,0	265,0	250	1,27	1,10	Ingresar	28-jul	01-jul	!	
8		M1.08	2	DC +				0,00	0,00				✗	
9	WPS - INSTRUMENTAL - 04	M1.09	1	DC +				0,00	0,00	Ingresar	28-jul	01-jul	✗	
10		M1.10	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
11	WPS - INSTRUMENTAL - 05	M1.11	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul	01-jul	✗	
12		M1.12	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
13	WPS - INSTRUMENTAL - 06	M1.13	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul	01-jul	✗	
14		M1.14	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	

Figura 4. 11. Pantalla de ingreso de datos para el cálculo estadístico del control de corriente.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

ITEM	WPS	ANALISIS Cp Y Cpk CORRIENTE						Requerimiento: Cp y Cpk > 1,33			Ingresar datos	Unidades		ESTATUS
		Máquina	N° PASE	TIPO DE CORRIENTE	Rangos de corriente			Capacidad de proceso Cp	Centramiento de proceso Cpk	Periodo de actualizacion				
					MIN LIE (A)	MAX LSE (A)	NOM Tgt (A)			28-jul		01-jul		
1	WPS - INSTRUMENTAL - 01	M1.01	1	DC +	165,0	195,0	180	2,02	1,96	Ingresar datos	28-jul	01-jul	✓	
2		M1.02	2	DC +	195,0	225,0	210	1,36	1,32				!	
3		M1.03	3	DC +	195,0	225,0	210	1,38	1,03				!	
4		M1.04	4	DC +	195,0	225,0	210	1,61	0,55				✗	
5	WPS - INSTRUMENTAL - 02	M1.05	1	DC +	165,0	195,0	180	1,37	1,14	Ingresar	28-jul	01-jul	!	
6		M1.06	2	DC +	195,0	225,0	210	1,96	0,82				✗	
7	WPS - INSTRUMENTAL - 03	M1.07	1	DC +	235,0	265,0	250	1,27	1,10	Ingresar	28-jul	01-jul	!	
8		M1.08	2	DC +				0,00	0,00				✗	
9	WPS - INSTRUMENTAL - 04	M1.09	1	DC +				0,00	0,00	Ingresar	28-jul	01-jul	✗	
10		M1.10	2	DC +				0,00	0,00				✗	
11	WPS - INSTRUMENTAL - 05	M1.11	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul	01-jul	✗	
12		M1.12	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
13	WPS - INSTRUMENTAL - 06	M1.13	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul	01-jul	✗	
14		M1.14	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	

Figura 4. 12. Pantalla estatus del Cp y Cpk, por cada cordón de soldadura.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

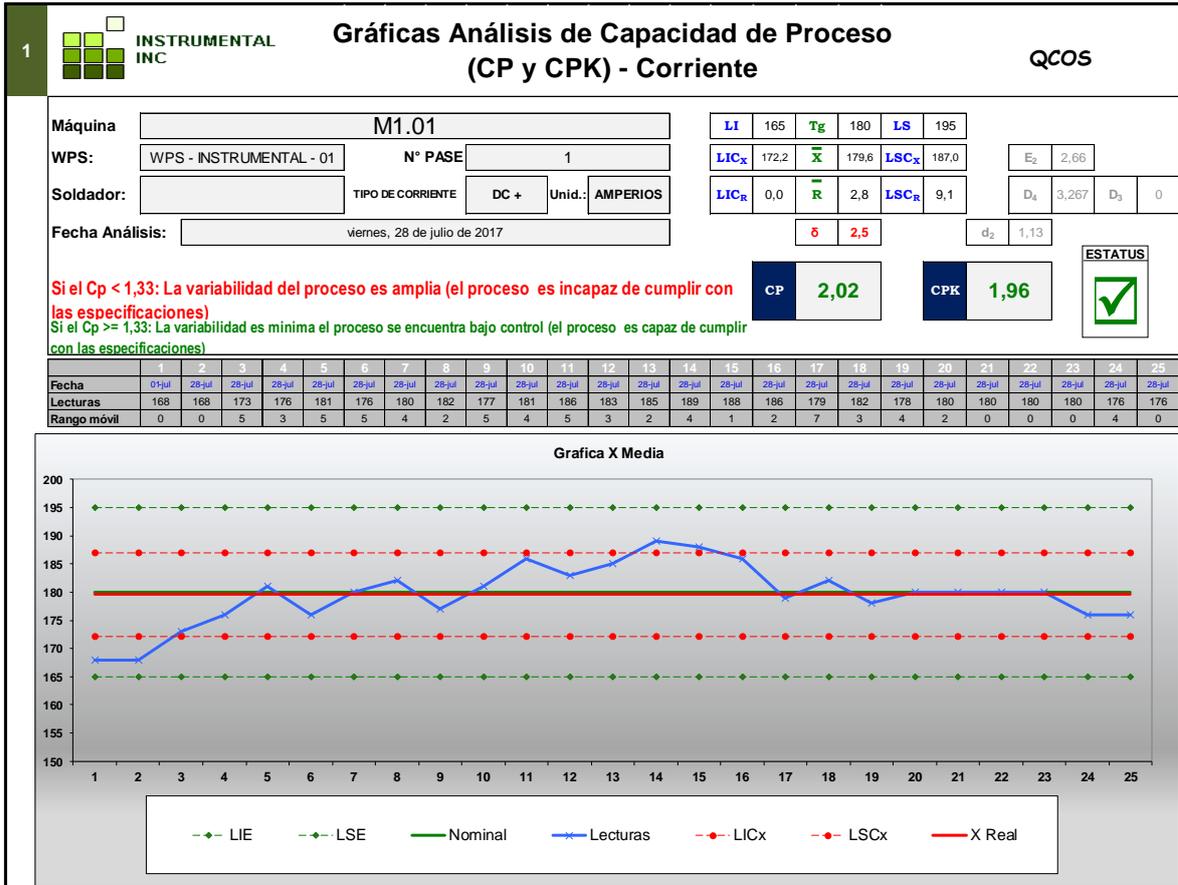


Figura 4. 13. Gráfica de control del primer pase del WPS 01.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

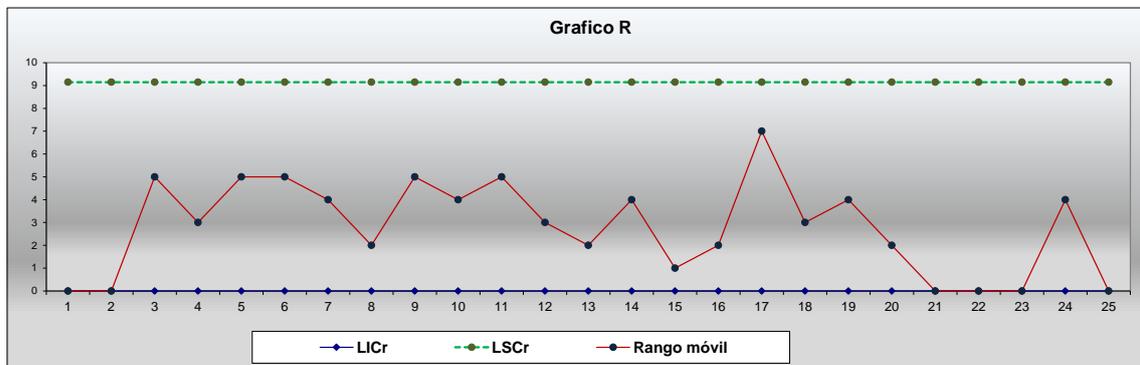


Figura 4. 14. Gráfica de rangos del primer pase.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

	Los Valores de Cp y Cpk $\geq 1,33$
	Uno de los valores de Cp y Cpk $\geq 1,33$ y otro ≥ 1
	Los Valores de Cp y Cpk $\leq 1,33$

Figura 4. 15. Significado del estado de las variables
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

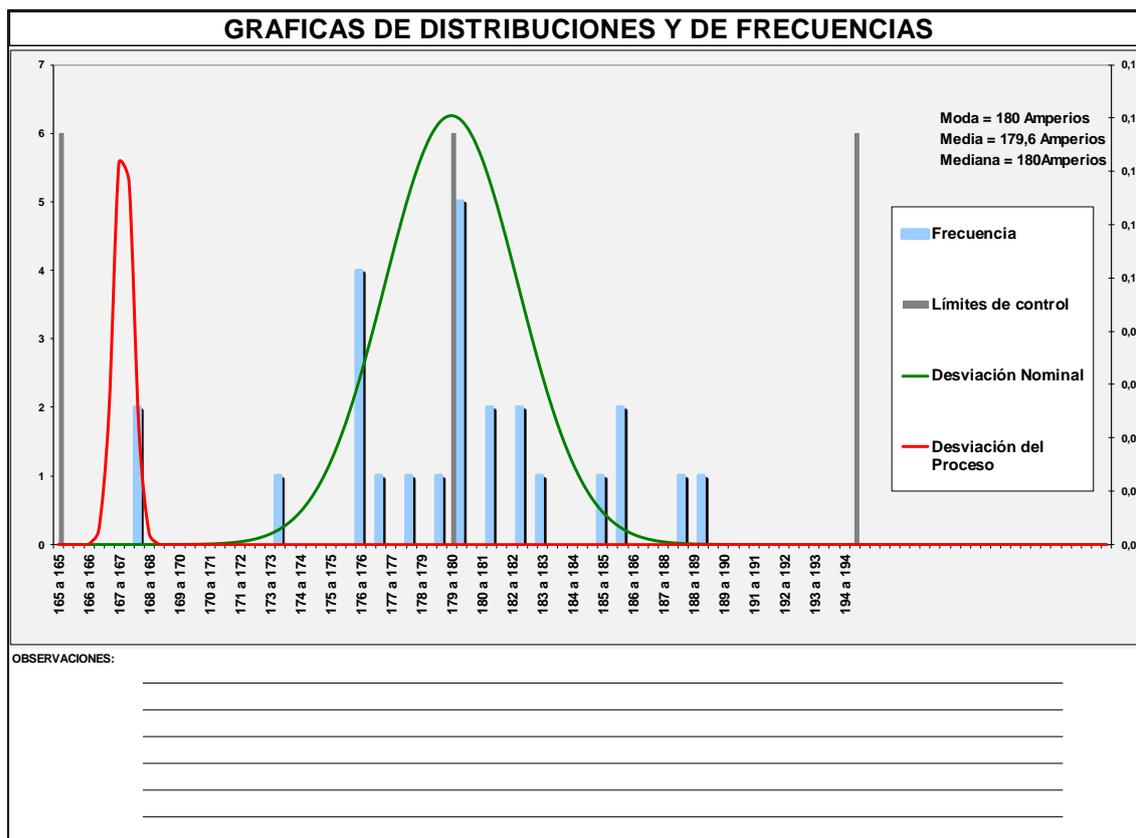


Figura 4. 16. Grafica de distribución de frecuencias del primer pase.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.3.2. Control de Voltaje

El control de este parámetro es de vital importancia en un proceso de voltaje constante puesto que pequeñas variaciones generan grandes picos de corriente, generando exceso o falta de calor el momento de la soldadura, ocasionando ciertos defectos, unos visibles otros internos, por tal motivo según el WPS mencionado en el numeral anterior OP.04_PE.02_GR.02/ WPS - INSTRUMENTAL – 01 referente a la unión Brida - Octógono se toman como límites superior e inferior los siguientes valores:

Primer pase: 23 – 25 V

Segundo al cuarto pase: 27 – 29 V

Los valores mencionados fueron implementados mediante un análisis de la ficha técnica del fabricante de los electrodos y un análisis empírico en base a pruebas realizadas, los valores se registran en una base similar al control de corriente en la cual se puede verificar la Capacidad del Proceso Cp, Centramiento del Proceso Cpk y graficas de control de manera automática.

ITEM	WPS	ANALISIS Cp Y Cpk VOLTAJE							Requerimiento: Cp y Cpk > 1,33		Ingresar datos	Unidades Voltios		ESTATUS
		Máquina	N° PASE	TIPO DE CORRIENTE	Rangos de VOLTAJE			Capacidad de proceso Cp	Centramiento de proceso Cpk	Periodo de actualizacion				
					MIN LIE (V)	MAX LSE (V)	NOM Tgt (V)			31-jul		28-jul		
1	WPS - INSTRUMENTAL - 01	M1.01	1	DC +	23,0	25,0	24	1,74	1,43	Ingresar datos	31-jul	28-jul	✓	
2		M1.02	2	DC +	27,0	29,0	28	1,60	1,39				✓	
3		M1.03	3	DC +	27,0	29,0	28	1,78	1,54				✓	
4		M1.04	4	DC +	27,0	29,0	28	1,41	1,25				!	
5	WPS - INSTRUMENTAL - 02	M1.05	1	DC +	23,0	25,0	24	1,74	1,43	Ingresar	31-jul	28-jul	✓	
6		M1.06	2	DC +	27,0	29,0	28	1,60	1,39				✓	
7	WPS - INSTRUMENTAL - 03	M1.07	1	DC +	24,0	26,0	25	1,36	1,10	Ingresar	31-jul	28-jul	!	
8		M1.08	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
9	WPS - INSTRUMENTAL - 04	M1.09	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	31-jul	28-jul	✗	
10		M1.10	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
11	WPS - INSTRUMENTAL - 05	M1.11	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	31-jul	28-jul	✗	
12		M1.12	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
13	WPS - INSTRUMENTAL - 06	M1.13	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	31-jul	28-jul	✗	
14		M1.14	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	

Figura 4. 17. Pantalla de ingreso de datos para el cálculo estadístico del control de Voltaje (Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

ITEM	WPS	ANALISIS Cp Y Cpk VOLTAJE							Requerimiento: Cp y Cpk > 1,33		Ingresar datos	Unidades Voltios		ESTATUS
		Máquina	N° PASE	TIPO DE CORRIENTE	Rangos de VOLTAJE			Capacidad de proceso Cp	Centramiento de proceso Cpk	Periodo de actualizacion				
					MIN LIE (V)	MAX LSE (V)	NOM Tgt (V)			31-jul		28-jul		
1	INST	M1.01	1	DC +	23,0	25,0	24	1,74	1,43	Ingresar datos	31-jul	28-jul	✓	
2		M1.02	2	DC +	27,0	29,0	28	1,60	1,39				✓	
3		M1.03	3	DC +	27,0	29,0	28	1,78	1,54				✓	
4		M1.04	4	DC +	27,0	29,0	28	1,41	1,25				!	
5	WPS - INSTRUMENTAL - 02	M1.05	1	DC +	23,0	25,0	24	1,74	1,43	Ingresar	31-jul	28-jul	✓	
6		M1.06	2	DC +	27,0	29,0	28	1,60	1,39				✓	
7	WPS - INSTRUMENTAL - 03	M1.07	1	DC +	24,0	26,0	25	1,36	1,10	Ingresar	31-jul	28-jul	!	
8		M1.08	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
9	WPS - INSTRUMENTAL - 04	M1.09	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	31-jul	28-jul	✗	
10		M1.10	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
11	WPS - INSTRUMENTAL - 05	M1.11	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	31-jul	28-jul	✗	
12		M1.12	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	
13	WPS - INSTRUMENTAL - 06	M1.13	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	31-jul	28-jul	✗	
14		M1.14	2	DC +			0	0,00	0,00				✗	

Figura 4. 18. Pantalla estatus del Cp y Cpk, por cada cordón de soldadura. (Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

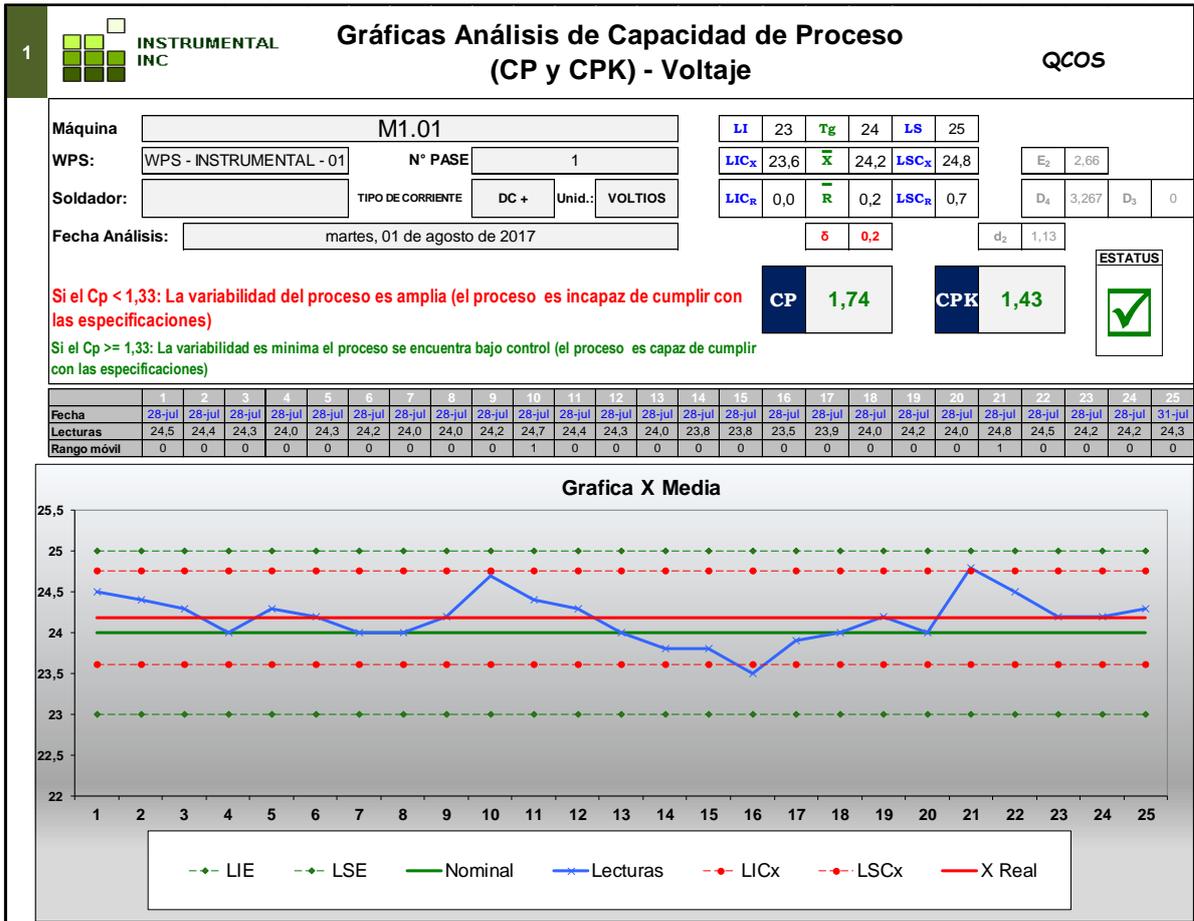


Figura 4. 19. Gráfica de control de voltaje del primer pase del WPS 01.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

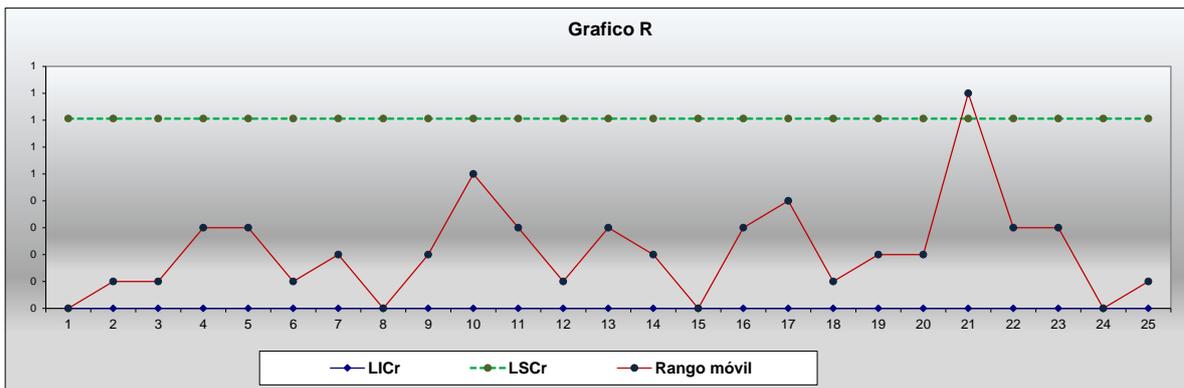


Figura 4. 20. Grafica de rangos de voltaje del primer pase.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

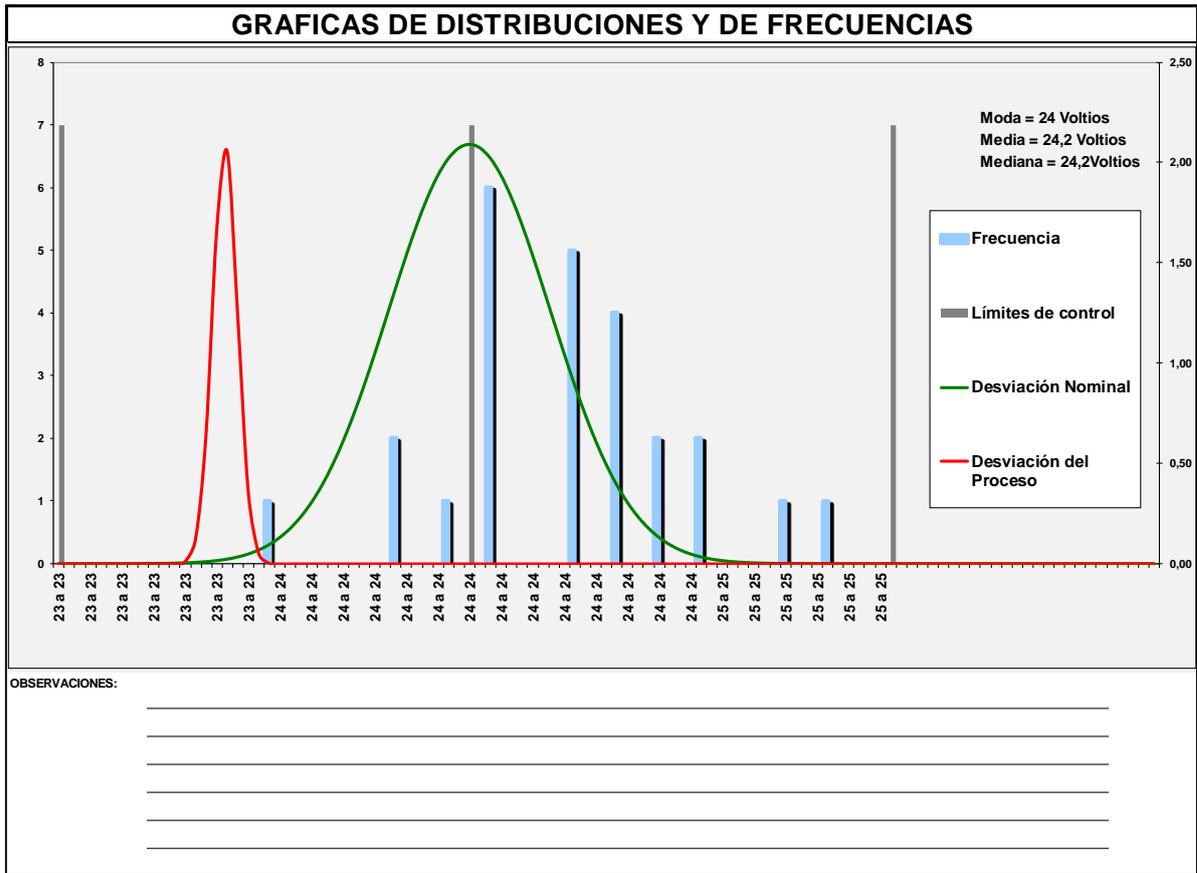


Figura 4. 21. Grafica de distribución de frecuencias de Voltaje del primer pase.
 (Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.3.3. Control de Velocidad

El control de este parámetro es importante en un proceso de soldadura GMAW o FCAW, ya que depende de la velocidad del soldador el incremento o falta de fusión. Una velocidad inadecuada genera aparición de defectos a simple vista como porosidades e incrustaciones de escoria en el proceso FCAW el momento de soldar, por tal motivo al igual que en los numerales anteriores se toma como referencia el procedimiento de soldadura OP.04_PE.02_GR.02/WPS - INSTRUMENTAL – 01 referente a la unión Brida - Octógono para lo cual se toman como límites superior e inferior los siguientes valores:

Primer pase: 150 – 180 mm/min

Segundo al cuarto pase: 180 – 210 mm/min

Los valores mencionados fueron implementados mediante un análisis empírico en base al diseño experimental del Capítulo III, y a pruebas realizadas. Los valores se registran en una base similar al control de corriente y voltaje en la cual se puede verificar la Capacidad del Proceso Cp, centramiento del Proceso Cpk y las gráficas de control de manera automática.

ITEM	WPS	ANALISIS Cp Y Cpk VELOCIDAD						Requerimiento: Cp y Cpk > 1,33		Ingresar datos	Unidades mm/seg		ESTATUS
		Máquina	N° PASE	TIPO DE CORRIENTE	Rangos de Velocidad			Capacidad de proceso Cp	Centramiento de proceso Cpk		Periodo de actualizacion		
					MIN LIE (mm/min)	MAX LSE (mm/min)	NOM Tgt (mm/min)				01-ago	28-jul 01-jul	
1	WPS - INSTRUMENTAL - 01	M1.01	1	DC +	150,0	180,0	165	1,96	0,61	Ingresar datos	28-jul 01-jul	×	
2		M1.02	2	DC +	180,0	210,0	195	1,35	0,05			×	
3		M1.03	3	DC +	180,0	210,0	195	1,38	0,35			×	
4		M1.04	4	DC +	180,0	210,0	195	1,61	1,05			!	
5	WPS - INSTRUMENTAL - 02	M1.05	1	DC +	150,0	180,0	165	1,83	0,53	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
6		M1.06	2	DC +	180,0	210,0	195	1,96	1,15			!	
7	WPS - INSTRUMENTAL - 03	M1.07	1	DC +				1,79	0,58	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
8		M1.08	2	DC +				0,00	0,00			×	
9	WPS - INSTRUMENTAL - 04	M1.09	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
10		M1.10	2	DC +			0	0,00	0,00			×	
11	WPS - INSTRUMENTAL - 05	M1.11	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
12		M1.12	2	DC +			0	0,00	0,00			×	
13	WPS - INSTRUMENTAL - 06	M1.13	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
14		M1.14	2	DC +			0	0,00	0,00			×	

Figura 4. 22. Pantalla de ingreso de datos para el cálculo estadístico del control de Velocidad. (Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

ITEM	WPS	ANALISIS Cp Y Cpk VELOCIDAD						Requerimiento: Cp y Cpk > 1,33		Ingresar datos	Unidades mm/seg		ESTATUS
		Máquina	N° PASE	TIPO DE CORRIENTE	Rangos de Velocidad			Capacidad de proceso Cp	Centramiento de proceso Cpk		Periodo de actualizacion		
					MIN LIE (mm/min)	MAX LSE (mm/min)	NOM Tgt (mm/min)				01-ago	28-jul 01-jul	
1	WPS - INSTRUMENTAL - 01	M1.01	1	DC +	150,0	180,0	165	1,96	0,61	Ingresar datos	28-jul 01-jul	×	
2		M1.02	2	DC +	180,0	210,0	195	1,35	0,05			×	
3		M1.03	3	DC +	180,0	210,0	195	1,38	0,35			×	
4		M1.04	4	DC +	180,0	210,0	195	1,61	1,05			!	
5	WPS - INSTRUMENTAL - 02	M1.05	1	DC +	150,0	180,0	165	1,83	0,53	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
6		M1.06	2	DC +	180,0	210,0	195	1,96	1,15			!	
7	WPS - INSTRUMENTAL - 03	M1.07	1	DC +	150,0	180,0	165	1,79	0,58	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
8		M1.08	2	DC +			0	0,00	0,00			×	
9	WPS - INSTRUMENTAL - 04	M1.09	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
10		M1.10	2	DC +								×	
11	WPS - INSTRUMENTAL - 05	M1.11	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
12		M1.12	2	DC +			0	0,00	0,00			×	
13	WPS - INSTRUMENTAL - 06	M1.13	1	DC +			0	0,00	0,00	Ingresar	28-jul 01-jul	×	
14		M1.14	2	DC +			0	0,00	0,00			×	

Figura 4. 23. Pantalla estatus del Cp y Cpk, por cada cordón de soldadura. (Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

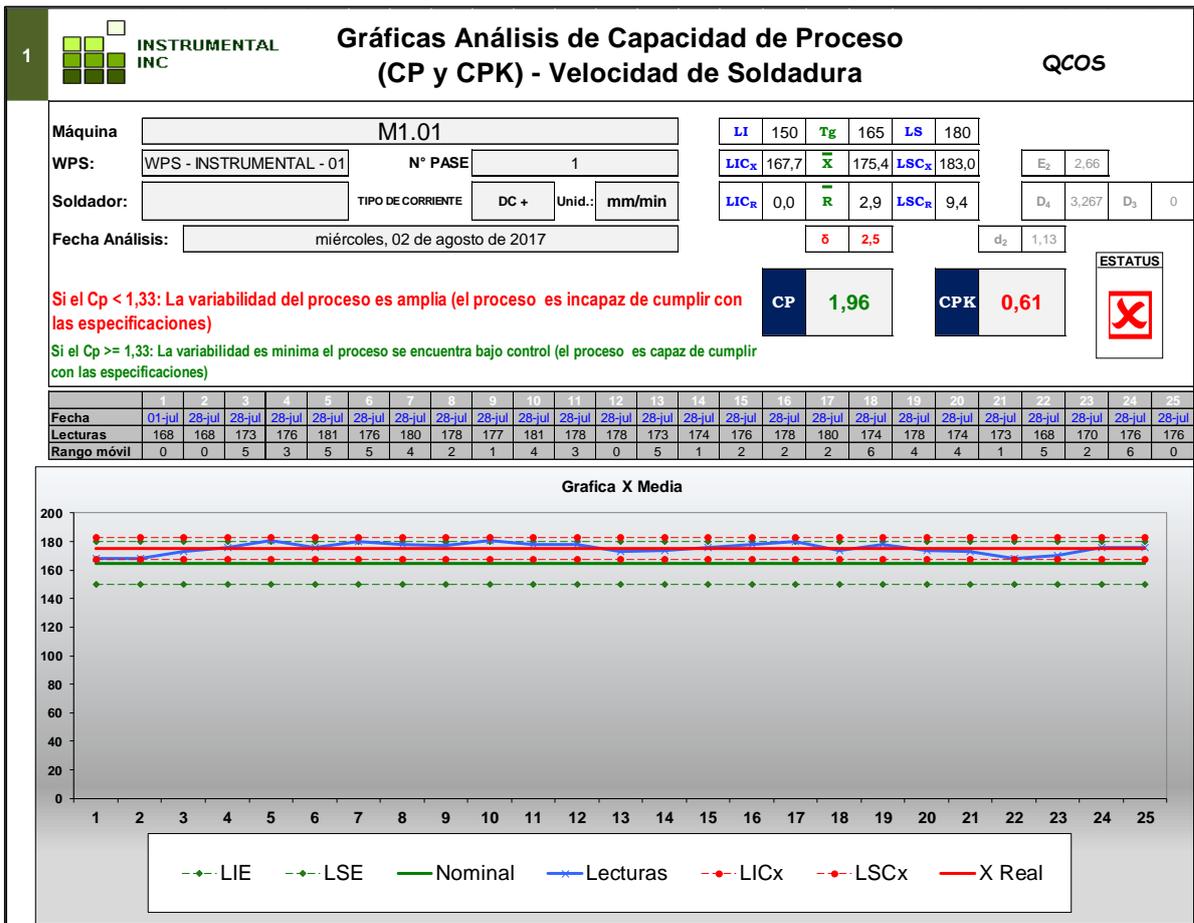


Figura 4. 24. Gráfica de control de velocidad del primer pase del WPS 01.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

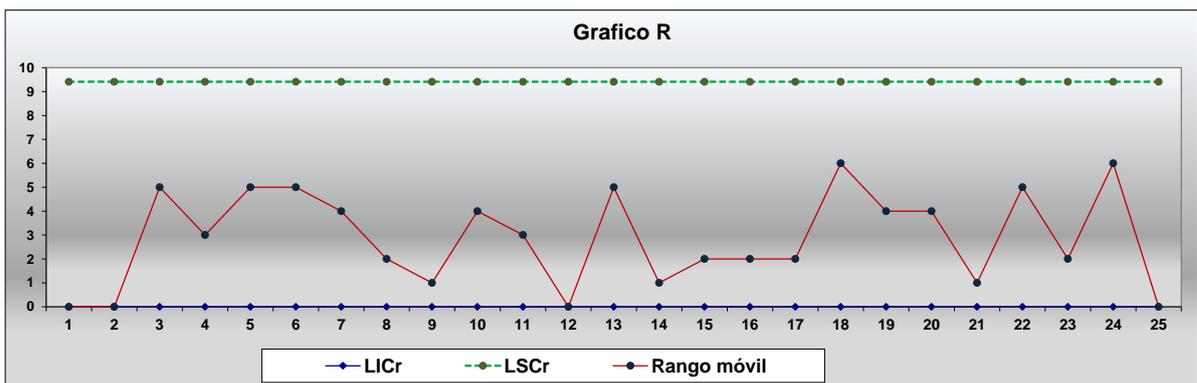


Figura 4. 25. Gráfica de rangos de velocidad del primer pase.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

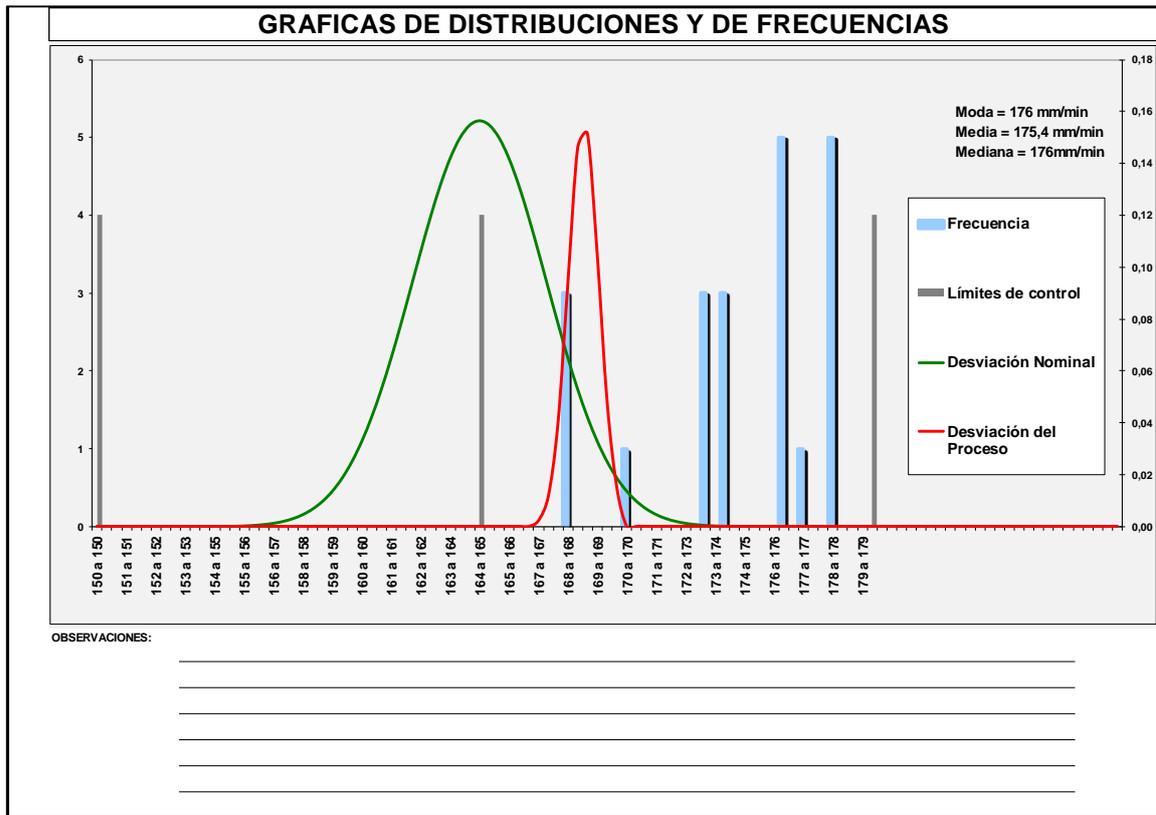


Figura 4. 26. Grafica de distribución de frecuencias de Velocidad del primer pase.
 (Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.3.4. Cálculo del 6 sigma del proceso de soldadura.

Para la verificación del producto final se procede con el cálculo del nivel sigma del proceso, el cual indica tanto el número de unidades inspeccionadas al final del proceso, el porcentaje de defectos y rendimiento del proceso el cual permite saber la probabilidad de que el producto sea conforme.

Con el nivel sigma del proceso se puede conocer la equivalencia del número de defectos por millón de unidades producidas y el nivel en que el proceso se encuentra.

Cabe mencionar que para el cálculo del nivel sigma se implementó una base de datos en la cual se deben ingresar los datos de las unidades inspeccionadas del lote o muestra según la norma NTE INEN ISO 2859 – 1: 2009 cuando son varias unidades o al 100% si son proyectos, y el número de defectos encontrados en el mismo para saber en las condiciones que se fabrican las unidades y la probabilidad de encontrar defectos en las mismas.

CÁLCULO DEL SEIS SIGMA DEL PROCESO DE SOLDADURA																											
Calculo del nivel sigma del proceso. Productos Conformes/No conformes																											
1. Número de unidades procesadas (Estructuras fabricadas) N=	100	Datos a introducir 1. Número de unidades procesadas: Número de unidades que se ha procesado en el periodo estudiado. 2. Porcentaje de posibilidades de encontrar el defecto: Porcentaje de productos que se han medido o verificado para detectar si son conformes o no (si verifican todos los productos, introducir O=100%). 3. Número de defectos detectados en las mediciones o verificaciones que se han hecho.																									
2. Porcentaje de posibilidades de encontrar el defecto (O) (% de estructuras a inspeccionar del lote)	100%																										
3. Número de defectos detectados (Estructuras con defectos) D=	1																										
4. Porcentaje de Defectos DPU=D/(NxO)	1,0%	Resultados 4. El Porcentaje de defectos (o Defectos por Unidad, DPU) nos indica las probabilidades de que el producto salga defectuoso. 5. Productividad (o Rendimiento del proceso) , nos marca las probabilidades de que el producto salga conforme. 6. Nivel de calidad sigma del proceso Indica el número de desviaciones típicas que el proceso puede aceptar para que el producto sea conforme. 7. DPMO: Indica los defectos por millón de unidades producidas, lo ideal es llegar a 3,4.																									
5. Productividad o rendimiento del proceso =(1-DPU)x100	99,000%																										
6. Nivel sigma del proceso =	3,83																										
7. Equivalencia en defectos por millón de oportunidades DPMO =	9949,98																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">NIVEL EN SIGMA</th> <th style="text-align: center;">DPMO</th> <th style="text-align: center;">RENDIMIENTO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">6</td><td style="text-align: center;">3.40</td><td style="text-align: center;">99.9997 %</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">233.00</td><td style="text-align: center;">99.98 %</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">6.210,00</td><td style="text-align: center;">99.3 %</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">66.807,00</td><td style="text-align: center;">93.3 %</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">308.537,00</td><td style="text-align: center;">69.15 %</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">690.000,00</td><td style="text-align: center;">30.85 %</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">933.200,00</td><td style="text-align: center;">6.68 %</td></tr> </tbody> </table>				NIVEL EN SIGMA	DPMO	RENDIMIENTO	6	3.40	99.9997 %	5	233.00	99.98 %	4	6.210,00	99.3 %	3	66.807,00	93.3 %	2	308.537,00	69.15 %	1	690.000,00	30.85 %	0	933.200,00	6.68 %
NIVEL EN SIGMA	DPMO			RENDIMIENTO																							
6	3.40			99.9997 %																							
5	233.00	99.98 %																									
4	6.210,00	99.3 %																									
3	66.807,00	93.3 %																									
2	308.537,00	69.15 %																									
1	690.000,00	30.85 %																									
0	933.200,00	6.68 %																									
<p>Nota: No confundir el nivel sigma del proceso con la desviación típica (S).</p> <p>Hay en muchos sitios donde designan a la desviación típica (o estándar) con la letra sigma, por eso hay que recalcar que no son lo mismo.</p>																											
<p>Cálculo del nivel de calidad sigma del proceso.</p> <p>Seis sigma un proceso de negocios que permite a las compañías mejorar drásticamente los resultados finales, diseñando y controlando las actividades diarias, de manera de minimizar los desperdicios y el uso de los recursos mientras se mejora la satisfacción del cliente.</p> <p>El término "sigma", corresponde al uso de la letra del alfabeto Griego (σ), que se utiliza comúnmente para definir la variabilidad de un proceso. Un nivel de calidad "sigma", indica cuan frecuentemente es esperable que ocurran defectos. A mayor nivel de "sigma", menor es la posibilidad de generación de los mismos. Un nivel de calidad "6 sigma", equivale a 3,4 defectos por millón de oportunidades.</p> <p>El primer paso fundamental en "6 sigma" es definir claramente que es lo que el cliente quiere, en requerimientos explícitos. Llamaremos a estos requerimientos "características críticas de calidad".</p> <p>El próximo paso será establecer la probabilidad de defectos o fallas que ocurren con relación a estas características.</p> <p>Una forma de hacerlo es a través de los métodos estadísticos clásicos, por ejemplo un proceso 6 sigma tendrá un Cp=2. Es decir, cuando el mismo está centrado, si se toma la distancia entre la media muestral y los límites de la especificación, esto dará 6 desviaciones estándar (habitualmente identificadas con la letra griega sigma).</p> <p>El nivel "sigma" de calidad es también frecuentemente expresado en defectos por millón de oportunidades (DPMO). Se muestra a continuación una tabla de conversión simplificada.</p>																											

Figura 4. 27. Base de cálculo para el nivel sigma del proceso de soldadura.
(Fuente: Documentación de INSTRUMENTAL INC)

4.4. Ensayos y verificación de la soldadura

Mediante la implementación del control de calidad en el proceso y la implementación del control estadístico de las tres variables principales de soldadura, se obtiene un producto soldado con un mejor acabado y un cordón sin discontinuidades, para lo cual se realizó los ensayos metalográficos respectivos en los cuales se pueden observar las el tamaño y estructura de los materiales soldados.

4.4.1. Macrografías de la estructura

Luego del análisis estadístico se tomó como referencia siete probetas para el análisis macrográfico tal como indica el siguiente cuadro:

Tabla 4. 3. Tipos de probetas para el análisis macrográfico.

Item	Probeta	Tipo de Unión
1	BO -1	Brida (35 mm) – Octógono (12 mm)
2	BO - 2	Brida (20 mm) – Octógono (10 mm)
3	BO - 3	Brida (20 mm) – Octógono (10 mm)
4	BO - 4	Brida (20 mm) – Octógono (10 mm)
5	BO - 5	Brida (20 mm) – Octógono (10 mm)
6	Oc - 1	Octógono (10 mm) – Octógono (10 mm)
7	Oc - 2	Octógono (10 mm) – Octógono (10 mm)

(Fuente: Propiedad del autor)

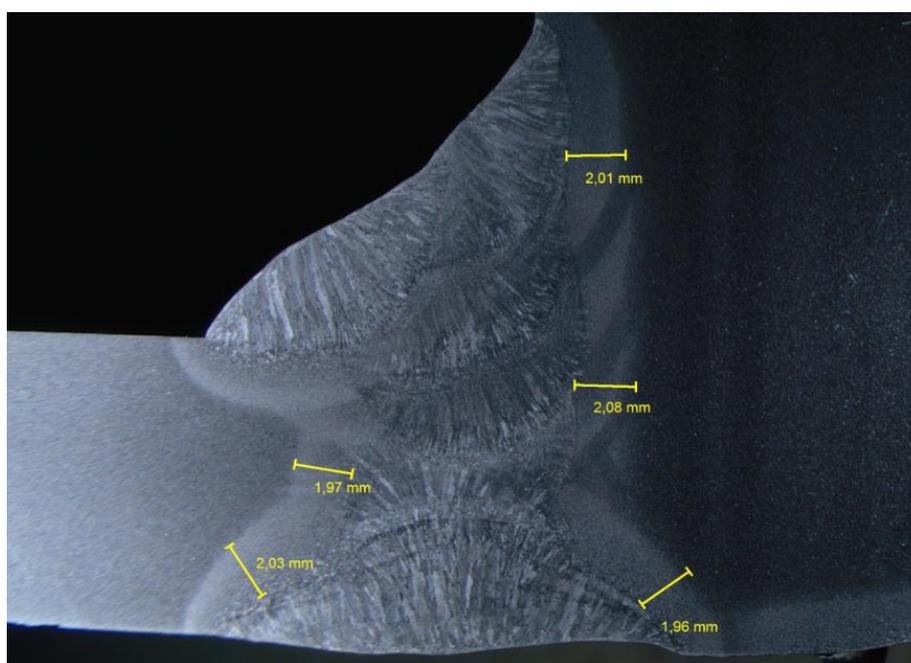


Figura 4. 28. Macrografía de la probeta BO-1.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

En la figura de la probeta BO – 1 se puede observar que la zona afectada por el calor es más uniforme en sentido transversal teniendo un promedio de 2 mm de ancho, no presenta discontinuidades, la penetración es completa y presenta un excelente acabado.

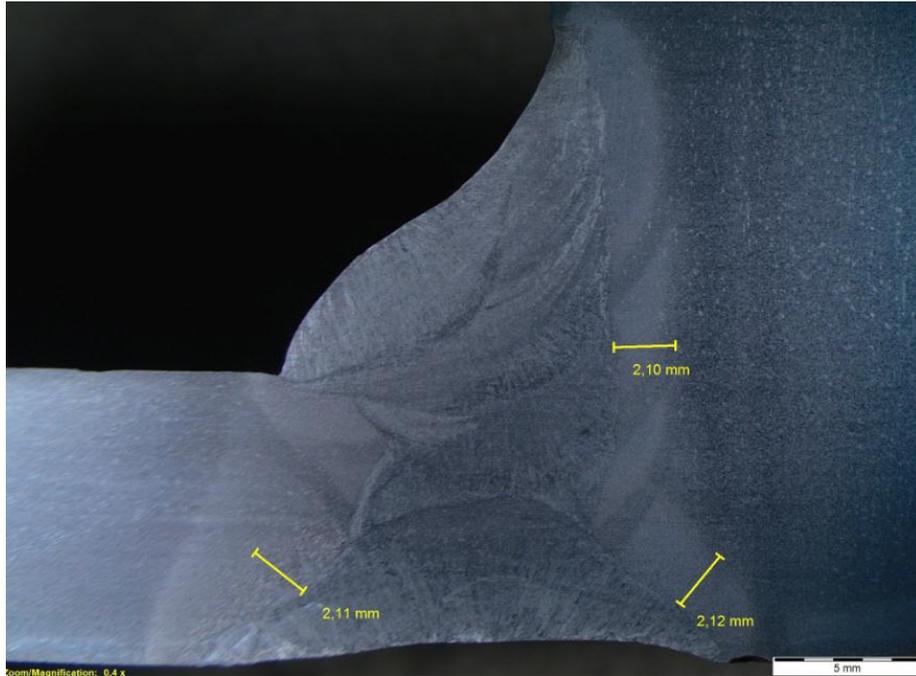


Figura 4. 29. Macrografía de la probeta BO-2.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

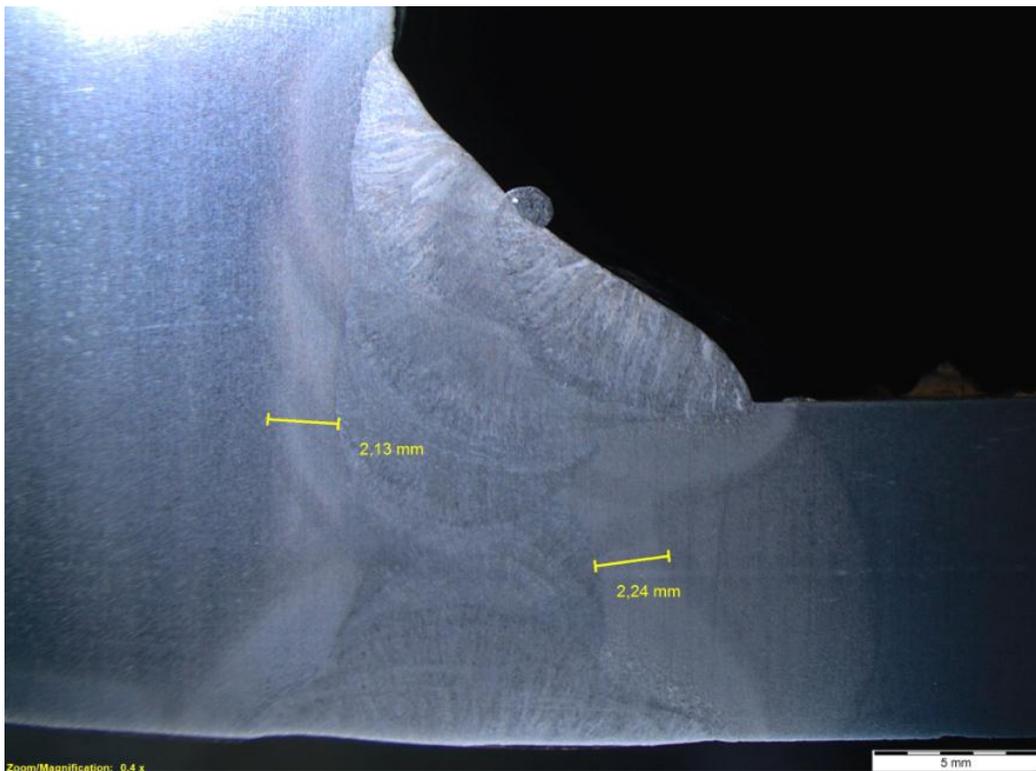


Figura 4. 30. Macrografía de la probeta BO-3.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

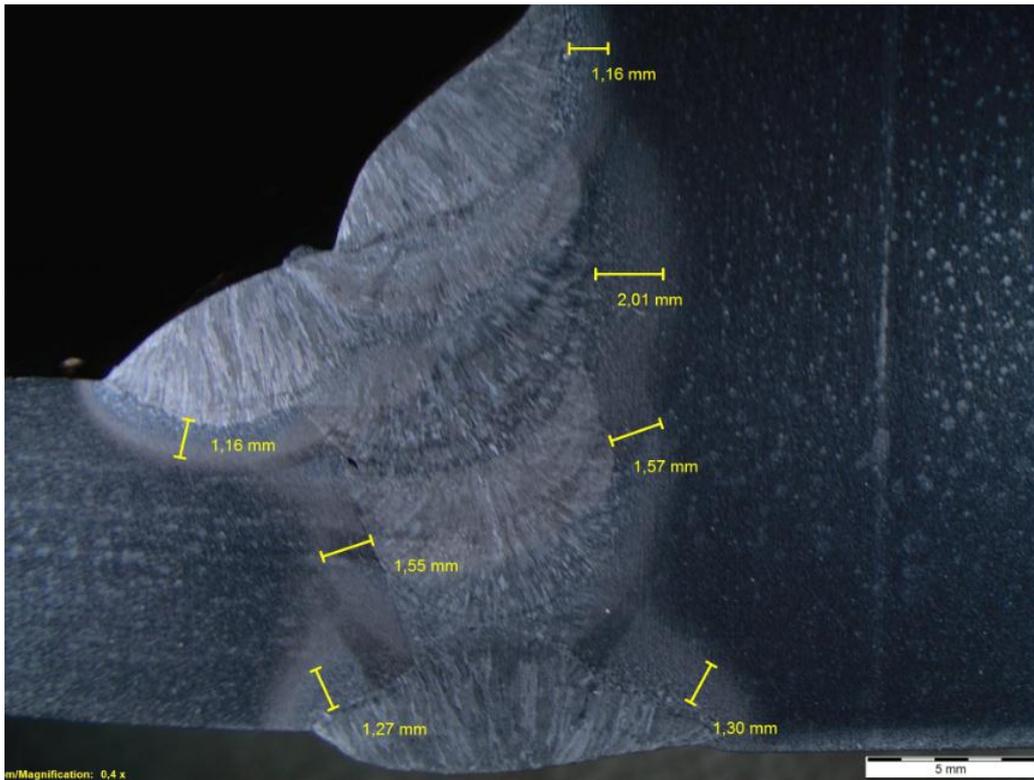


Figura 4. 31. Macrografía de la probeta BO-4.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

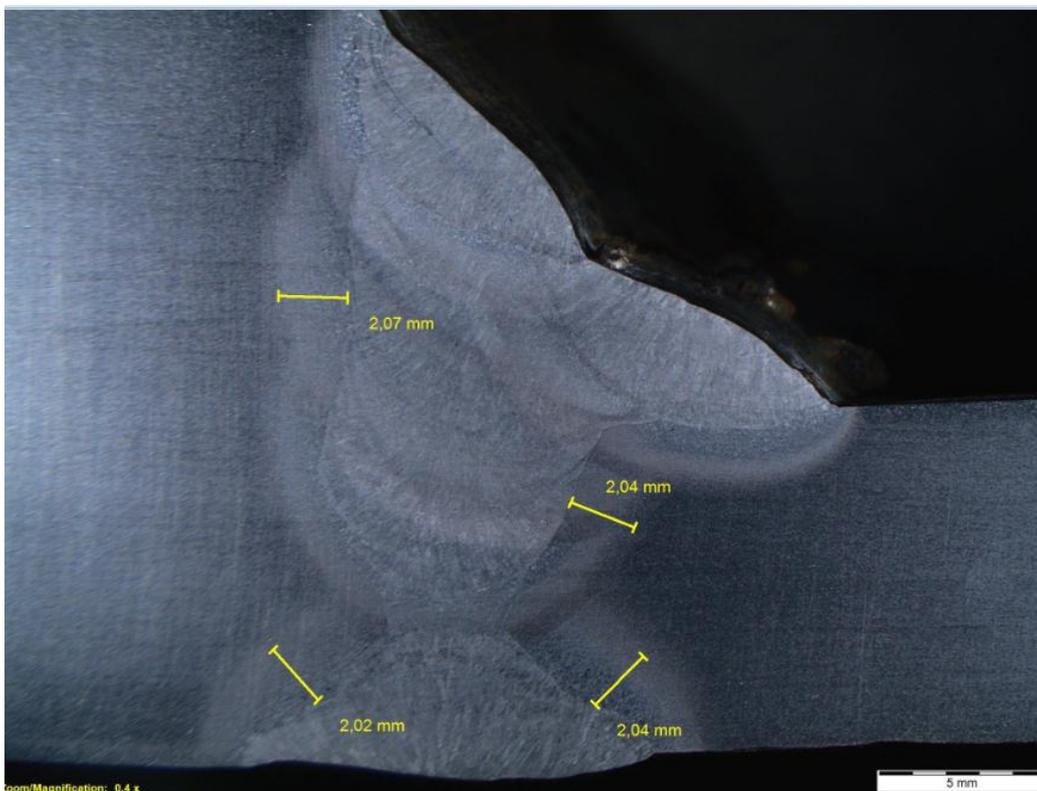


Figura 4. 32. Macrografía de la probeta BO-5.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

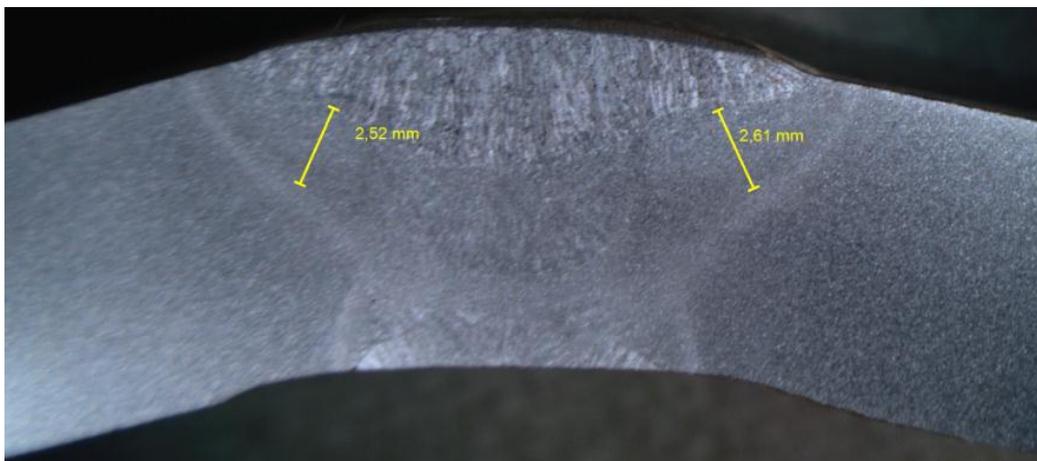


Figura 4. 33. Macrografía de la probeta OC-1.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

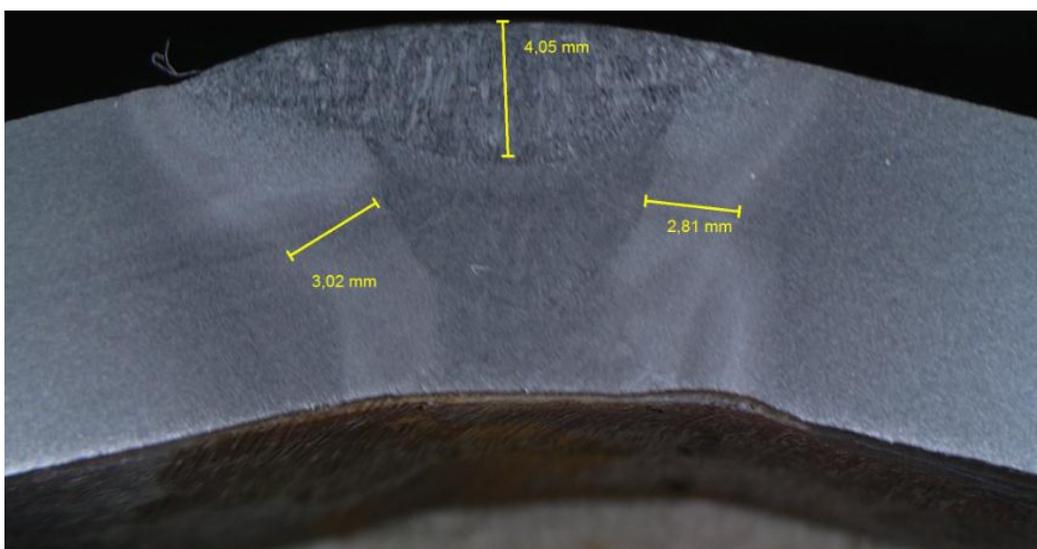


Figura 4. 34. Macrografía de la probeta OC-2.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

Las probetas fueron soldadas en las condiciones normales de fabricación y con las mejoras implementadas. En las macrografías de las probetas mencionadas se puede observar una soldadura homogénea y uniforme en el corte transversal, se verifica ausencia de defectos, y una zona afectada por el calor definida.

4.4.2. Micrografías de la estructura

Para un análisis más exhaustivo se realizó un análisis de micrografía en las tres probetas más significativa con mayor grado de criticidad que es la unión Brida – Octógono, y la unión Octógono – Octógono, las cuales muestran una estructura estable y carecen de defectos

microscópicos, a continuación se puede observar las diferentes estructuras en cada zona de la probeta:

Unión Octógono – Octógono:

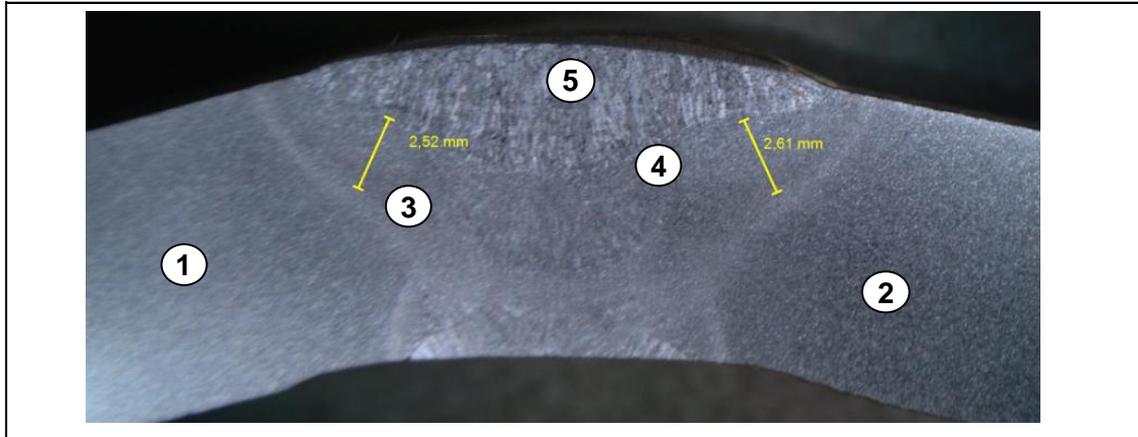


Figura 4. 35. Zonas de análisis micrográfico de la probeta unión Octógono - Octógono.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

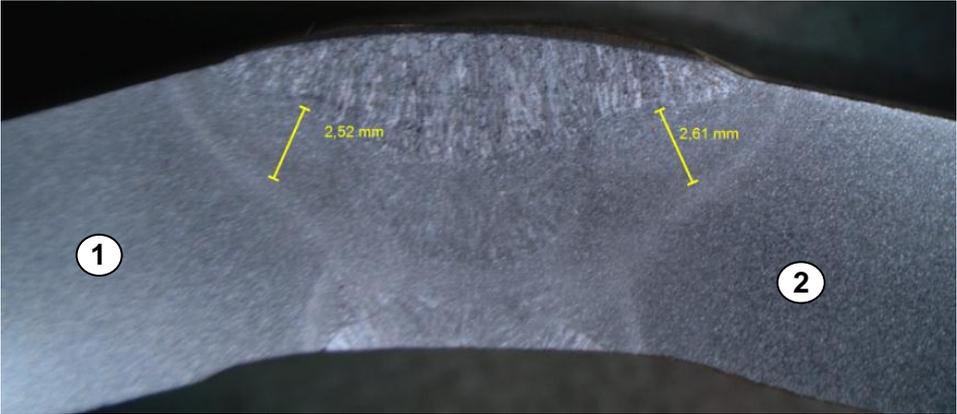
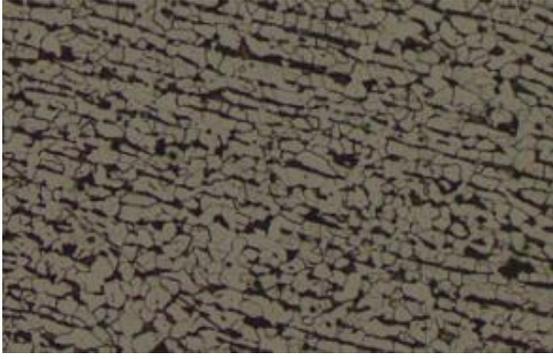
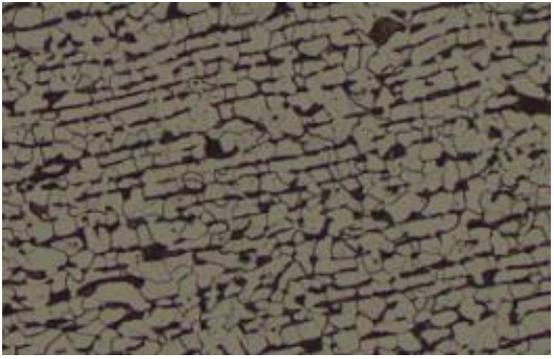
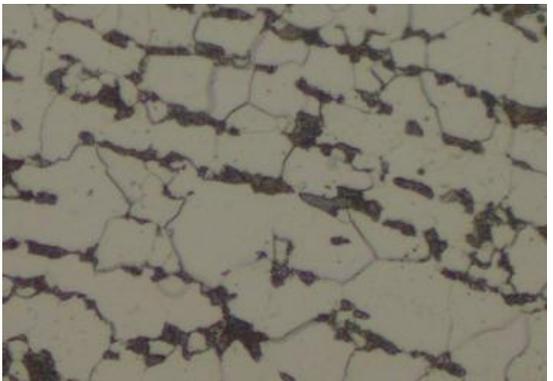
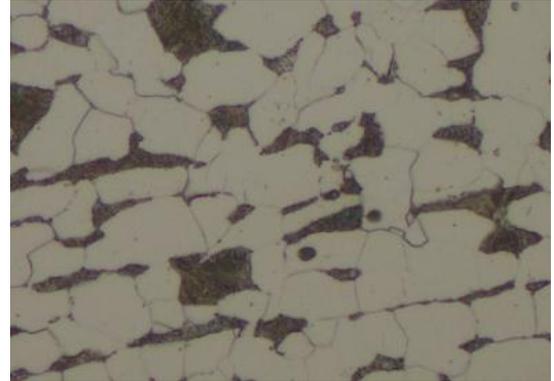
			
1.	Metal Base 1 (100 X)	2.	Metal Base 2 (100 X)
			
Metal Base 1 (500 X)		Metal Base 2 (500 X)	
			
Acero A572 Gr 50, Ferrítico - Perlítico		Acero A572 Gr 50, Ferrítico - Perlítico	

Figura 4. 36. Micrografías de los metales base.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

En la zona del metal base se puede observar ambos aceros a pesar de ser del mismo tipo tienen una pequeña diferencia del tamaño de grano pero en ambos casos son aceros Ferríticos – Perlíticos ya que su contenido de carbono no supera el 0,76%.

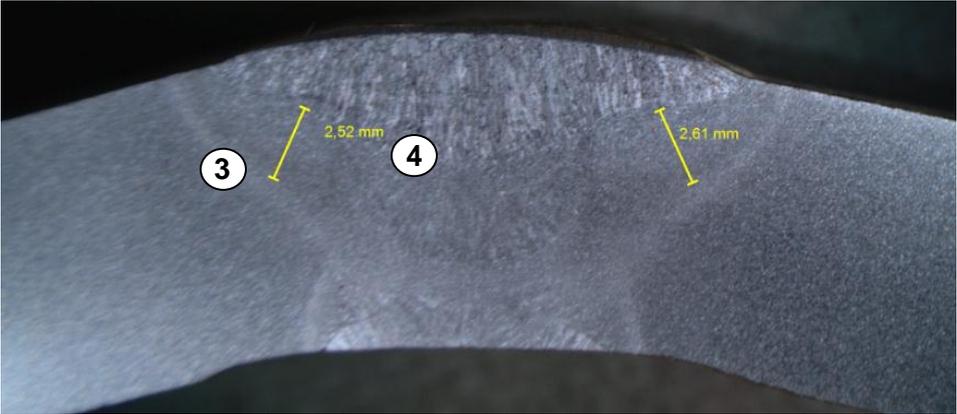
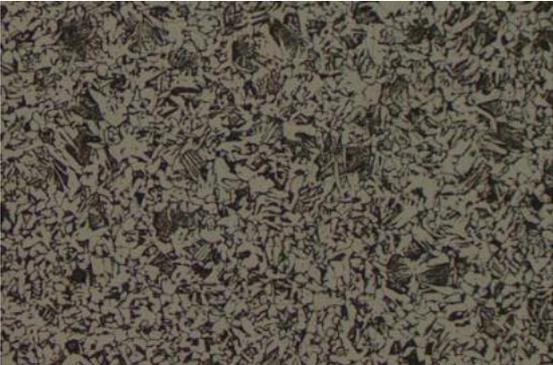
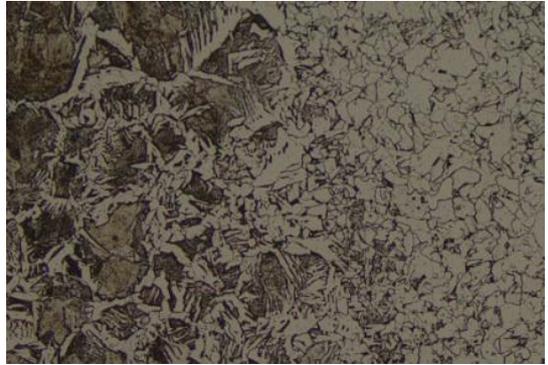
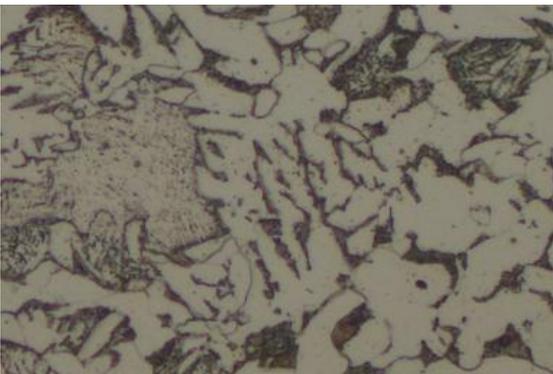
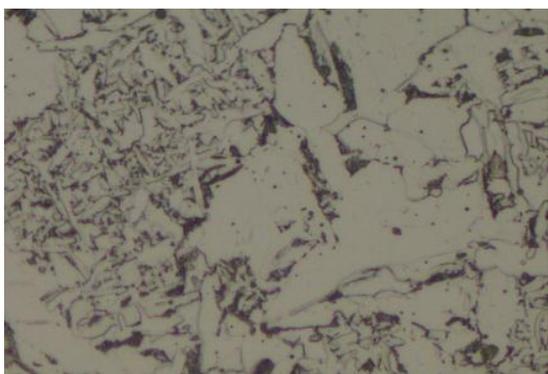
	
3. Interface ZAC Metal Base (100 X)	4. Interface ZAC Soldadura (100 X)
	
Interface ZAC Metal Base (500 X)	Interface ZAC Soldadura (500 X)
	
Descomposición de Perlita	Descomposición de Perlita y Ferrita

Figura 4. 37. Micrografía de la interface del metal base, ZAC y soldadura
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

En las micrografías de la interface de la zona afectada por el calor y el metal base se puede observar que existe un crecimiento de grano con zonas de descomposición de Perlita, es decir que los átomos de carbono se desplazan por acción del calor, mientras que en la

interface entre la Zona afectada por el calor y el metal de aporte existe una estructura con descomposición de perlita y ferrita con un crecimiento acicular en la zona de soldadura.

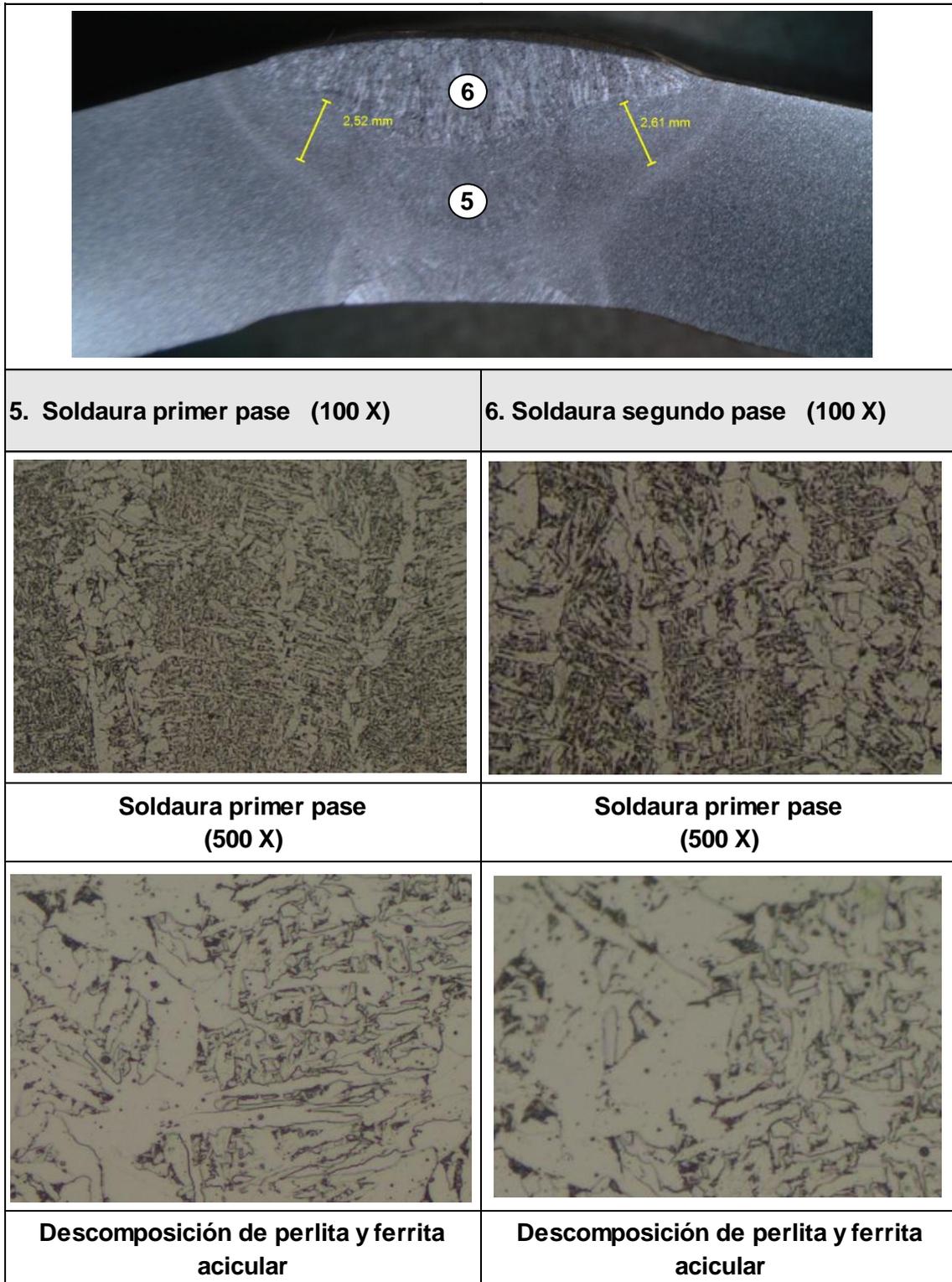


Figura 4. 38. Micrografía de la soldadura.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

Unión Brida – Octógono

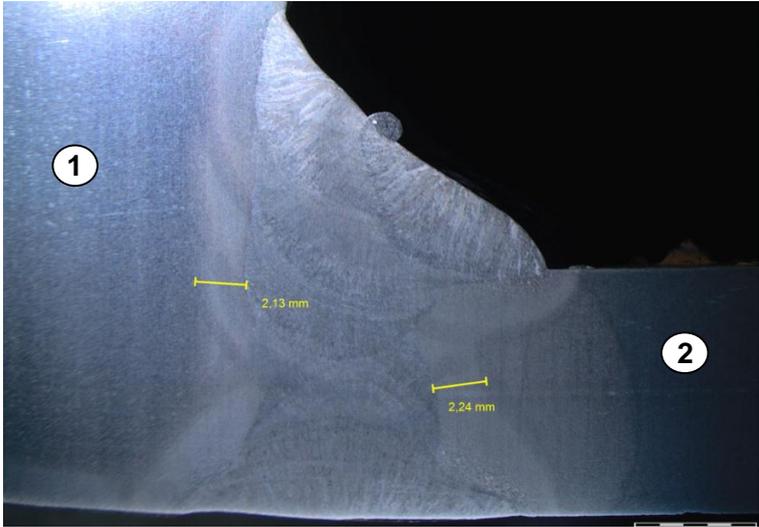
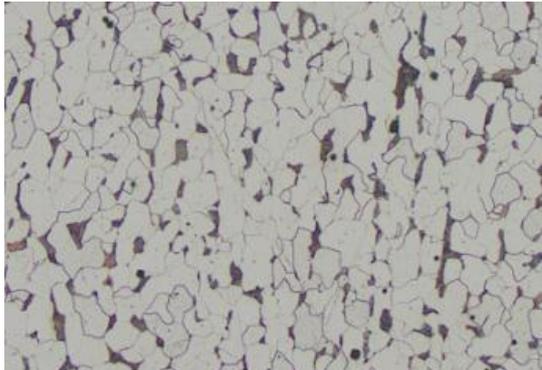
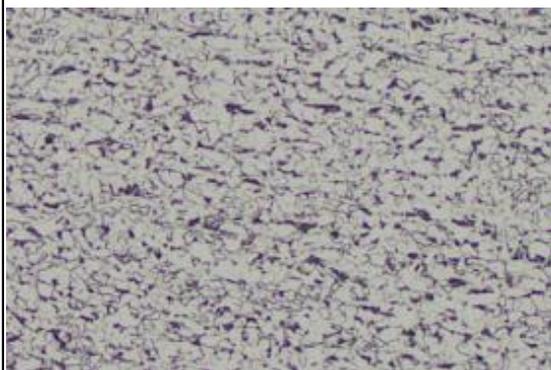
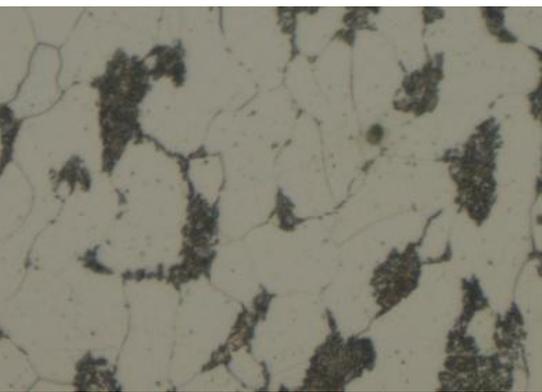
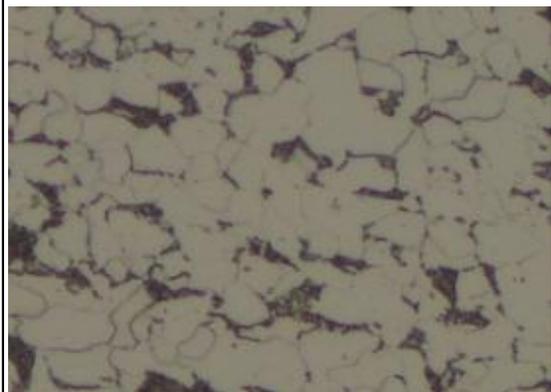
	
1. Metal base - brida (100 X)	2. Metal base - octógono (100 X)
	
Metal base - brida (500 X)	Metal base - octógono (500 X)
	
Acero A572 Gr 50, Ferrítico - Perlitico	Acero A572 Gr 50, Ferrítico - Perlitico

Figura 4. 39. Micrografías de los metales base.
 (Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

El tamaño de grano del metal de la brida y octógono varían a causa del conformado por el proceso de fabricación de dichos materiales, pero las propiedades mecánicas y químicas son muy similares.

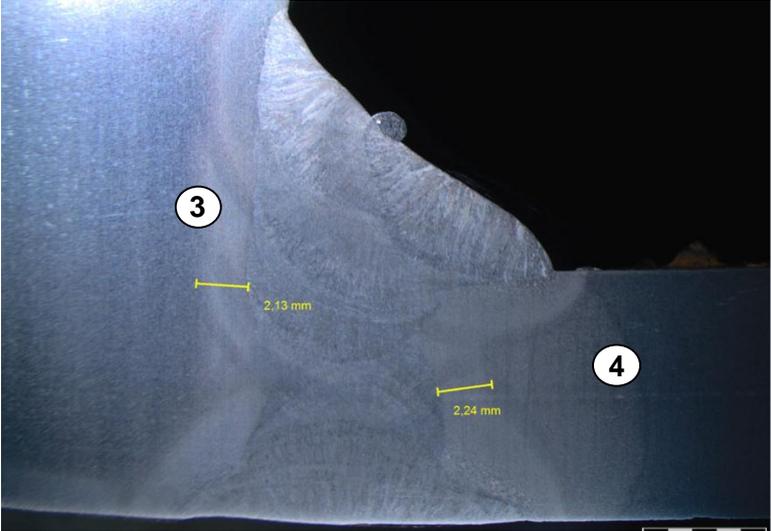
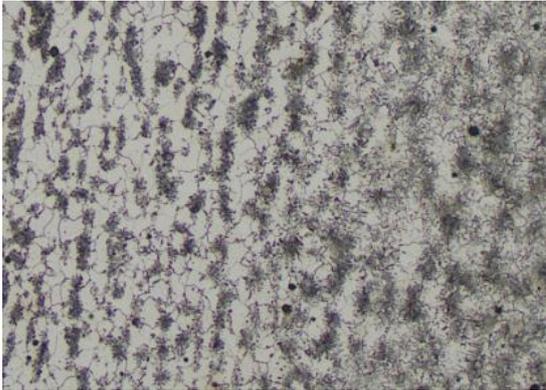
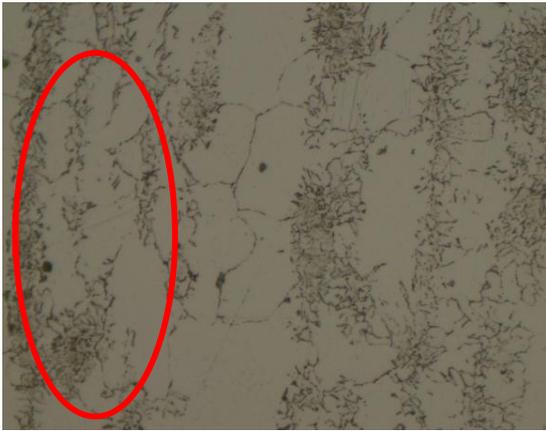
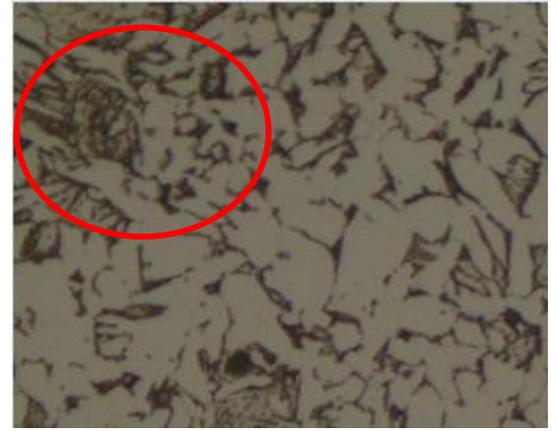
	
3. Interface metal base ZAC - brida (100 X)	4. Interface metal base ZAC - octógono (100 X)
	
Interface metal base ZAC - brida (500 X)	Interface metal base ZAC - octógono (500 X)
	
Zonas de descomposición de Perlita	Zonas de descomposición de Perlita

Figura 4. 40. Interface zona afectada por calor - Metal base (brida y octógono).
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

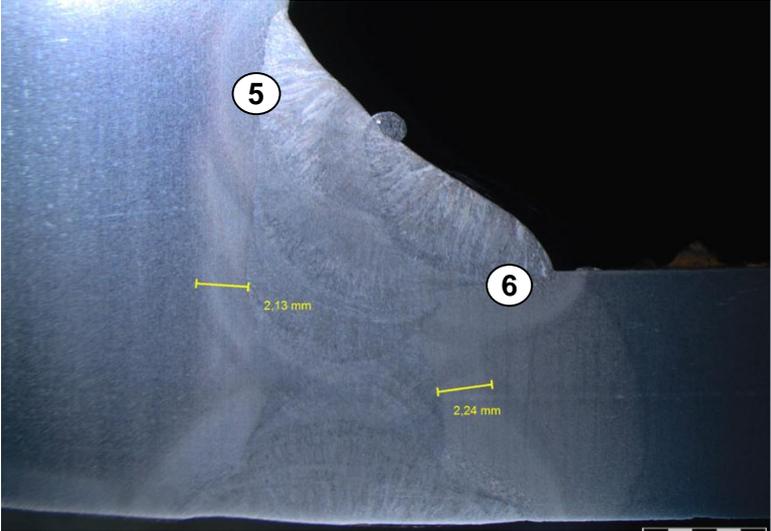
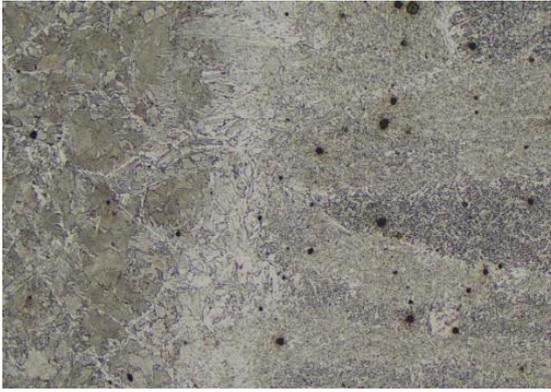
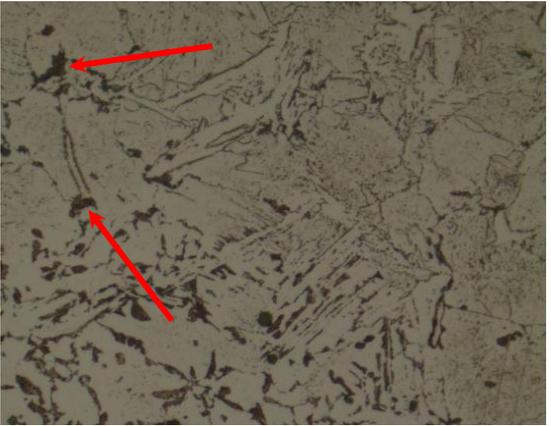
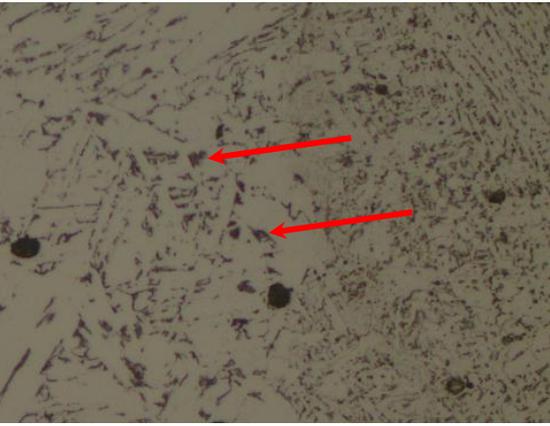
	
5. Interface ZAC brida - Soldadura (100 X)	6. Interface ZAC octógono - Soldadura (100 X)
	
Interface ZAC brida - Soldadura (500 X)	Interface ZAC Octógono - Soldadura (500 X)
	
Zonas de descomposición de Ferrita y Perlita	Zonas de descomposición de Ferrita y Perlita

Figura 4. 41. Interface zona afectada por calor (brida - octógono) y Soldadura.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

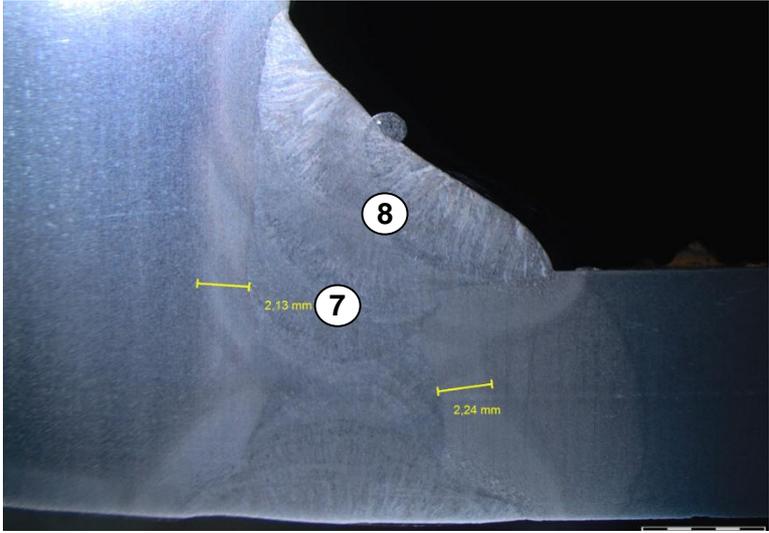
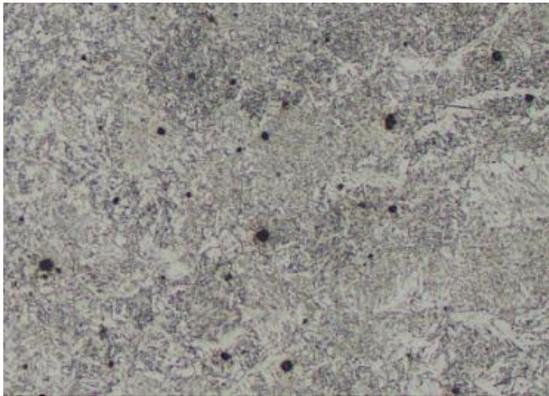
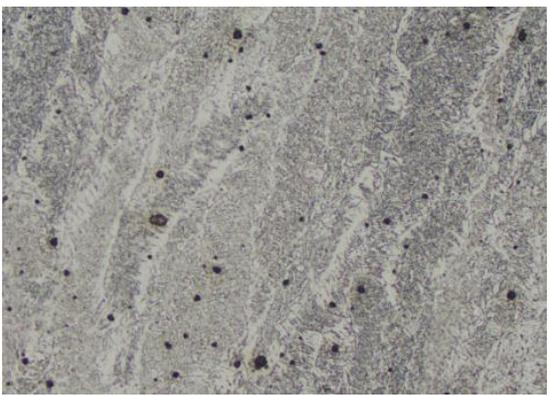
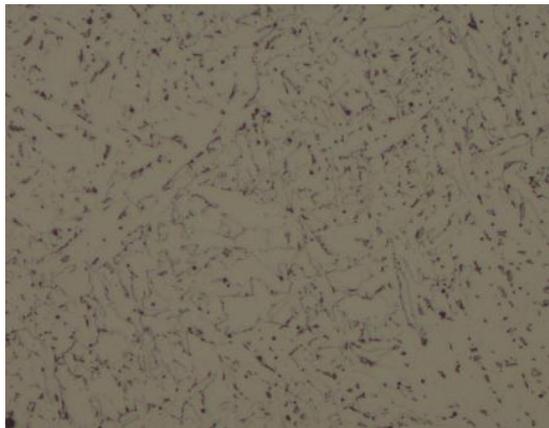
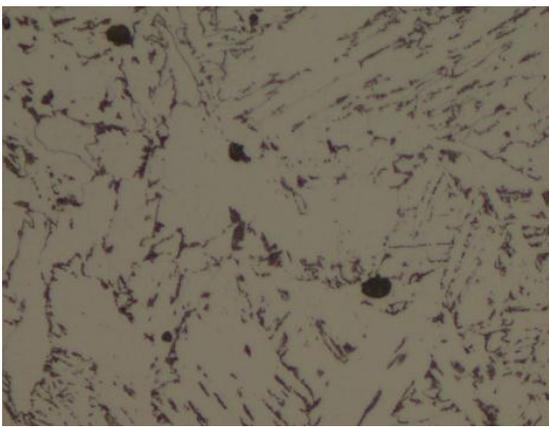
	
7. Soldadura primer pase (100 X)	8. Soldadura segundo pase (100 X)
	
Soldadura primer pase (500 X)	Soldadura segundo pase (500 X)
	
Descomposición de perlita y ferrita acicular	Descomposición de perlita y ferrita acicular

Figura 4. 42. Micrografía de la soldadura.
(Fuente: Laboratorio de ensayos metalográficos)

Como se puede observar en los análisis metalográficos, las estructuras son bastante estables y las zonas de interface presentan uniformidad en la estructura, cabe mencionar que no existe micro poros ni defectos microscópicos.

4.4.3. Radiografías de la estructura

El ensayo radiográfico permite verificar si existen defectos a lo largo del cordón de soldadura, por lo cual se realizaron los respectivos ensayos en la unión Octógono – Octógono y Brida – Octógono, a continuación se muestran las imágenes de las radiografías respectivas.

- a) Soldadura unión Octógono – Octógono proceso FCAW, espesor de placa 10 mm.

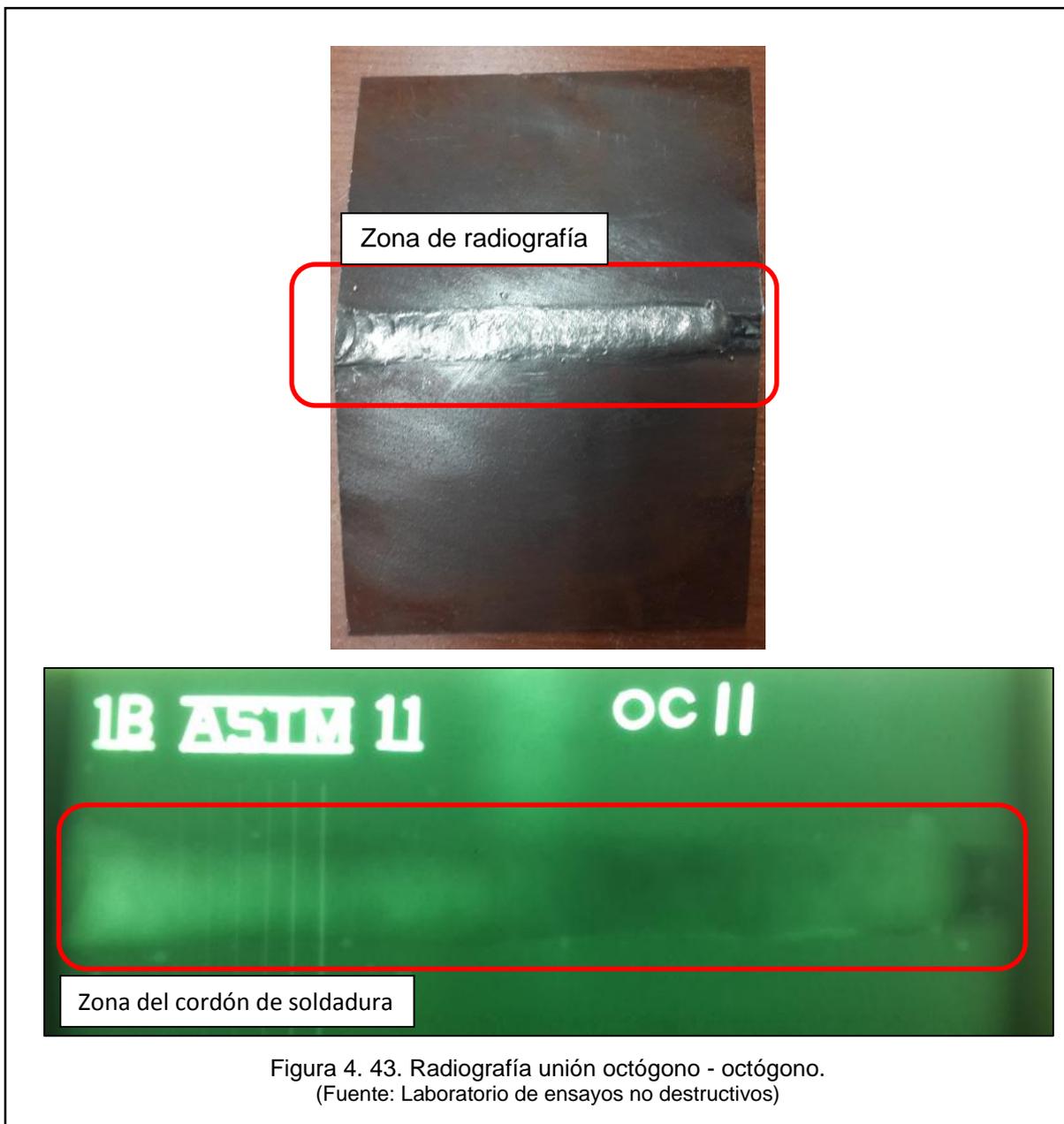


Figura 4. 43. Radiografía unión octógono - octógono.
(Fuente: Laboratorio de ensayos no destructivos)

La radiografía se realizó en base al patrón 1B de la norma ASTM, el cordón de soldadura es continuo y no presenta defectos tales como porosidades o inclusiones de escoria en el proceso FCAW.

- b) Soldadura unión Brida – Octógono proceso FCAW, espesor de placa para brida 35 mm, espesor del octógono 10 mm.

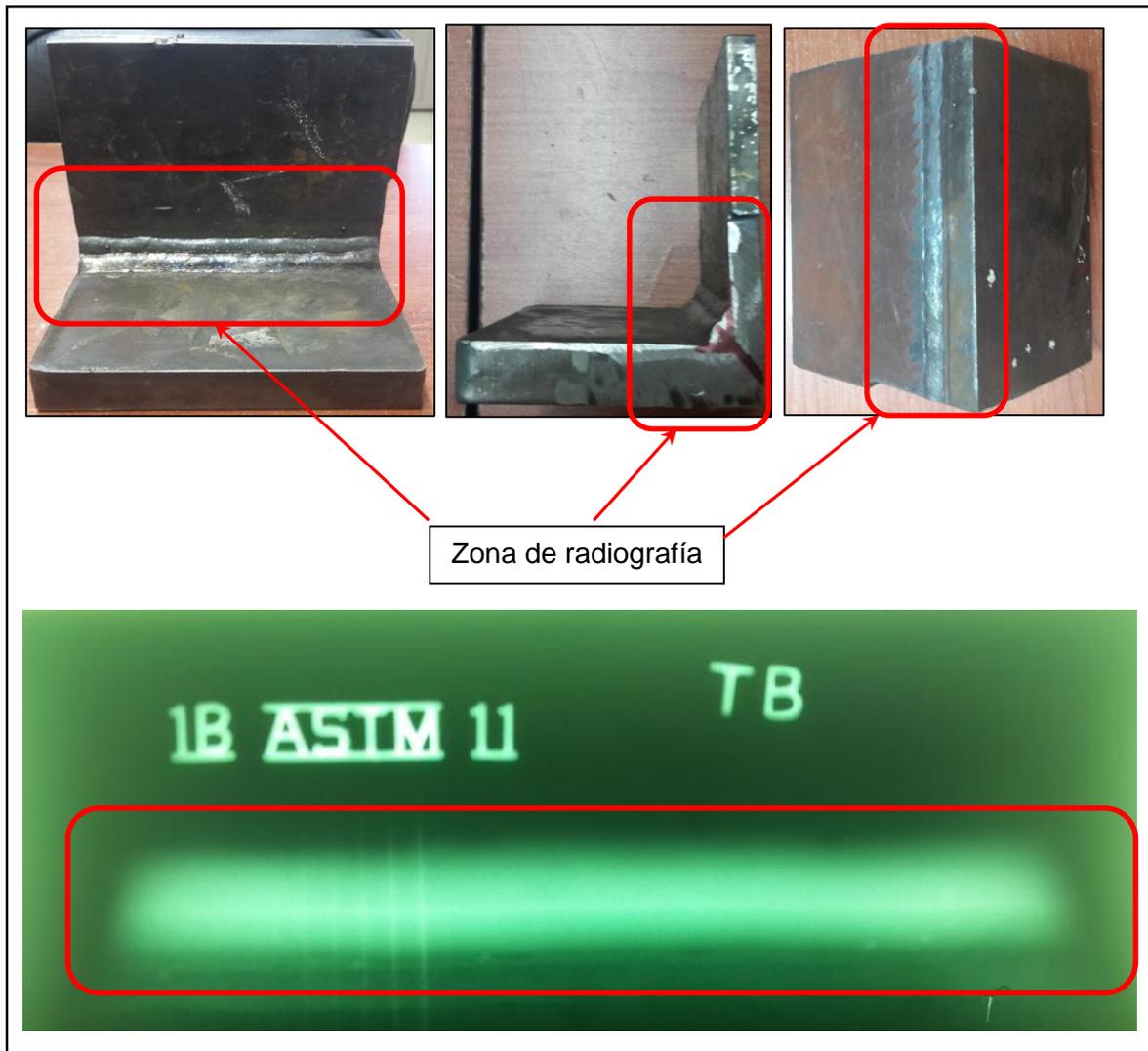


Figura 4. 44. Radiografía unión Brida - Octógono.
(Fuente: Laboratorio de ensayos no destructivos)

La radiografía se realizó en base al patrón 1B de la norma ASTM, el cordón de soldadura es continuo y no presenta defectos tales como porosidades o inclusiones de escoria u otras discontinuidades en el proceso FCAW.

4.4.4. Ensayos destructivos

Para la verificación de la resistencia de la unión soldada se realizaron ensayos de doblado de cara y raíz en las uniones Octógono – Octógono y de Neak brake en la unión Brida – Octógono.

- a) Doblado de cara unión Octógono – Octógono



Figura 4. 45. Doblado de cara de la unión Octógono - Octógono.
(Fuente: Laboratorio de ensayos no destructivos)

En el ensayo de doblado de cara de la unión se puede observar una soldadura continua con ausencia de defectos o fallas en el material con una muy buena apariencia en el cordón.

b) Doblado de raíz unión Octógono – Octógono

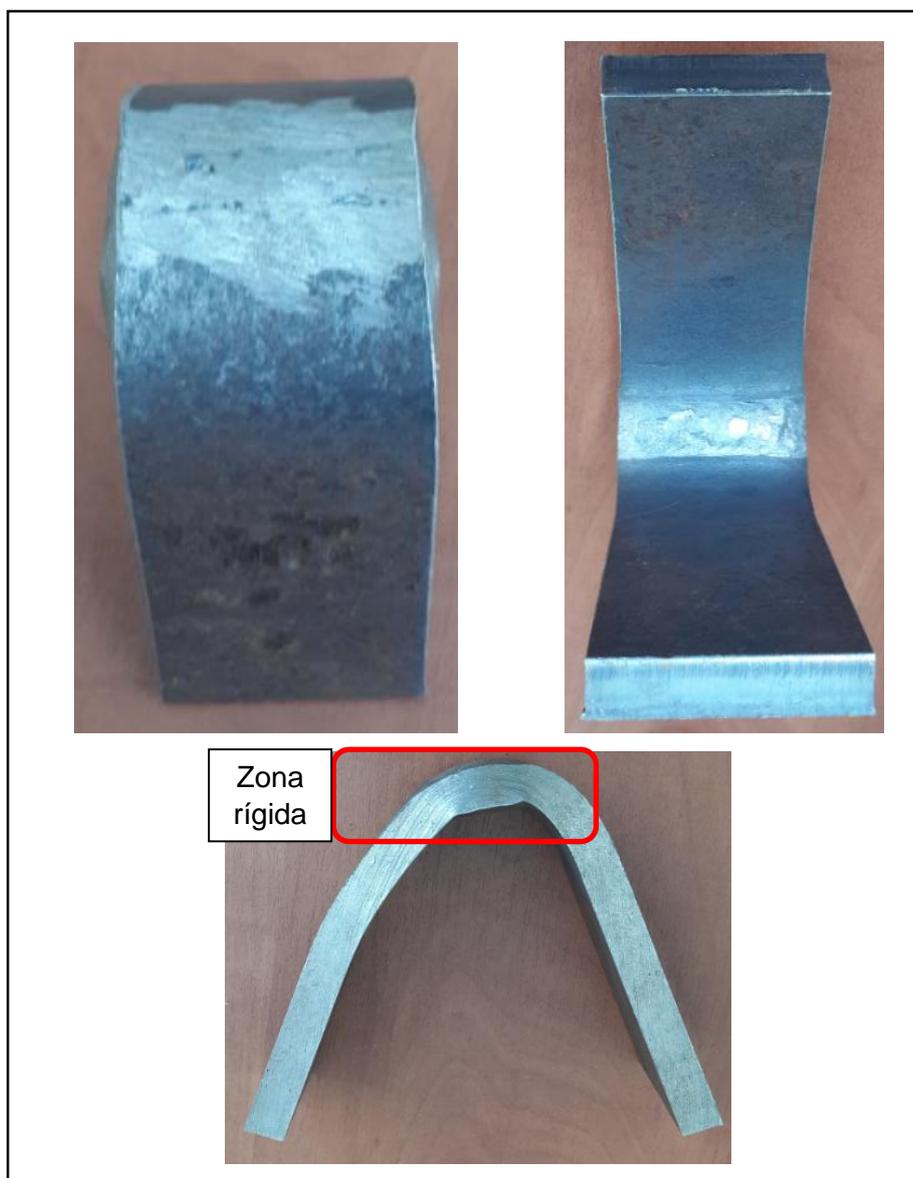


Figura 4. 46. Doblado de raíz de la unión Octógono – Octógono.
(Fuente: Laboratorio de ensayos no destructivos)

En el doblado de raíz se puede observar que la junta presenta una zona más rígida debido al diseño propio de la junta, la unión mencionada no presenta defectos ni zonas de falla crítica o discontinuidades, por lo cual es totalmente aceptada mediante la norma AWS D1.1.

c) Unión Brida – Octógono

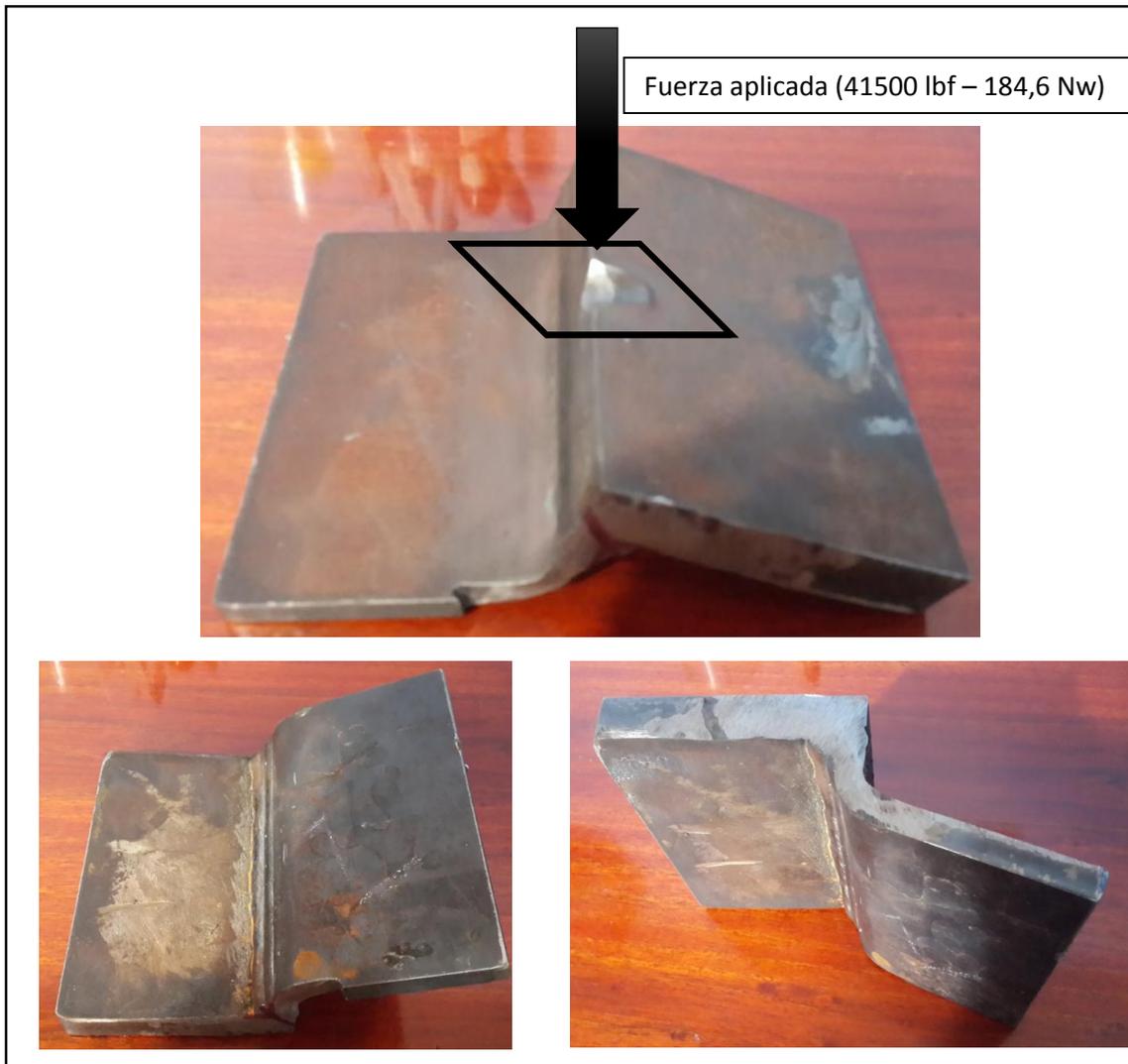


Figura 4. 47. Doblado de cara externa de la unión Brida – Octógono.
(Fuente: Laboratorio de ensayos no destructivos)

Como se puede observar en el ensayo de compresión de la junta, el cordón de soldadura es resistente a la tracción en la parte externa de la probeta, ya que se aplicó 41500 lbs (184,6 Nw) sobre el área de soldadura de 0,775 in² (500 mm²) lo que genera un esfuerzo de 53,5 KSI que es mayor al límite de fluencia del material (45 KSI) de tal manera que el material se deforma pero no sufre fractura alguna, ni se observan discontinuidades que generen que la unión falle, la resistencia a la tracción de la soldadura (70 KSI) es mayor a la resistencia del metal base (65 KSI, 450 MPa) por lo que el cordón permanece intacto.

El control estadístico en el proceso de soldadura permite garantizar que la unión rígida de la estructura no tenga defectos visuales y defectos internos, en caso de que los hubiera, dicho control permite encontrar con facilidad la variable en la cual se debe trabajar con el respectivo plan de acción para evitar los defectos de soldadura.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El Control estadístico permite controlar la calidad de los procesos y productos para satisfacer a los clientes, reducir desperdicios, evitar reprocesos y reclamos, facilitando el trabajo en planta para proyectos estándares y especiales. La calidad no se determina solo en el producto final sino a través de todo el proceso de fabricación, desde el diseño del producto, la materia prima hasta su manufactura y servicio posventa.

- Las herramientas de mejora continua como el diagrama de Pareto, Ishikawua, diagramas de control, etc, permiten atacar las causas con mayor influencia en un proceso, evitando defectos en el producto final y a su vez permite solucionar problemas potenciales en el proceso.

- El diseño experimental permite evaluar en condiciones reales las variables del proceso de soldadura, las cuales pueden provenir de las 5 M (mano de obra, método, materia prima, medio ambiente y maquinaria), y a su vez es la mejor manera de implementar cualquier sistema de control en el proceso, ya que intervienen variables externas al medio que se pueden tomar en cuenta en la solución

- El control de la trazabilidad del producto en el proceso de soldadura permite identificar con mayor facilidad las oportunidades de mejora en la parte operativa, y facilita la inspección del producto ya sea por la empresa o por el cliente final.

- Las variables principales en el proceso de soldadura que abarcan mayor número de variables secundarias y externas son la corriente, voltaje y velocidad de soldadura, lo que permite identificar con mayor facilidad el problema según las curvas del proceso, a pesar que no hayan defectos presentes en el producto final.

- El rango óptimo de trabajo de cada una de las variables de soldadura depende del equipo de soldadura, el alambre electrodo y del material a soldar basados tanto en la ficha técnica del fabricante de los consumibles y del diseño experimental realizado en planta, ya que cada fabricante de alambre electrodo tiene aleantes especiales para su producto.
- El control estadístico de procesos para productos soldados es aplicable para la fabricación de elementos estándar, ya que permite evaluar con mayor rapidez el comportamiento de las juntas soldadas.
- Las curvas de estabilidad de cada uno de los pases de soldadura permiten evaluar al producto internamente sin necesidad de realizar ensayos no destructivos.
- La evaluación tanto de la capacidad del proceso C_p , como del centramiento del proceso C_{pk} permiten conocer el comportamiento de la junta y el cumplimiento de los WPS en el transcurso del tiempo y a su vez verificar si se está cumpliendo con la especificación del producto.
- La evaluación del seis sigma en un proceso permite conocer de manera cualitativa que tan representativo puede ser un defecto según las unidades producidas, para identificar si el proceso necesita atención inmediata o no.

5.2. Recomendaciones

- Es recomendable realizar un análisis en el proceso de fabricación de elementos conformados en frío, ya que el control estadístico es aplicable a este tipo de productos previos a la soldadura, logrando un mejor pre-ensamblaje evitando problemas dimensionales.
- Para la aprobación de nuevos procedimientos de soldadura, es recomendable realizar ensayos metalográficos y destructivos a la vez, en probetas soldadas en

condiciones reales, lo cual garantiza un mejor control y destreza en el operador de soldadura.

- Es recomendable realizar un diseño experimental fuera de línea antes de la implementación de un consumible, ya que cada máquina se comporta de diferente manera el momento de su utilización, lo cual puede generar un rango de trabajo diferente a lo especificado en la ficha técnica del fabricante de los productos consumibles.
- Se recomienda realizar un análisis de seis sigma en cada etapa de fabricación de los elementos, es decir en el corte y conformado, pre-armado e inspección dimensional para garantizar que el producto fabricado regrese de un proceso a otro sin que cumplan las especificaciones indicadas en la norma aplicable.
- El control de soldabilidad de la materia prima es de vital importancia en la industria metalmeccánica, por tal motivo es recomendable que se establezca una regulación para los comercializadores de acero, de tal manera que indiquen en sus certificados de calidad las propiedades químicas y trazabilidad del producto para que las plantas de fabricación de elementos soldados reduzcan tiempo y costos en materiales que son difíciles de soldar.
- Se recomienda implementar en las empresas metalmeccánicas un espacio adecuado, para que el operador de soldadura practique y pueda alcanzar las especificaciones del proceso de soldadura estandarizando el proceso y evitando posibles fallos en el producto fabricado.

Referencias Bibliográficas

- [1] Besterfield, D. (2009). *Control de calidad*. México: Octava edición.
- [2] Camisón, C. (2006). *Gestión de la calidad*. Madrid (España): Prentice Hall.
- [3] Confederación nacional de Madrid. (2008): *La Innovación Un factor clave para la competitividad de las empresas*. Madrid (España): Comunidad de Madrid.
- [4] Díaz, E. y Ruiz, D. (2005). *Herramientas estadísticas para el control de procesos*. Universidad nacional experimental de Guayana.
- [5] Cuesta, M. (2002). *Introducción al muestreo*. Madrid (España): Universidad de Oviedo.
- [6] Carro, R. y González, D. (2002). *Control estadístico de procesos*. Argentina: Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [7] Gutiérrez Pulido, H. y Salazar de la Vara, R. (2009). *Control estadístico de calidad y seis sigma*. México: Mc Graw Hill, Segunda edición.
- [8] Sencico. (2013). *Manual de soldadura de estructuras metálicas*. Lima (Perú): Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción
- [9] AHMSA. (2013). *Manual de Diseño para la Construcción con Acero*. México: Edición de Altos hornos de México.
- [10] American Welding Society AWS. (2010). *Norma de soldadura de estructuras metálicas D1.1*. USA: Edición novena.
- [11] LINCOLN ELECTRIC. (2008). *Soldadura semiautomática con gas de protección (mig-mag)*. USA: Departamento de Formación Lincoln-KD, S.A.
- [12] INDURA. (2015). *Manual de sistemas y materiales de soldadura*. Chile: Octava Edición.
- [13] Lara, A. (2001). *Diseño estadístico de experimentos*. Argentina: Edición Proyecto sur.
- [14] De la Horra, J. (2005). *Estadística aplicada*. México: Ediciones Díaz de Santos.
- [15] Bowxer, A. y Lieberman, G. (2006). *Estadística para Ingenieros*. México: Prentice Hall.
- [16] Ávila Baray, H.L. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación*. México: Edición electrónica.

[17] Devore, J.L. (2005). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Sexta Edición. Thompson cop.

[18] Álvarez, B. J. (2001). *Control estadístico de procesos*. Madrid: La Muralla

[19] Arboleda, J. (2015). *Estudio de mejora del proceso de soldadura a partir de análisis y diseño de experimentos*. ISSN -e: 2382-3283 Vol. 2 No.2. Palmira: Universidad Pontificia Bolivariana.

PUBLICACIONES:

[20] Menéndez Rico J. (2008). *Evolución del concepto de la calidad*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/nelo2971/evolucion-de-la-calidad-16165431>

[21] García González F. (2012). *Conceptos sobre Innovación*. Asociación colombiana de facultades de ingeniería. Recuperado de http://www.acofi.edu.co/wp-content/uploads/2013/08/DOC_PE_Conceptos_Innovacion.pdf

[22] Fundación COTEC. (2001). *Innovación tecnológica*. Madrid. Recuperado de https://www.innova.uned.es/webpages/innovaciontecnologica/mod1_tema1/InnovacionTecldeasBasicas.pdf

[23] Torres Eduardo, C. (2014). *Soldabilidad de aceros al carbono, baja y mediana aleación*. Cuba: Universidad de Matanzas. Recuperado de <http://monografias.umcc.cu/monos/2014/Facultad de Ciencias Tecnicas/mo1467.pdf>

[24] Eyheralde, M. (2012). *Inspección de Soldadura*. Perú: Universidad Nacional de Minas Gerais. Recuperado de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/01 El inspector de soldadura.pdf>

[25] Marín, M. (2007). *Introducción al diseño de experimentos*. Chile. Recuperado de <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Diseno/IntroDE.pdf>

[26] Badii, M. H., Castillo, J. y Rodríguez, M. (2007). *Diseños experimentales e investigación científica*. México: San Nicolás. Recuperado de http://www.web.facpya.uanl.mx/rev_in/Revistas/4.2/A5.pdf

[27] Ramón, G. (2005). *Diseños Experimentales*. Colombia: Universidad de Antioquia. Recuperado de http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf

[28] Svoboda, H., Burgueño, A. y Lorusso, H. (2008). *Soldadura de aceros Dual Phase en chapa fina: GMAW, PAW y RSW*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/si/v16n2/a09v16n2.pdf>

[29] Ruiz, A. y Rojas, F. (2006). *Control estadístico de procesos*. Madrid. Edición electrónica. Recuperado de <http://web.cortland.edu/matresearch/ControlProcesos.pdf>

- [30] Zambrano Rey, G., Fúquene, C. y Aguirre, H. (2010). *Aplicativo para el control estadístico de procesos en línea integrado a un sistema de manufactura flexible*. Bogotá: Universidad de Bogotá. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/inun/v14n1/v14n1a06.pdf>
- [31] Chakraborty, S. y Tah, D. (2005). *Real time statistical process advisor for effective quality control*. Philadelphia: Elsevier. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/2bdf/dae091bd230b6612c9fb0edac8cc667d9fb3.pdf>
- [32] Hernández, C. y Da Silva, F. (2015). *Aplicación del control estadístico de procesos (CEP) en el control de su calidad*. Porto Alegre: Universidad de Oriente Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000100010
- [33] Acosta Herrera, H. y Serrano, O. (2006). *Procedimientos de Control e Inspección Aplicados en la Fabricación de la Estructura de un Puente Soldado de acuerdo al Código AWS D1.5*. Ecuador: Universidad politécnica del Litoral. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1726/1/3397.pdf>

ANEXO I.
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)
OP.04_PE.02_GR.02

ANEXO II.
BASE DE DATOS DEL PROCESO DE SOLDADURA

**ANEXO III.
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA
OP.04_PE.02**

**ANEXO IV.
SOLDABILIDAD DE LOS MATERIALES
OP.04_PE.02_FR.04**

**ANEXO V.
PLAN DE CONTROL
OP.04_PE.02_DG.03**

**ANEXO VI.
REGISTRO DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS
OP.04_PE.02_FR.03**

**ANEXO VII.
REGISTRO DEL CONTROL DEL PROCESO
OP.04_PE.02_FR.02**

ANEXO VIII.
REGISTRO DE CONTROL DE CALIDAD DE SOLDADURA
OP.04_PE.02_FR.01

**ANEXO IX.
INSTRUCTIVO DE SOLDADURA
OP.04_PE.02_IT.01**

**ANEXO X.
CERTIFICADO DE CALIDAD DEL PRODUCTO FINAL**