

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO SEMIAUTOMÁTICO DE SOLDADURA TIPO GMAW EN LA RECUPERACIÓN DE MATERIALES SIMILARES DE LA CARACAS DE UNA BOMBA HIDRÁULICA TIPO TORNILLO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Landaeta G., Armando R.
Marcano S., Andrés I
Para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO SEMIAUTOMÁTICO DE SOLDADURA TIPO GMAW EN LA RECUPERACIÓN DE MATERIALES SIMILARES DE LA CARCASA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA TIPO TORNILLO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ing. Andrea Scagni.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
Landaeta G., Armando R.
Marcano S., Andrés I
Para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2012.



ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

*Armando Rafael Landaeta Gómez y
Andrés Ignacio Marciano Sosa*

Titulado

***“Optimización de un Proceso Semiautomático de
Soldadura Tipo GMAW en la Recuperación de
Materiales Similares de la Carcasa de una Bomba
Hidráulica Tipo Tornillo”***

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los veinticinco días del mes de junio del año dos mil doce.

Prof. Pedro Cadenas
Jurado



Prof. Manuel Martínez
Jurado

Prof. Andrea Scagni
Tutor

DEDICATORIA

A Dios por darme salud y guiarme siempre por el camino correcto.

A mi abuelo Rafael por ser el primer ingeniero graduado de la universidad de la vida que tuve el placer de conocer, tus anécdotas, tus enseñanzas, tu cariño incondicional, y tu memoria siempre vivirán presentes en mí, que dios te tenga en la gloria.

A mi mamá por siempre ser mi guía cuando el camino no es fácil, mi apoyo cuando ya no puedo más y quiero renunciar a todo y mi ejemplo de perseverancia y constancia para salir adelante en la vida, por siempre estar a mi lado ayudándome a lograr mis metas y superarme como persona.

A mi papá por siempre creer en mí y ser mi ayuda y mi apoyo incondicional en todo lo que me he propuesto en la vida, por siempre ayudarme a levantarme cuando estoy abajo, por darme tus palabras de aliento, tus valiosos consejos y por siempre avisarme con paciencia y cariño de lo que me espera en el camino.

A mi hermano Javier por ser mi mejor amigo y siempre brindarme tu apoyo, tu alegría y por enseñarme día a día a ser mejor persona.

Armando Rafael Landaeta Gómez.

DEDICATORIA

A Dios por guiarme y darme fortaleza a lo largo del camino de la vida.
A mi mamá Carmen Sosa, por ser mi apoyo incondicional y alentarme en todo
momento a continuar luchando.
A mi papá Teddy Marcano, por haberme enseñado y dado todas las herramientas para
lograr esta meta, gracias!!!
A mis hermano Ernesto y mi hermana Gabriela, por su confianza y apoyo, buscando
siempre lo mejor para mí.

Andrés I. Marcano S.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo le agradezco a Dios por darme vida y salud, y siempre cuidarme de todo lo malo que hay en este mundo, así como las fuerzas que me da para afrontar lo que puedo arreglar y paciencia para lo que no puedo.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por haberme permitido ingresar a sus aulas y enseñarme un mundo nuevo y herramientas que me van a ayudar a abrirme paso en este mundo, nunca olvidare todos las anécdotas que tuve el grato placer de vivir como estudiante Ucevista. Siempre estaré orgulloso de ser Ucevista!!!.

A mi Tutor el Profesor Andrea Scagni por compartir sus conocimientos y por guiarnos a lo largo de todo este trayecto.

A mis padres que sin su ayuda, su comprensión y su cariño incondicional no hubiera sido posible la realización de este trabajo y yo no estaría donde estoy en este momento de mi vida gracias por todo. A mi hermano Javier gracias por tus palabras, tu sonrisa que todo lo puede y por ser el mejor amigo que dios me pudo dar. Los amo.

A mis abuelos, en especial a mi abuelo Rafael que me está cuidando desde el cielo espero que estés orgulloso de mí, y a mi abuela Beatriz por sus valiosos consejos te adoro mi abuela bella. Mis tíos, en especial mi tío Frank; mis primos y mi padrino Guillermo que siempre han estado ayudándome a lo largo de toda mi vida.

A mi novia Gabriela te amo con todo mi corazón gracias por estar siempre para mí, y ser tan bella conmigo yo sé que este trayecto no fue fácil y sin embargo nuestro amor pudo con todo, sin ti este logro no sería igual.

A mi compañero de tesis Andrés, no pude haber escogido un mejor compañero y amigo para involucrarme en esta complicada faena, gracias por todo hermano.

Al profesor Crisanto Villalobos gracias por tu amistad y tu ayuda invaluable, gracias por haberte comprometido con nosotros como si hubieras sido nuestro tutor y siempre ayudarnos.

A la Profesora Isis Plaza gracias por toda la ayuda y el apoyo que nos brindó.

A la familia Pino-Hernández en especial a la Dra. Elizabeth por sus consejos. Los aprecio mucho.

Gracias a la familia Marcano-Sosa por toda su ayuda, en especial a la Señora Carmen.
A la Industria Plasmatec Ingenieros, C.A y a todos sus integrantes por permitirnos desarrollar nuestro trabajo especial de grado en sus instalaciones, en especial al Ing. Miguel Ángel sin tu ayuda esto no hubiera sido posible.
A los integrantes del Proyecto Polar- UCV por su ayuda y comprensión en la elaboración de mi Tesis, en especial al Ing. Jorge Gómez gracias por todo.

Armando Rafael Landaeta Gómez.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haber por ofrecerme la fortaleza y paciencia necesaria en todos los momentos difíciles.

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela por convertirse en mi segundo hogar y brindarme todas los conocimientos académicos y éticos para lograr ser profesionales de excelencia.

A nuestros tutores Andrea Scagni y Crisanto Villalobos, por su amistad, gran ayuda e inmensa colaboración a lo largo de este trabajo de grado.

Gracias, a mi mamá y a mi papá por apoyarme y motivarme en todo momento, para que logre todo lo que me proponga, y crezca cada vez más como persona. Esto es para ellos!!!

A mi Familia, Tias, Tios y Primos, que me han ayudado en todo, a lo largo de mi vida.

A mi novia, Ori, por su continuo empuje y ayuda para lograr la conclusión de este trabajo.

A mi compañero de tesis, Armando y su familia por soportar todos los momentos de stress.

A todos los compañeros de la escuela de ingeniería mecánica, por su ayuda y apoyo brindado.

Al personal de la empresa Plasmatec C. A. en especial al Ing. Miguel Ángel por su colaboración y espíritu de trabajo.

Al Prof. Damian Pereira, del departamento de física, por su ayuda incondicional en cuanto a los ensayos no destructivos realizados en el presente trabajo.

A los profesores del IUT, Javier García y Gustavo Castro, por la disposición y colaboración brindada en la realización de la Microscopia Electrónica de Barrido.

A todas las personas que han participado directa e indirectamente, opinando, corrigiendo, ayudándonos y apoyándonos, Gracias por estar ahí!!!

Andrés I. Marciano S.

**Landaeta G., Armando R.
Marcano S., Andrés I.**

OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO SEMIAUTOMÁTICO DE SOLDADURA TIPO GMAW EN LA RECUPERACIÓN DE MATERIALES SIMILARES DE LA CARCASA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA TIPO TORNILLO

**Tutor Académico: Prof. Andrea Scagni.
Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012, pp 120.**

Palabras Claves: RECUPERACIÓN, SOLDADURA TIPO GMAW, ENSAYOS
NO DESTRUCTIVOS, VELOCIDAD DE AVANCE, VELOCIDAD DE
OSCILACIÓN.

Resumen. El presente trabajo tiene por objeto la determinación de los parámetros de deposición óptimos, (velocidad de avance y velocidad de oscilación), del proceso semiautomático de recuperación por soldadura tipo GMAW, de la carcasa interna de una bomba tipo tornillo modelo P-3001, utilizando el acero AISI P20 como sustituto del acero ASTM-A216 WCB, acero con el que está construida la bomba, para la simulación del proceso de recuperación. Se seleccionó un diseño factorial 3^2 en el cual se variaron los dos parámetros anteriormente mencionados a tres niveles. Se evaluó la uniformidad del material mediante ensayos no destructivos y el ensayo de dureza estática obtenida por técnicas de microindentación. La respuesta a la variación de los parámetros seleccionados fue la penetración del cordón sobre el material base, donde se condujo un análisis de varianza para evaluar la significancia de los parámetros del proceso. La microestructura del material de aporte, zona afectada por el calor y material base, fueron estudiadas mediante Microscopía Óptica (MO), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Se observó resultados más óptimos a altas velocidades mediante el análisis de varianza y desde el punto de vista microestructural a pesar de los cambios estructurales encontrados en las distintas zonas de la soldadura la microestructura entrelazada es continua a lo largo de la unión, generando una buena adherencia en la condición de máxima velocidad de avance y máxima velocidad de oscilación.

Landaeta G., Armando R.

Marcano S., Andrés I.

**PROCESS OPTIMIZATION OF A SEMI-AUTOMATIC GMAW
WELDING IN THE RECOVERY OF SIMILAR MATERIALS OF
THE HOUSING OF A HYDRAULIC PUMP SCREW**

Tutor Académico: Prof. Andrea Scagni.

Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012, pp 120.

Keywords: RECOVERY, GMAW WELDING, NON-DESTRUCTIVE TESTING, TRAVEL SPEED, OSCILLATION SPEED.

Abstract. The present work aims to determine the optimal deposition parameters (travel speed and oscillation speed), of the semiautomatic GMAW welding recovery process, in the inner shell of a screw pump model P-3001, using steel AISI P20 steel as a substitute for ASTM A216 WCB, steel with which the pump is built, to simulate the recovery process. Factorial design was selected 3^2 in which the two parameters are varied at three levels above. We evaluated the uniformity of the material thru non-destructive testing and by the static hardness test obtained by microindentation techniques, performing a hardness sweep in the cross section of the sample defining six (6) test areas. The response to the variation of the selected parameters was the bead penetration on the base material, where an analysis of variance was conducted to evaluate the significance of the process parameters. The microstructure of the filler metal, heat affected zone and base material were studied by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), It was observed in the variance analysis that we get better results at higher velocities and from the microstructural standpoint, despite structural changes found in the different metallurgical zones of the weld, is continuous intertwined microstructure along the junction, generate a good grip on the condition of maximum forward speed and maximum speed of oscillation.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. JUSTIFICACIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.2.1. Generales.....	5
1.2.2. Especificos	5
1.3. ESTUDIOS PRELIMINARES O ANTECEDENTES	5
CAPITULO II - MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. BOMBAS HIDRÁULICAS TIPO TORNILLO.....	9
2.2. SOLDADURA POR ARCO CON ALAMBRE Y PROTECCIÓN GASEOSA (GMAW)..	11
2.2.1. Soldadura	11
2.2.2. Procesos de soldadura	11
2.2.3. Soldeo por gmaw.....	14
2.2.4. Equipo y parámetros del proceso de soldadura gmaw.....	14
2.2.5. Ventajas y limitaciones del proceso gmaw	16
2.2.6. Transferencia metálica de soldadura	18
2.2.7. Gases de protección	22
2.2.8. Metalurgia de la soldadura.....	25
2.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END).....	30
2.3.1. Inspección visual (vt).....	31
2.3.2. Ultrasonido industrial (ut).....	32
2.3.3. Radiografía industrial (rt)	38
2.4. ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	46
2.4.1. Dureza	46
2.4.2. Macroataque.....	48

2.4.3. Microataque.....	49
2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL	49
2.6. ANOVA	50
2.7. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	52
2.8. SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	53
2.9. GRÁFICA DE CONTORNOS.....	53
CAPITULO III - METODOLOGÍA.....	55
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN Y DISEÑO DEL TRABAJO.	55
3.2. PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES.....	55
3.3. SELECCIÓN DE PARÁMETROS.....	58
3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL APLICADO.....	58
3.5. PROBETAS.....	59
3.5.1. Descripción del Material Base y Geometría utilizados.	59
3.5.2. Descripción del Material de Aporte Utilizado.	62
3.5.3. Descripción del Gas de Protección a utilizar.	63
3.6. PREPARACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE LAS PROBETAS A SOLDAR.....	63
3.6.1. Procedimiento.....	63
3.7. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.	64
3.7.1. Inspección visual	64
3.7.2. Radiografía Industrial	64
3.7.3. Ultrasonido Industrial	67
3.8. ENSAYOS DESTRUCTIVOS	69
3.8.1. Prueba Dureza.	69
3.8.2. Estudio de discontinuidades estructurales a nivel macro.....	70
3.8.3. Estudio metalográfico (Microataque).....	71
3.9. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y ESPECTROSCOPIA (MEB-EDS). .	
.....	72
3.9.1. Materiales:.....	72
3.9.2. Procedimiento:.....	72

CAPITULO IV - RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	74
4.1. ANÁLISIS DE SELECCIÓN DEL MATERIAL BASE	74
4.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	76
4.2.1. Análisis de inspección visual:	76
4.2.2. Análisis de inspección de radiografía industrial.....	79
4.2.3. Inspección ultrasonido industrial.....	81
4.3. ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	86
4.3.1. Análisis del ensayo de dureza.	86
4.3.2. Análisis del estudio de discontinuidades a nivel macro.	89
4.3.3. Análisis del ensayo metalográfico.....	92
4.4. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA).....	92
4.5. ANÁLISIS DEL ENSAYO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)...	96
CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES.....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 PARÁMETROS DE SOLDADURA GMAW.	16
TABLA 2.2 PARÁMETROS EN LA TRANSFERENCIA METÁLICA DE SOLDADURA.	18
TABLA 2.3 RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA.	51
TABLA 3.1 MATRIZ RESULTADO DEL DISEÑO FACTORIAL.....	59
TABLA 3.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI P20 (ASTM-A681)	59
TABLA 3.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO ASTM-A216WCB (ASTM-A216)..	59
TABLA 3.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI P20 Y ASTM A-216 WCB..	60
TABLA 3.5 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ALAMBRE ER70S-6 (UNIBRAZE™).....	62
TABLA 3.6 ZONAS DE BARRIDO DE DUREZA.	70
TABLA 4.1 CONTROL DE INSPECCIÓN VISUAL.....	78
TABLA 4.2 VALORES PROMEDIO DE DUREZA VICKERS.....	87
TABLA 4.3 VALORES PROMEDIO DE PENETRACIÓN EN LAS DISTINTAS CONDICIONES. .	91
TABLA 4.4 ANÁLISIS DE VARIANZA EN FUNCIÓN DE LA PENETRACIÓN.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 BOMBA ROTATIVA DE DOS TORNILLOS. (KRASSIK, MESSINA, COOPER, & HEALD, 2001).....	10
FIGURA 2.2 PROCESOS DE SOLDADURA SEGÚN AWS. (AMERICAN WELDING SOCIETY INC., 1997)	12
FIGURA 2.3 PROCESO DE SOLDADURA GMAW.	15
FIGURA 2.4 PARTES Y COMPONENTES DE UN EQUIPO DE SOLDADURA GMAW.	15
FIGURA 2.5 EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA EN CORDÓN Y PENETRACIÓN. (THE WELDING INSTITUTE, 1980).....	16
FIGURA 2.6 FORMAS DE TRANSFERENCIA METÁLICA.	19
FIGURA 2.7 (A) FORMA DE LA COLUMNA DE PLASMA Y. (B) PENETRACIÓN DEL CORDÓN DE SOLDADURA DEPENDIENDO DEL GAS DE PROTECCIÓN.	24
FIGURA 2.8 ZONAS DE UNA JUNTA SOLDADA.....	26
FIGURA 2.9 ASPECTOS SUPERFICIALES EN LA SOLDADURA.....	31
FIGURA 2.10 SECUENCIA DE CALIBRACIÓN PARA TRANSDUCTOR DE HAZ LONGITUDINAL.	35
FIGURA 2.11 REFLEXIÓN DEL SONIDO DESDE UNA DISCONTINUIDAD.....	35
FIGURA 2.12 PROPAGACIÓN DE UN HAZ EN ANGULO.....	36
FIGURA 2.13 EFECTO DEL ESPESOR DE LA PIEZA EN LA TRANSMISIÓN DE RADIACIÓN (ABSORCIÓN).....	38
FIGURA 2.14 EFECTO DE LA DENSIDAD DEL MATERIAL EN LA TRANSMISIÓN DE RADIACIÓN (ABSORCIÓN).	39
FIGURA 2.15 INDICADORES DE CALIDAD DE IMAGEN TIPO CUÑA Y ALAMBRE.....	41
FIGURA 2.16 ORIENTACIÓN DE LA FUENTE DE RADIACIÓN, CHAPA DE ENSAYO Y PELÍCULA RADIOGRÁFICA.	42
FIGURA 2.17 RADIOGRAFÍA REVELADA.	43
FIGURA 2.18 POROSIDADES.	43
FIGURA 2.19 ESCORIAS ALINEADAS.	43

FIGURA 2.20 FALTA DE PENETRACIÓN ASOCIADA A LA DESALINEACIÓN.	44
FIGURA 2.21 PENETRACIÓN INCOMPLETA (IP) O FALTA DE PENETRACIÓN (LOP).....	44
FIGURA 2.22 FUSIÓN INCOMPLETA.	44
FIGURA 2.23 REFUERZO DE SOLDADURA INADECUADO.....	44
FIGURA 2.24 REFUERZO DE SOLDADURA EXCESIVO.....	45
FIGURA 2.25 AGRIETAMIENTOS.....	45
FIGURA 2.26 INCLUSIONES DE OXIDO.	45
FIGURA 2.27 SOLDADURA FRÍA (COLD LAP).....	46
FIGURA 2.28 BARRAS DE VANADIO MACROATACADAS.....	48
FIGURA 2.29 MICROESTRUCTURA DE UN ACERO AISI 1015 MICROATACADO CON NITAL.....	49
FIGURA 2.30 SUPERFICIE DE RESPUESTA DE DOS Y TRES DIMENSIONES RESPECTIVAMENTE.....	53
FIGURA 2.31 GRÁFICA DE CONTORNOS.....	54
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	57
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE GRAVILLE (SALAZAR, 2006)	60
FIGURA 3.3 DIMENSIONES Y DISEÑO DE LA PROBETA.....	61
FIGURA 3.4 GEOMETRÍA DE LA PROBETA.	63
FIGURA 3.5 CONSOLA DEL EQUIPO DE RAYOS X.	66
FIGURA 3.6 REVELADOR G128 (COLOR NARANJA); FIJADOR G328 (COLOR AZUL) ..	66
FIGURA 3.7 NEGATOSCOPIO	66
FIGURA 3.8 DIAGRAMA DE EXPOSICIÓN PARA LA PELÍCULA AGFA STRUCTURIX D7. 67	
FIGURA 3.9 BLOQUE CALIBRADOR (IIW) Y EQUIPO DE ULTRASONIDO.	68
FIGURA 3.10 MICRODURÓMETRO BUEHLER.	69
FIGURA 3.11 ZONAS DE MICROINDENTACIÓN EN LAS PROBETAS DE SOLDADURA.	70
FIGURA 3.12 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB-EDS)	73
FIGURA 4.1 REPRESENTACIÓN DE LOS ACEROS AISI P20 Y ASTM-A216 EN EL DIAGRAMA DE GRAVILLE	75
FIGURA 4.2 MUESTREO DE PROBETAS CON LAS DISTINTAS CONDICIONES.	77

FIGURA 4.3 MAPA DE MODO DE TRANSFERENCIA METÁLICA PARA UNA MEZCLA DE GAS DE PROTECCIÓN AR + 2%CO ₂ ; EN DONDE: SC= CORTO CIRCUITO, G= GLOBULAR, S=SPRAY, UNSTABLE= INESTABLE, R=REPELIDA, SC/G= MODO DE TRANSFERENCIA ENTRE CORTO CIRCUITO Y GLOBULAR, SC/S= MODO DE TRANSFERENCIA ENTRE CORTO CIRCUITO Y SPRAY.....	78
FIGURA 4.4 INDICADOR DE CALIDAD DE IMAGEN (ICI).	80
FIGURA 4.5 RADIOGRAFÍA DE PROBETAS 4-8-9	80
FIGURA 4.6 RADIOGRAFÍA DE PROBETAS 2-5-7	80
FIGURA 4.7 RADIOGRAFÍA DE PROBETAS 1-3-6	80
FIGURA 4.8 FOTO PANTALLA OSCILOSCOPIO SIN DEFECTO.	81
FIGURA 4.9 FOTO PANTALLA OSCILOSCOPIO CON DEFECTO.....	82
FIGURA 4.10 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#1.	82
FIGURA 4.11 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#2.	83
FIGURA 4.12 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#3.	83
FIGURA 4.13 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#4.	84
FIGURA 4.14 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#5.	84
FIGURA 4.15 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#6.	84
FIGURA 4.16 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#7.	85
FIGURA 4.17 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#8.	85
FIGURA 4.18 REPRESENTACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA EN LA PROBETA#9.	86
FIGURA 4.19 PROBETAS MACROATACADAS.....	89
FIGURA 4.20 PROBETA#2, FALLA POR SOLDADURA FRÍA, A:10X, B:20X	90
FIGURA 4.21 PROBETA#7 ZONA CORDÓN-ZAC 20X.	90
FIGURA 4.22 FORMA DE LA PENETRACIÓN POR MOVIMIENTO OSCILATORIO.	91
FIGURA 4.23 PROBETA MICROATACADA 200X; A) MATERIAL DE APORTE, B) ZAC, C) MATERIAL BASE.....	92
FIGURA 4.24 GRÁFICA DE LOS EFECTOS INDIVIDUALES DE LOS PARÁMETROS.	94
FIGURA 4.25 GRÁFICO DE INTERACCIÓN DE PARÁMETROS.	94
FIGURA 4.26 GRÁFICA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA EN FUNCIÓN DE LA PENETRACIÓN.	95

FIGURA 4.27 GRAFICA DE CONTORNOS EN FUNCION DE LA PENETRACIÓN.	96
FIGURA 4.28 ZONA MATERIAL DE DEPÓSITO-ZAC-500x, A.-PROBETA#5; B.- PROBETA#9.	97
FIGURA 4.29 ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO DEL MATERIAL DEPOSITADO PROBETA#1 500x.....	97
FIGURA 4.30 ESTRUCTURA DE LA FERRITA ACICULAR TIPO WIDMÄSTATTEN EN ZAC. 1000x.....	98
FIGURA 4.31 PROPAGACIÓN DE LA GRIETA EN LA ESTRUCTURA FERRITICA TIPO WIDMÄSTATTEN. PROBETA #7 500x.	99
FIGURA 4.32 INTERRUPCIÓN DE LA COLONIA PERLITICA EN EL MATERIAL BASE. PROBETA#4 500x.....	99
FIGURA 4.33 INCLUSIÓN POR SULFURO DE MANGANESO ZONA ZAC PROBETA#1 1000x.	100
FIGURA 4.34 ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO DE ZAC, PROBETA#1, 500x.....	101
FIGURA 4.35 ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO DEL MATERIAL BASE, PROBETA#1, 500x	101

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se especula que una gran suma de dinero es desperdiciada en los depósitos de material dañado o fuera de servicio. Maquinaria y piezas, gastadas, en estado de exclusión, obsoletas, entre otras, que han sido catalogadas como “desechos”, siendo acumulados por las distintas industrias, en áreas o patios de almacenamiento, convirtiéndose en una problemática a nivel mundial, viéndose afectado el medio ambiente, al no reciclar, proliferando agentes contaminantes, y el medio económico, debido al manejo ineficiente de los mismos, pudiendo ser recuperados o reparados, y ser reutilizados.

En la actualidad la competitividad a nivel industrial se hace mayor generando la búsqueda de la optimización en el empleo de sus recursos, con el propósito de minimizar sus costos de operación y maximizar el rendimiento de las piezas, maquinarias y equipos.

Siendo viable el estudio e investigación, para recuperar los elementos antes mencionados, da origen a un nuevo concepto dentro de la ingeniería, donde el ingeniero deba analizar los aspectos técnico-económicos para determinar la factibilidad de estos procesos, por medio de las diferentes técnicas de recuperación y reparación de sus múltiples componentes.

En este caso se hará referencia a las bombas hidráulicas de tornillo, maquinaria altamente productiva en la actualidad, para las grandes industrias, comúnmente utilizadas por industrias, petroleras y petroquímicas, siendo elegidas mundialmente por sus estándares de eficiencia y confiabilidad. Este tipo de bombas a lo largo de su vida útil, requieren de un plan de mantenimiento rutinario, el preventivo y predictivo, los cuales garantizaran su máximo funcionamiento, hasta que la eficiencia de la bomba disminuya, y como consecuencia necesite un tercer mantenimiento, el correctivo, enfocado a la recuperación y reparación de la misma.

Para la aplicación del mantenimiento correctivo se deben tomar en cuenta los conocimientos mecánicos, metalúrgicos, químicos, entre otros, así como también la

técnica de evaluación económica y de seguridad. Se ha logrado mediante el desarrollo de estos conocimientos dos grandes áreas, la recuperación y reparación por soldadura y el recubrimiento post-recuperación.

Es importante resaltar que durante el proceso de recuperación y reparación por soldadura, es muy frecuente la soldadura por arco con alambre y protección gaseosa (GMAW), debido a que es un proceso que se puede hacer de forma manual, semiautomática, y automática, presentando grandes ventajas económicas, disminuyendo el tiempo de reparación, y a su vez disminuyendo el tiempo de parada de la máquina. Esta es la situación actual y las tendencias para recuperar y reparar piezas por soldadura, por esto la importancia de evaluar los parámetros usados en el proceso semiautomático de soldadura (GMAW), generando beneficios tales como: calidad, productividad, y practicidad.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. JUSTIFICACIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En un sistema económico donde la mecanización y la automatización de los procesos son fundamentales para reducir los costos de producción, debido a su alta productividad en comparación con los procesos manuales, el intento por reducir los costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de los elementos mecánicos utilizados cobra cada vez más importancia. Al tener una pieza en mal estado es necesaria la detención de, el o los equipos para su posterior reemplazo, hecho que implica tiempos en los que la producción se detiene concibiendo pérdidas para la organización. Es entonces cuando la investigación en torno a reparaciones más resistentes y duraderas que alarguen la vida útil de los elementos mecánicos se hace sumamente importante y necesaria.

La industria petrolera se ve afectada continuamente por el deterioro de la maquinaria utilizada en la extracción y transporte. La bomba tipo tornillo es una de las maquinarias más usadas en la primera etapa de extracción, teniendo en cuenta que una bomba tipo tornillo es una bomba hidráulica de desplazamiento positivo en la cual se le aumenta la energía al fluido de trabajo; Esta utiliza un tornillo helicoidal excéntrico que se mueve dentro de una camisa, en donde el fluido es transportado entre las cuerdas del tornillo de uno o más rotores desplazándose axialmente a medida que giran engranados.

Esta maquinaria es una de las más afectadas; ya que el fluido que maneja es una mezcla de crudo, gas, agua y partículas en suspensión que dañan tanto a la carcasa interna o camisa y al tornillo rotor. Debido al gran desgaste a lo largo de su vida útil, es importante el mantenimiento de la misma, entre los tipos de

mantenimientos que existen están, el preventivo, el predictivo y el correctivo. Específicamente la bomba que se estudiara en este trabajo es la bomba hidráulica tipo tornillo modelo P-3001. Esta presenta daños en forma de cavidades denominadas comúnmente como caries, porosidades y fracturas en la carcasa interna. Debido a que ya el daño esta efectuado en la bomba se requiere de un mantenimiento correctivo que en este caso se orientara a una recuperación por soldadura.

El mantenimiento y la recuperación por soldadura es una de las formas más rápidas y económicas para restablecer la producción. La soldadura es una actividad compleja metodológicamente estudiada y aplicada, puede producir resultados técnicamente adecuados y económicamente beneficiosos. Brinda soluciones en fabricación, reparación y mantenimiento de infraestructura y equipos.

El enfoque de una reparación es diferente al de la producción ya que no se dispone de información completa sobre el componente a reparar y tampoco de los materiales necesarios para un proceso de calificación de procedimiento formal. Se pueden seguir sin embargo, buenas prácticas técnicas utilizando toda la información disponible y siendo conservador para las decisiones que se basen en información insuficiente. Los resultados sin embargo deben ser confiables pues una falla producto de un mal diseño de procedimiento de reparación puede producir daños personales y económicos de muy alto costo.

Para este proceso de recuperación, el tipo de soldadura que se utilizara es el GMAW (Gas Metal Arc Welding), ya que es factible el automatizarlo y disminuir los tiempos de producción y aumentar la calidad del trabajo final.

Este proceso de recuperación por soldadura tipo GMAW de las bombas P-3001, se encuentra en fase experimental, debido a que tradicionalmente se hacía de forma manual y ahora de forma semiautomatizada, esto mediante una máquina que realiza dos velocidades sobre un mismo plano: la primera es una velocidad de avance y la segunda es una velocidad oscilatoria, ambas velocidades se efectúan a la par en la pistola de la soldadora tipo GMAW simulando el movimiento de la mano de un soldador experto para una mayor precisión y rapidez en el momento de realizar el

cordón de soldadura. Esta máquina fue construida por la empresa PLASMATEC INGENIEROS, C.A. encargada de realizar todo el proceso de recuperación.

El problema que se está generando es una mala fusión y penetración del material de aporte al momento de recuperar la carcasa interna por soldadura, ya que en el momento del mecanizado todo el material aportado es removido dejando sin efecto la reparación, teniendo que comenzar nuevamente el proceso de recuperación, generando pérdidas para la empresa.

En este trabajo buscaremos obtener las variables más óptimas de la velocidad de avance y la velocidad de oscilación, con el objetivo de mejorar el proceso de soldadura propiciando una mejor unión entre el material base y el material de aporte, mediante un método estadístico conocido como análisis de varianza.

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. GENERALES

Optimizar las variables específicas que simularan el desplazamiento del electrodo con respecto a la pieza, en el proceso semiautomático de soldadura tipo GMAW, en la recuperación de materiales similares de la carcasa de una bomba hidráulica tipo tornillo modelo P-3001.

1.2.2. ESPECIFICOS

- Seleccionar las variables que utilizaremos en el proceso de soldadura.
- Recrear la recuperación por soldadura en probetas con distintas variables.
- Determinar la calidad de la unión entre el material de aporte y el material base, en base a los ensayos no destructivos para cada condición de soldadura.
- Caracterizar desde el punto de vista mecánico por medio de microindentación la unión en todas sus áreas características.
- Realizar el análisis de varianza para la optimización de las variables.
- Analizar los resultados obtenidos.

1.3. ESTUDIOS PRELIMINARES O ANTECEDENTES

Desde hace muchos años atrás todas las empresas que utilizan maquinarias de constante uso y de mucho costo, han tratado de mantener y disminuir los costos de

mantenimiento de las maquinarias mediante la recuperación por soldadura, una de las empresas encargadas de este tipo de mantenimiento es Plasmatec Ingenieros C.A., fundada en 1986, es una empresa de servicios para la reconstrucción y mejoramiento superficial de piezas nuevas y usadas. Actualmente cuenta con equipos de alta tecnología que existen en el mercado y emplean diversidad de materiales para satisfacer a sus clientes siguiendo las normas de calidad.

El proceso de recuperación por soldadura es muy amplio y versátil y para las bombas de tipo tornillo es un mantenimiento frecuente, para esto es necesario conocer cuáles son los mejores materiales y procedimientos en el momento de la reparación, (Robinson & Bonell, 2010) indican que el uso de aceros al carbón y aceros de baja aleación resistentes a la corrosión para recubrimiento es un método muy conveniente, económico y de técnica alternativa para los aceros sólidos y buscan desarrollar nuevos procedimientos permitiendo el uso de componentes de sección más delgada y mejorando el control en el depósito de la soldadura.

Las recomendaciones al tener piezas que han estado en servicio, y que presentan como inconvenientes para su reparación el estar muy gasificadas, desgastadas, fisuradas, con señal de erosión, corrosión, además de ser muy tensionadas después de tantas puestas en marcha y paradas ocasionando enfriamientos y calentamientos en el material de la maquina a la vez como los distintos materiales que entre ellos interactúan se llega a la conclusión de que es necesaria una soldadura de mantenimiento orientada a una reparación; ya que se tienen todas estas incógnitas antes mencionadas se necesitan estudios de cómo evitar defectos y fisuras por efecto del hidrógeno introducido, tensiones y formación de estructuras metalúrgicas duras durante la operación de soldadura, y su importancia a la hora de evaluar cálculos relacionados con el carbono equivalente relacionado con la soldabilidad de los aceros en la soldadura se pueden obtener del estudio de (Valero, 2004).

En la soldadura de mantenimiento en donde los procesos, consumibles, equipos y procedimientos para mejorar la calidad, productividad y costes de piezas fabricadas son una parte clave al momento de evaluar un proyecto de mantenimiento

y de recuperación teniendo en cuenta como fue el desgaste de la pieza si presentó fisuras y/o roturas y evaluando si se tiene la información completa de la pieza a reparar bien sea la composición química y características del metal base por (Lazaro & Lincoln, 1998)

Las reparaciones por soldadura son un proyecto de ingeniería en el cual la planificación y el estudio preliminar de los materiales y la naturaleza de la función que la maquinaria a ser reparada ejerce es fundamental como lo muestra en su estudio (Coloma, 2007) y estas pueden ser propensas a una falla prematura en el momento que la máquina comienza su funcionamiento sino se sigue una estricta preparación y un proceso de soldadura controlado, y en la norma (American Society of Testing and Materials, 2010) Cubre muy en general la calificación de los procedimientos, soldadores y operadores para la fabricación y reparación de los aceros de molde por soldadura del arco eléctrico. También podemos obtener más información en el trabajo de (Lant, Robinson, Spafford, & Storesund, 2001), nos da a conocer los procedimientos prácticos de la recuperación por soldadura, que se han desarrollado o que están siendo considerados para los aceros de baja aleación usados en la industria energética, petroquímica y petrolera. Entre estos procedimientos están la técnica de medio cordón de soldadura, que consiste en solapar los cordones de soldadura a lo largo de la pieza a reparar, como también si el proceso de soldadura es manual o automatizado.

En función de mejorar las técnicas y utilizar distintos procedimientos en el proceso de soldadura es importante también conocer el método de transferencia entre el material de aporte y el material base y en el trabajo de (Mousavi & Haeri, 2011) explica y describe las ventajas del proceso de soldadura GMAW, como su alta flexibilidad en la soldadura de diferentes metales con diferentes espesores, alta productividad en la soldadura y capacidad de ser automatizada, que es lo que hace que este tipo de soldadura sea de gran importancia en la industria. A su vez nos informa que la calidad en este proceso de soldadura está determinada por el modo de transferencia del material de aporte y la geometría de la soldadura. El proceso de transferencia del metal en GMAW se describe como el paso de la gota fundida desde

el electrodo hasta la pieza de trabajo. Esto juega un rol importante en la estabilización del arco, reducción en la salpicadura, gases residuales y en la apariencia suave del cordón de soldadura. El depósito del material de aporte en GMAW ocurre en tres modalidades principales: corto-circuito, globular y en spray, algunas maneras intermedias de transferencia pueden ocurrir entre el modo corto-circuito y globular o el modo globular y spray.

En los ensayos no destructivos los principales factores que influyen directamente en la Radiografía Industrial (RI) y Ultrasonido Industrial (UI) son: el material, el diámetro nominal y el espesor de los especímenes; teniendo en cuenta que en el Ultrasonido Industrial (UI) las discontinuidades planares como la falta de penetración y las grietas producen indicaciones con gran reflexión del haz ultrasónico, caso contrario en la porosidad por las inclusiones de escoria que comúnmente se presentan como discontinuidades. Tomando en cuenta estos elementos nos vamos a basar en el estudio realizado por (Llanos & Constant, 2000), para obtener las propiedades, principios y parámetros usados en estos ensayos al momento de evaluar este trabajo investigativo.

En el trabajo de (Silva, Pires, & Quintino, 2008) Se describen brevemente las características de los aceros para herramientas, su clasificación, así como las particularidades de su soldadura. Se brindan además los elementos esenciales a tener en cuenta para el establecimiento de un procedimiento de soldadura de reparación de herramientas y se resumen las principales técnicas de soldadura utilizadas para resolver problemas específicos en esta aplicación.

Aparte del modo de transferencia, la calidad del proceso de soldadura está influenciada por los parámetros del proceso y en busca de la optimización de estos es necesario un análisis parecido al planteado por, (Kim, Son, Yang, & Yaragada, 2003) En el que para obtener altas calidades en la soldadura se necesita desarrollar modelos matemáticos que puedan predecir la geometría y forma del cordón de soldadura de manera de obtener las propiedades mecánicas deseadas. Este modelo matemático se basa en un análisis factorial de tres parámetros a tres niveles, que luego es colocado en un análisis de varianza para obtener el resultado más exacto posible.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. BOMBAS HIDRÁULICAS TIPO TORNILLO.

Una bomba hidráulica es una máquina generadora que absorbe la energía (generalmente energía mecánica) y la restituye al fluido en energía hidráulica. Las bombas hidráulicas son usadas para impulsar toda clase de líquidos y líquidos con sólidos en suspensión como: agua, aceite, ácidos, pasta de papel, fangos, petróleo, etc.

Según su principio de funcionamiento las bombas hidráulicas se han clasificado en bombas rotodinámicas y bombas de desplazamiento positivo. El funcionamiento de las bombas rotodinámicas se basa en la ecuación de Euler, y su órgano transmisor de energía se llama rodete, su movimiento es rotativo y la dinámica de la corriente juega un papel esencial en la transmisión de la energía. Las bombas rotodinámicas se pueden clasificar según la dirección del flujo en: bombas radiales, bombas axiales y bombas radioaxiales o helicocentrífugas.

Las bombas de desplazamiento positivo operan con principios completamente diferentes a las bombas rotodinámicas, la diferencia más importante es la velocidad y no se basan en ella, para desarrollar presión. En términos generales, comprimen el líquido de las condiciones de succión a las condiciones de descarga y este puede ser alcanzado a cualquier velocidad, las velocidades tienden a ser bajas y las presiones desarrolladas tienden a ser muy grandes en comparación con las dimensiones físicas de las bombas, de modo que no hay problemas debido a la elevación de la succión y los sistemas de descarga. Las bombas de desplazamiento positivo se subdividen en bombas de embolo alternativo y bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas.

En la división de bombas volumétricas rotativas se encuentran las bombas de tornillo, estas pueden ser de uno o múltiples tornillos como se puede observar en la

Figura 2.1, su principio de funcionamiento es un tornillo helicoidal excéntrico que se mueve dentro de una camisa generando altas presiones con un gran volumen del fluido, impulsando el fluido hacia la descarga de la bomba.

Estas bombas suelen ser utilizadas dentro de la industria petrolera y petroquímica, debido a su gran confiabilidad y eficiencia. Hoy en día una bomba rotativa de tornillo de alto rendimiento, de tres tornillos, puede generar presiones mayores a los 30 MPa. y manejar volúmenes de aproximadamente 12.500 litros. Mientras que la bomba rotativa de dos tornillos puede llegar a generar presiones de 10 MPa, con un flujo volumétrico de hasta 70.000 litros, pudiendo manejar fluidos corrosivos y fluidos con partículas suspendidas con una eficiencia excelente.

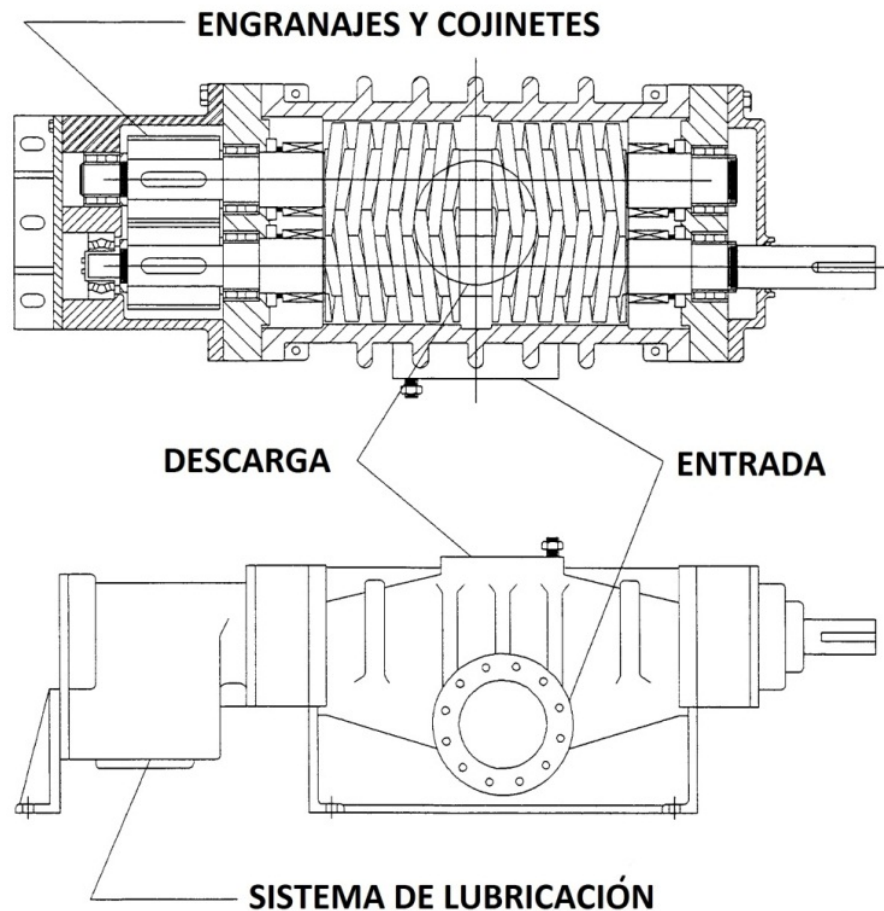


Figura 2.1 Bomba rotativa de dos tornillos. (Krassik, Messina, Cooper, & Heald, 2001)

2.2. SOLDADURA POR ARCO CON ALAMBRE Y PROTECCIÓN GASEOSA (GMAW)

2.2.1. Soldadura

La (ASM international, 1993) define a la soldadura como un método de trabajo que tiene por objeto unir los metales, a través de técnicas razonablemente económicas, para que la unión tenga propiedades físicas y químicas adecuadas al trabajo que desempeñará la pieza y que éstas sean compatibles con las del metal base. En términos generales la soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, usualmente logrado a través de la fusión.

Dependiendo del proceso de soldadura se usan distintas fuentes de energía que pueden incluir una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un rayo de electrones, procesos de fricción o ultrasonido, caracterizándose por la ocurrencia simultánea de una amplia variedad de fenómenos asociados a transferencia de calor, cambios de estado, contracción y dilatación térmica, electricidad, deformación plástica, etc.

2.2.2. Procesos de Soldadura

En los últimos años, debido a las necesidades de producción, nuevas aleaciones y nuevas tecnologías, se han desarrollado nuevos procesos de soldadura y muchos otros han evolucionado, pero siempre teniendo en común ciertas características. Esto es que hay ciertos elementos los cuales deben ser provistos en el proceso, en orden a que estos sean capaces de producir soldaduras satisfactorias. Estas características incluyen una fuente de energía para proveer calentamiento, los medios de protección del metal fundido de la atmósfera, y el metal de aporte (opcional con algunos procesos). Los procesos difieren de uno a otro porque disponen estas mismas características o elementos en varias formas. La American Welding Society (AWS) ha esquematizado los procesos de soldadura y procesos afines según las características o elementos que influyen en el proceso de unión o de corte, Figura 2.2.

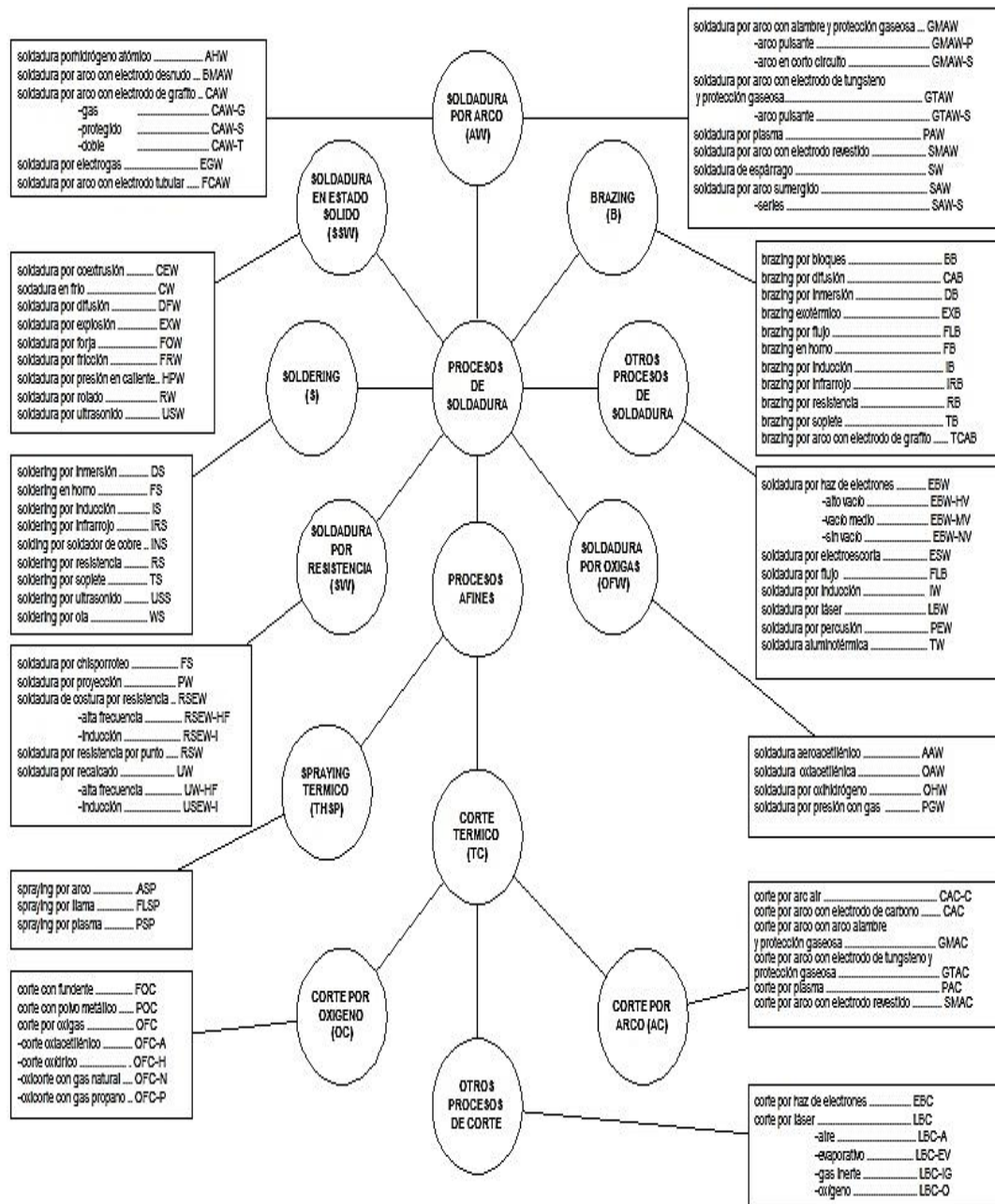


Figura 2.2 Procesos de soldadura según AWS. (American Welding Society Inc., 1997)

Es difícil simplificar este esquema, pero es posible hacer una clasificación consistente en dos grandes grupos:

2.2.2.1. Soldaduras por presión o en fase sólida:

Caracterizadas por que la eliminación o desplazamiento de las capas de óxido y consiguiente unión estrecha entre los átomos se obtiene por la deformación de las superficies en contacto.

Se subdividen en:

a) Soldaduras en frío:

Donde la deformación es efectuada a temperatura ambiente. Son ejemplos típicos de este tipo, la soldadura por presión o por forja en frío y la soldadura por explosión.

b) Soldaduras en caliente:

En donde las piezas son calentadas para aprovechar el incremento en la ductilidad y disminución de las propiedades mecánicas que sufren los metales con el incremento de la temperatura. Son ejemplos de este tipo, la soldadura por forja y la soldadura por fricción.

2.2.2.2. Soldaduras por fusión o en fase líquida:

Caracterizadas por que la remoción de los óxidos contempla que el material a ser unido, conocido como material base o el material de aporte o ambos alcancen el estado líquido como consecuencia del incremento de la temperatura de la unión.

Estos procesos se subdividen en:

a) Por fusión del metal base:

En donde el metal base y generalmente el material de aporte, alcanzan el estado líquido. Son ejemplos de este tipo de soldadura la soldadura por arco eléctrico en todas sus formas, por termita, a gas, etc.

b) Por fusión del material de aporte:

Donde exclusivamente el material de aporte alcanza el estado líquido. Los representantes más conocidos de este tipo de proceso son la soldadura blanda o soldering y la soldadura dura o brazing.

2.2.3. Soldeo por GMAW.

La sociedad americana de soldadura AWS (American Welding Society) designa al proceso de soldadura al arco con protección gaseosa y electrodo consumible en forma de alambre con las siglas, “**GMAW**”, **Gas Metal Arc Welding** o Microwire. Además también se conoce como soldadura **MIG** (**Metal Inert Gas**) o soldadura **MAG** (**Metal Active Gas**), dependiendo del tipo o mezclas de gases que se emplean en la protección del arco eléctrico. En el proceso GMAW, la transferencia del metal se realiza a través del arco eléctrico al material base, desde un alambre alimentado en forma continua y que se encuentra dentro de una atmósfera protectora que cubre al arco eléctrico y al metal fundido a fin de evitar el contacto con el aire, el fundamento del proceso se indica en la Figura 2.3, muchos metales pueden ser soldados por este proceso en forma manual, semiautomático o automático, seleccionando los diferentes parámetros y variables que intervienen en el proceso de soldadura.

2.2.4. Equipo y Parámetros del Proceso de Soldadura GMAW

El proceso de soldadura GMAW y sus partes componentes se muestran en la Figura 2.4, el comportamiento del arco, la forma de la transferencia metálica, el perfil del cordón y sobre todo la calidad de la soldadura están condicionados por una serie de parámetros que controlan la soldadura en función del material, espesor y posición de soldadura. El conocimiento y control de estas variables son esenciales para producir soldaduras satisfactorias. Estos parámetros no son completamente independientes y cambian de acuerdo a los requerimientos de las otras variables. La combinación entre ellas proporciona los diferentes modos de transferencia.

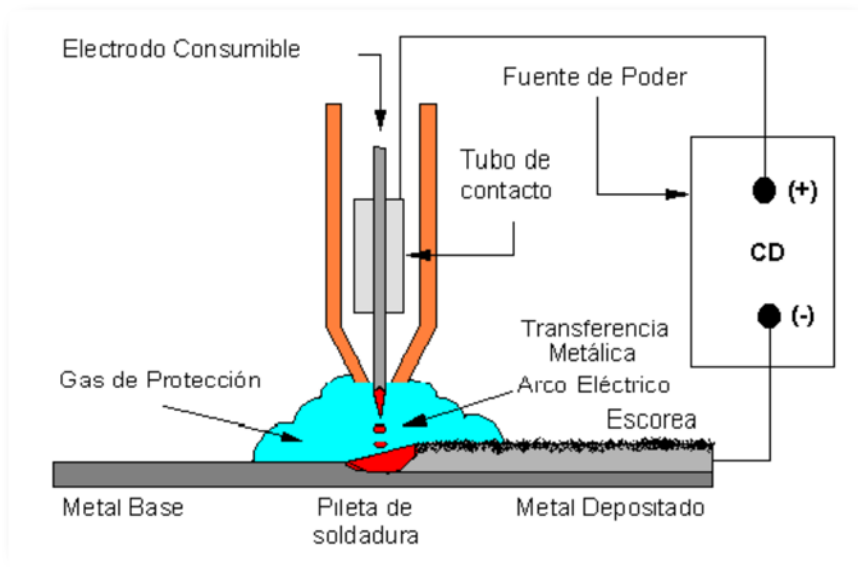


Figura 2.3 Proceso de Soldadura GMAW.

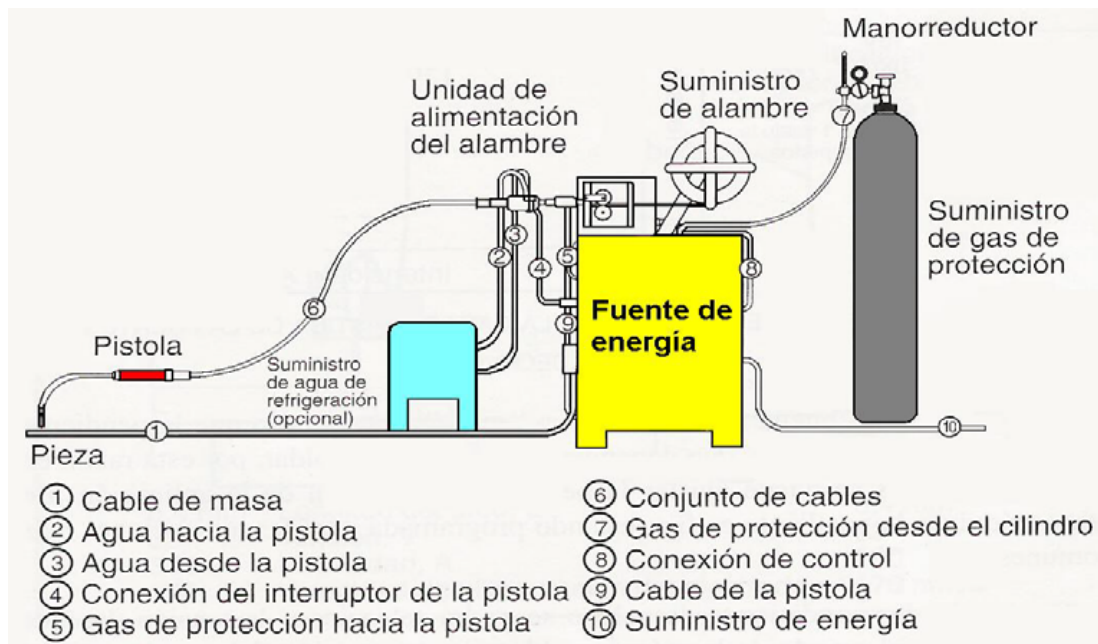


Figura 2.4 Partes y Componentes de un equipo de soldadura GMAW.

El proceso de soldadura GMAW es normalmente controlado por los parámetros que pueden depender del equipo y del operador Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros de Soldadura GMAW.

Dependientes del Equipo	Dependientes del Operador
Tensión o longitud de arco	Velocidad de avance
Velocidad de alimentación del alambre	Tipo de gas protector
Intensidad de corriente	Inclinación de la pistola
	Longitud libre de del alambre

En la Figura 2.5, se puede observar cómo influyen los parámetros en la geometría y penetración del cordón de soldadura.

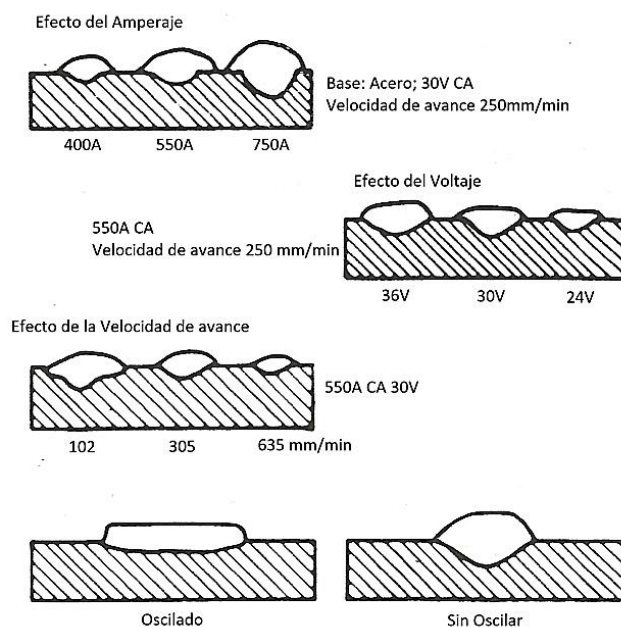


Figura 2.5 Efecto de los parámetros de soldadura en cordón y penetración. (The Welding Institute, 1980)

2.2.5. Ventajas y Limitaciones del Proceso GMAW

Según la AWS el uso del proceso de soldadura GMAW o MIG/MAG, está regido por sus respectivas ventajas y limitaciones, a continuación se mencionaran las más importantes:

2.2.5.1. Ventajas

- Es el único proceso de electrodo consumible que permite soldar una amplia gama de metales y aleaciones comerciales con buena calidad y alto rendimiento.
- La soldadura puede ser realizada en cualquier posición con el adecuado modo de transferencia del metal.
- El suministro del electrodo es continuo y puede ser automatizado, con lo que el material de aporte proporciona altas tasas de deposición, aumentando la productividad y la tasa de deposición, reduce las pausas en el proceso y los costos de operación.
- La ausencia de escoria reduce la limpieza posterior al proceso de soldadura.
- Se puede realizar soldaduras largas sin que existan empalmes entre cordones y en cualquier posición con el adecuado modo de transferencia del metal de aporte. Muy versátil para soldar láminas delgadas, raíz de tubos y otras operaciones.
- El proceso GMAW ofrece versatilidad y eficiente operación en la unión de muchos metales y de diferentes espesores.
- Buena seguridad e higiene con poca producción de humos, polvos y salpicaduras.

2.2.5.2. Limitaciones

- Es difícil de utilizar en espacios restringidos, requiere conducciones de gas y de agua de refrigeración, tuberías, botellas de gas de protección, por lo que no puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
- Debido a que el gas protector puede ser dispersado por corrientes de aire, debe soldarse en ambientes tranquilos para evitar la formación de porosidades.
- Debido al pequeño diámetro del alambre y el bajo suministro de calor hacia la placa, puede provocar una falta de fusión bajo ciertas condiciones (solapamiento).
- Debido al nivel de la radiación luminosa, calor e intensidad producida por el arco algunos operadores se sienten incómodos, sobre todo en áreas aisladas.
- Hay limitaciones en los materiales de aporte, el equipo es más difícil de transportarse complejo y costoso.

2.2.6. Transferencia metálica de soldadura

El modo de transferencia metálica determina una serie de factores que influyen en la soldabilidad tales como la generación de salpicaduras, forma del cordón, soldadura en diversas posiciones, velocidad de fusión, penetración y la energía transferida que puede generar transformaciones en el estado sólido. De acuerdo a lo indicado por Lancaster y el Instituto Internacional de Soldadura (IIW), las características del proceso GMAW son descritas en términos de los diferentes métodos o modos de transferencia metálica, (el metal se transfiere del electrodo a la pieza); entre ellos están los procesos comandados por la tensión o voltaje constante (CV) y las fuentes con método avanzado en el control en la forma de la onda de la corriente, los más comunes son: Transferencia de arco corto o cortocircuito; Transferencia arco rociado o spray; Transferencia globular y Transferencia por arco pulsado. Lesnewich, Lancaster y otros, demostraron que el modo de transferencia metálica es determinado por una serie de parámetros como los mostrados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros en la transferencia metálica de soldadura.

Magnitud y tipo de corriente de soldadura	Gas de protección
Longitud libre del electrodo	Composición del electrodo
Diámetro del alambre o electrodo	Fuerzas que actúan sobre el arco

En la Figura 2.6, se esquematizan las distintas formas de transferencia para la soldadura por arco con protección gaseosa GMAW. Los mecanismos involucrados en la transferencia metálica, indicados por Liu y Choi, dependen del resultado de un balance de fuerzas y de la inestabilidad en la columna del metal líquido. Lancaster, Kim y Eagar han hecho un análisis de las fuerzas que actúan en la transferencia metálica, entre las cuales ellos indican que están las fuerzas gravitacionales o de peso, fuerzas debido a la tensión superficial de la gota y del baño líquido, fuerzas de origen electromagnético (efecto “pinch”) y aerodinámicas (flujo de gas y/o vapores), fuerzas por micro explosiones de los gases y vapores, fuerzas debido al campo magnético y por las actuaciones mecánicas sobre el electrodo así como las características del arco

y de los gases de protección. Del balance de fuerzas y parámetros, se concluye que el desprendimiento y traslado de las gotas se produce si las fuerzas electromagnéticas, controladas por la corriente, son mayores a las fuerzas que retienen la gota en la punta del electrodo, tales como la tensión superficial.

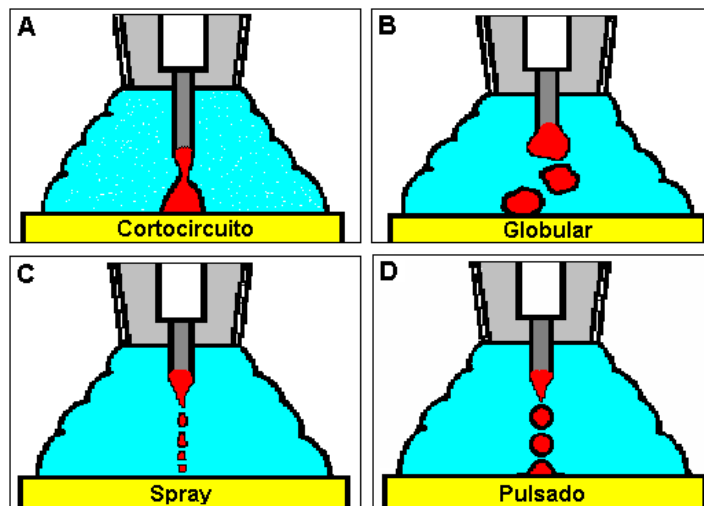


Figura 2.6 Formas de Transferencia Metálica.

2.2.6.1. Transferencia por Arco Corto o Cortocircuito

En esta forma de transferencia, que se muestra en la Figura 2.6.A, el extremo del alambre se funde formando una gota que se va alargando hasta el momento en que toca al metal base y, a causa de la tensión superficial, se corta la unión con el alambre. Según Choi en el momento de establecer contacto con el metal base se produce un cortocircuito, aumenta la intensidad y como consecuencia, las fuerzas axiales rompen el cuello de la gota y simultáneamente se reanuda el arco. Para que un arco se comporte de ésta forma es necesario que el alambre se encuentre conectado al polo positivo (polaridad inversa), que la densidad de corriente y la tensión de arco sean bajas y que el gas de protección sea una mezcla de Argón con un gas activo (O_2 , CO_2). El metal es transferido del electrodo a la pieza solo durante el período cuando el electrodo está en contacto con el “charco” de soldadura. Este tipo de transferencia produce un “charco” de soldadura pequeña y de rápida solidificación, deseable para soldadura fuera de posición. La soldadura con transferencia por cortocircuito es usada

principalmente en aceros de bajo o mediano carbono, y aceros de baja aleación y alta resistencia. Como la transferencia metálica ocurre sólo durante el cortocircuito, la composición del gas de protección tiene un efecto significativo sobre la tensión superficial del metal fundido. Cambios en la composición del gas de protección influyen en el tamaño de la gota y la duración del corto circuito. Adicionalmente el tipo de gas afecta las características de operación del arco y la penetración del metal base. La soldadura por cortocircuito puede usarse en todas las posiciones, para unir secciones delgadas de metal en posiciones vertical, horizontal y sobre cabeza, para rellenar aberturas de raíz grande y en aplicaciones de metales ferrosos y no ferrosos. Se usa en aplicaciones de soldaduras de planchas.

2.2.6.2. Transferencia por Arco Globular

Cuando se opera con transferencia globular, Figura 2.6.B, el alambre se va fundiendo y se van generando gotas gruesas, de un diámetro hasta tres veces mayor que el del electrodo. Al mismo tiempo, la gota al desprenderse oscila de un lado para otro y es fácilmente atraída por la fuerza de gravedad. El arco es inestable, de poca penetración, produce numerosas proyecciones o salpicaduras cuando se encuentra conectado al polo negativo (polaridad directa) y la densidad de corriente es inferior al arco spray, su empleo es poco recomendable. Por otra parte, Choi indican que la transferencia globular tiene lugar cuando la corriente es relativamente baja, siendo indiferente al tipo de gas de protección. Sin embargo, con dióxido de carbono y helio, este tipo de transferencia tiene lugar en todas las corrientes de soldaduras. Generalmente este tipo de transferencia está limitado a soldadura plana. En este modo la transferencia la forma de la gota o glóbulo es de gran tamaño y provoca gran cantidad de salpicaduras, que pueden ser reducidas mediante el uso de CO₂ como gas de protección.

2.2.6.3. Transferencia por Arco de Rociado o “Spray”

La transferencia del metal por arco de rociadura o escurrimiento axial, como se indica en la Figura 2.6.C, se realiza a través de gotas muy finas, con un tamaño

menor que el diámetro del alambre o electrodo. Las gotas son dirigidas axialmente en línea recta del electrodo al “charco” de soldadura y la pulverización del metal se lleva a cabo en forma interrumpida. El arco es muy estable y suave, se caracteriza por un cono de proyección muy luminoso y por un ruido característico, genera pocas salpicaduras y cordones con superficies relativamente lisas. Para que un arco se comporte de esta forma también es necesario que el hilo se encuentre conectado al polo positivo CD (+) o polaridad inversa, que la tensión de arco sea relativamente alta y con una elevada densidad de corriente. El efecto de la polaridad inversa se traduce en una enérgica acción de limpieza sobre el baño de fusión. La penetración que se consigue es buena, por lo que se recomienda para soldar piezas de mediano espesor. El baño de fusión resulta relativamente grande y fluido, por lo que no se controla con facilidad en posiciones difíciles. El modo de transferencia “Spray” puede ser usado para soldar casi cualquier metal o aleación por las características inertes de la protección de argón. Sin embargo la aplicación de este proceso a láminas delgadas se hace difícil por las altas corrientes (150 a 500 A) y voltaje (24 a 40 V) necesarios para producir un arco spray. Las fuerzas resultantes pueden fundir las láminas en vez de soldarlas. Los gases inertes favorecen este tipo de transferencia metálica. Se consiguen grandes tasas de deposición y rentabilidad (Iordachescu & Quintino, 2008).

2.2.6.4. Transferencia por Arco Pulsado

La transferencia por arco pulsado es una variante del sistema de transferencia “Spray”, con el compromiso de formar gotas del tamaño del diámetro del electrodo, tal como se indica en la Figura 2.6.D. En este modo de transferencia es necesario mantener constante la longitud del arco, la cual se alcanza ajustando la velocidad de alimentación con la tasa de fusión. Para lograr este modo de transferencia la corriente directa DC se divide en dos niveles que se alternan sin interrumpirse, una de baja intensidad llamada de corriente de base, cuyo objetivo principal es mantener el arco y otra de elevada intensidad llamada corriente de pico o de pulso, la cual proporciona al alambre la energía necesaria para su fusión y proyección de la gota hacia el metal

fundido sin generar salpicaduras. Cuando se suelda con corriente pulsada el arco puede operar con menores valores de corriente y como consecuencia la energía aportada a la pieza durante la soldadura es menor. En la corriente pulsada, se debe obtener una correlación entre todas las variables del pulso, así como, la corriente y el tiempo del pulso, la corriente y el tiempo de base, para establecer el equilibrio entre las velocidades de alimentación y la velocidad de fusión del alambre con el objeto de generar una gota por pulso y garantizar estabilidad en el arco.

2.2.7. Gases de Protección

El objetivo fundamental y función principal del gas de protección es desplazar e impedir que el aire de la atmósfera circundante entre en contacto con el metal de soldadura fundido. Esto es necesario porque la mayor parte de los metales, al fundirse y en contacto con el oxígeno y nitrógeno del aire, tienden a reaccionar y pueden formar óxidos y/o nitruros. Además el oxígeno reacciona con el carbono del acero para formar monóxido y dióxido de carbono. Estos productos pueden causar pérdidas de ductilidad en el metal de soldadura, escorias atrapadas y gases atrapados o porosidades. Por estas razones, las soldaduras metálicas con protección gaseosa emplean gases inertes para proteger al metal de soldadura del aire.

El soldeo se denominará MAG cuando se utilicen gases activos y MIG cuando se utilicen los inertes. En general, se utilizan los gases inertes para el soldeo de los materiales no férreos y aceros inoxidable, utilizándose el CO₂ puro solamente con los aceros al carbono; las mezclas de (Argón + CO₂) y (Argón + Oxígeno) se aplican también al soldeo de aceros y en muchos casos para aceros inoxidables. Cuando sólo se utiliza CO₂ no se puede obtener una transferencia en spray. Una de las mezclas más utilizadas en el soldeo MAG es Argón + (8-10%CO₂), utilizándose generalmente con transferencia spray. Las mezclas Argón + CO₂, con un porcentaje de este último mayor o igual al 25%, se utilizan para transferencia en cortocircuito en el soldeo de aceros al carbono y de baja aleación. Con arco pulsado se utilizan mezclas de argón y dióxido de carbono (generalmente con un 5% de CO₂), o mezclas de Argón, Helio y CO₂. Con un caudal de gas muy bajo la cantidad de gas de protección es insuficiente.

Con un caudal de gas muy alto puede haber turbulencias y formación de remolinos en el gas. El caudal de gas dependerá en gran medida del tipo de material base. Para obtener una buena protección el ángulo de trabajo no debe ser mayor de 10 a 20°. El tubo de contacto debe estar centrado en la boquilla y las proyecciones depositadas en la tobera de gas y en la boquilla de contacto deben retirarse regularmente (Ignoto, 2011).

2.2.7.1. Características de los gases de protección en soldadura GMAW

a) Argón (Ar):

- Eficiente protección debido a su alta densidad. El argón es 1,4 veces más pesado que el aire, lo que significa que tiende a cubrir bien el área de soldadura en contraposición al helio que es mucho más ligero que el aire.
- El argón posee una baja energía de ionización, lo que facilita el cebado y origina arcos estables y tranquilos con pocas proyecciones. Esta cualidad es particularmente importante en el soldeo con corriente alterna.
- Al tener una energía de ionización reducida, necesita tensiones reducidas y produce, consecuentemente, arcos poco enérgicos, con aporte de calor reducido, resultando idóneo para el soldeo de piezas de pequeños espesores.
- Es un gas que se puede considerar económico ya que es de menor costo que el argón.
- Forma del cordón y penetración. El argón tiene una conductividad térmica más baja que el helio, por lo que el calor se concentra en la zona central del arco produciendo penetraciones de aspecto característico y similar al representado en la Figura 2.7.

b) Helio (He):

- Potencial de ionización elevado.
- Alta conductividad por lo que la columna de plasma es ancha.
- Muy baja densidad.
- Aporte térmico muy elevado.
- Se obtienen cordones anchos y de gran penetración.
- Se puede realizar el soldeo a gran velocidad.
- Soldero de grandes espesores.
- Soldero automatizado donde se puedan emplear grandes velocidades.

- Soldeo de materiales de gran conductividad, por ejemplo el cobre, reduciéndose la necesidad de precalentamiento.
- Poca estabilidad del arco en comparación con el argón.
- Debido a su baja densidad se requiere que el caudal sea muy elevado para una correcta protección, por lo tanto no suele resultar muy económico. En general el caudal debe ser de 2 a 2,5 veces el requerido con argón.
- En muchas ocasiones se añade helio al argón para aumentar el aporte térmico y la penetración.

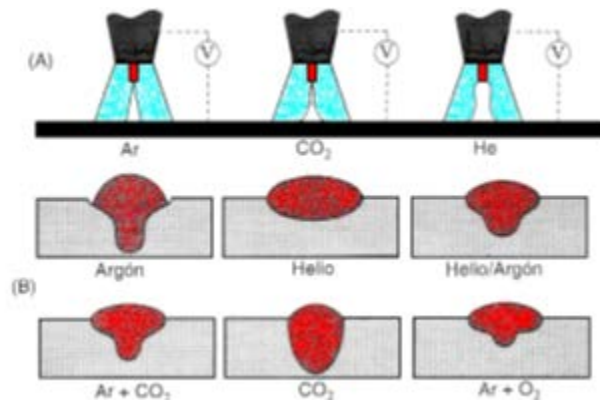


Figura 2.7 (A) Forma de la Columna de Plasma y. (B) Penetración del Cordón de Soldadura Dependiendo del Gas de Protección.

c) Dióxido de carbono (CO₂):

- Es el único gas activo que puede utilizarse como protección, aunque únicamente se utiliza en el soldeo MAG o en el soldeo FCAW (tanto puro como mezclado).
- Bajo costo.
- Gran penetración.
- Alta velocidad de soldeo.
- Se producen gran cantidad de salpicaduras.
- No se puede conseguir transferencia "spray", únicamente se puede conseguir transferencia globular o en cortocircuito.
- La superficie de los cordones queda ligeramente oxidada.
- Normalmente se utiliza mezclado con argón para disminuir los inconvenientes del CO₂.

d) Adiciones de Oxígeno (O₂):

- Solamente se utiliza como aditivo del argón en el soldeo MAG y FCAW. La adición de pequeñas cantidades de oxígeno:
- Estabiliza el arco.

- Permite conseguir transferencia en "spray" con intensidades más bajas.
- Aumenta la cantidad de gotas de metal de aportación formadas.
- Mejora el aspecto del cordón.
- Consigue un baño de fusión más fluido.
- No se puede utilizar en grandes cantidades (normalmente nunca superiores al 8%) porque se produciría la oxidación del metal fundido.

e) Adiciones de Hidrógeno (H_2):

- Normalmente solo se utiliza como aditivo del argón (hasta el 5% de hidrógeno), para el soldeo TIG o plasma.
- Aumenta el aporte térmico.
- Permite aumentar la velocidad de desplazamiento.
- Aumenta la anchura y penetración del cordón de soldadura.
- Nunca se debe utilizar para el soldeo de aceros al carbono, de baja aleación, ni para aceros inoxidable ferríticos, ya que en estos materiales el hidrógeno puede producir fisuras.

f) Adiciones de Nitrógeno (N_2):

- A veces se añade nitrógeno al argón en el soldeo por plasma, soldeo TIG y en el soldeo MAG.
- No es una adición muy común.
- Suele utilizarse casi exclusivamente en el soldeo del cobre y sus aleaciones.
- Bajo coste.
- Aumenta la penetración y anchura del cordón.
- Aumenta el aporte térmico.

2.2.8. Metalurgia de la soldadura

Una junta soldada está constituida por tres zonas: El cordón de soldadura, la zona afectada por el calor (ZAC), y el metal base no afectado térmicamente. Figura 2.8, la metalurgia de cada una de estas zonas está relacionada con las características del metal base, el metal de aporte y el procedimiento de soldadura utilizado.

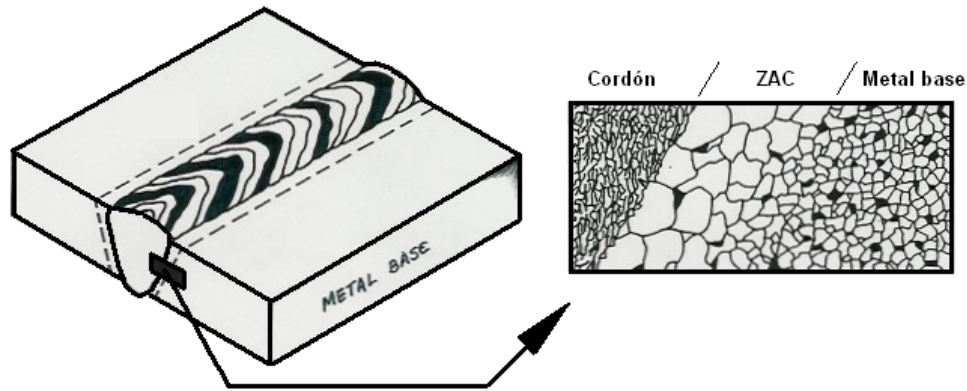


Figura 2.8 Zonas de una Junta Soldada.

2.2.8.1. Cordón de soldadura

Es la región que se ha fundido durante la soldadura, se compone de metal base y metal de aporte; aunque algunas soldaduras se producen sin material de aporte, como es el caso de la soldadura por resistencia eléctrica. La composición química del cordón de soldadura depende del metal base y del material de aporte, así como de la relación entre la cantidad de metal base fundido y el material de aporte (dilución). Adicionalmente, se subdivide en zona fundida mezclada y no mezclada. Elementos tales como el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno pueden aparecer como contaminantes cuando el metal fundido no se protege adecuadamente de la atmósfera.

2.2.8.2. Zona afectada por el calor (ZAC)

Es la zona del material base, que por estar adyacente al metal fundido, es afectada por el calor generado durante la soldadura. Esta zona se define frecuentemente en función de su dureza o de su microestructura. Los fenómenos metalúrgicos (microestructura) que ocurren en esta zona son determinados por los ciclos térmicos que sufre el material. Estos ciclos dependen de la cantidad de calor suministrado durante la soldadura, de la temperatura del metal base antes de iniciar la soldadura, del espesor y de la geometría de la junta a soldar. Mediante el control de los dos primeros factores se puede modificar, en cierta forma, las características de la zona afectada por el calor (ZAC).

2.2.8.3. Metal base

La tercera zona que forma parte de una junta soldada es el metal base. La mayoría de los metales que se usan hoy en día son soldables. La selección de un material que involucra soldadura requiere que se considere su soldabilidad; entendiéndose por soldabilidad la capacidad de un metal o combinación de metales de ser soldados en condiciones de fabricación y comportándose satisfactoriamente en el servicio requerido. Entre los efectos que se producen en el metal base como consecuencia del ciclo térmico están:

- Cambios microestructurales: Dilución o precipitación de fases, crecimiento de grano, etc.
- Variación de las propiedades mecánicas: Resistencia a la fluencia, a la tracción, tenacidad, dureza, etc.
- Disminución de la resistencia a la corrosión.
- Generación de esfuerzos residuales.

2.2.8.4. Factores que influyen en el proceso de soldadura de un material

a) Suministro de calor

El calor suministrado durante la producción de una unión soldada es un factor que afecta las temperaturas y las velocidades de enfriamiento del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor. Al aumentar el suministro de calor, se obtiene mayores temperaturas y menores velocidades de enfriamiento. En ciertas aplicaciones se requiere de un mínimo suministro de calor para prevenir el agrietamiento del material; mientras que en otras, se especifica un máximo para prevenir su ablandamiento; como en el caso de los aceros templados y revenidos, o para prevenir problemas de corrosión en los aceros inoxidables austeníticos. Los factores que determinan la entrada de calor en un procedimiento de soldadura son: La intensidad de la corriente de soldadura, el voltaje de soldadura, y la velocidad de avance. La entrada de calor generalmente se especifica en unidades de energía por unidad de longitud (ejm. Julios/milímetros o Julios/pulgadas).

b) Temperatura del material

La temperatura del metal base, antes de realizar la soldadura influye directamente en la velocidad de enfriamiento de la unión soldada. Al aumentar la temperatura (precalentamiento), las velocidades de enfriamiento disminuyen produciendo ciertos efectos que serán discutidos más adelante.

c) Espesor del material

Al aumentar el espesor del metal base, aumenta la velocidad de enfriamiento del depósito de soldadura y de la zona afectada por el calor. Esto es importante en los aceros microestructurales ya que al aumentar el espesor del metal aumentan las posibilidades de obtener microestructuras duras (Martensita) durante la soldadura de estos materiales, lo cual puede ser perjudicial en servicios donde se requiere tenacidad y ductilidad.

2.2.8.5. Efecto de los Elementos Aleantes:

Existen muchos elementos químicos que dan las características de ingeniería a las aleaciones ferrosas, sin embargo hay algunos que se destacan por sus efectos muy definidos, a continuación se presentan algunos de estos elementos (Palmer & King, 2004)

Carbono (C): Aumenta resistencia mecánica y la dureza, pero reduce la tenacidad. Reduce la soldabilidad. Aumenta la corrosión.

Manganeso (Mn): Aumenta la resistencia mecánica, la dureza, la maquinabilidad, la templabilidad y la resistencia a la abrasión; desoxida el acero fundido y reduce la porosidad, la soldabilidad, el agrietamiento y la formación de sulfuros que pueden causar agrietamiento inducido por hidrógeno; además de utilizarse como desulfurante formando Sulfuro de Manganeso (MnS).

Fosforo (P): Es una impureza (al igual que el Azufre (S)) perjudicial que debe ser reducirlo al mínimo ya que aumentar la fragilidad y agrietamiento y reduce de una manera severa la ductilidad y la tenacidad. El contenido de fósforo en el acero no debería ser superior a 0,05%.

Azufre (S): Junto con el fósforo, el azufre es el elemento más problemático, ya que prácticamente es insoluble en el hierro y se presenta fundamentalmente en forma de sulfuro de hierro (FeS). Está presente en las materias primas usadas en la fabricación del acero, por lo tanto, su presencia en el flujo de producción siderúrgica es inevitable. Aumenta la porosidad, fragilidad y el agrietamiento; reduce la resistencia al impacto y la ductilidad; perjudica la calidad superficial y la soldabilidad. Para evitarlo se utiliza manganeso, favoreciendo la formación de sulfuro de manganeso (MnS) en lugar de sulfuro de hierro (FeS). La formación de sulfuro de manganeso (MnS) atrapa al hidrógeno formando fisuraciones internas. Los sulfuros que emergen a la superficie inician las picaduras.

Silicio (Si): Agregado como desoxidante. Tiene un efecto doble, por un lado como agente efervescente y por otro se puede combinar con el oxígeno disuelto en el acero para disminuir las malas propiedades que este elemento pueda dar al acero ($\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$ (sílice)). Aumenta la resistencia mecánica, la dureza y la resistencia a la corrosión, así como la conductividad eléctrica; reduce la maquinabilidad.

Cobre (Cu): La presencia de cobre permite que las aleaciones puedan ser endurecidas por precipitación, dando una gran resistencia a la tracción y un elevado límite elástico. Mejora la resistencia a la corrosión. En conjunto con el Níquel (Ni) estabiliza y reduce la corrosión.

Cromo (Cr): Aumenta resistencia a la tracción y la dureza. Disminuye la soldabilidad. Tiene un efecto importante en el aumento a la resistencia a la corrosión. En los aceros con un alto contenido en carbono, aumenta la resistencia a la abrasión y al desgaste, si el Cromo es mayor o igual al 12% se convierte en un acero inoxidable.

Molibdeno (Mo): Es un fuerte formador de carburos y aumenta fuertemente la templabilidad de los aceros. Mejora la resistencia mecánica de los aceros a altas temperaturas y reduce la susceptibilidad a la fragilidad de revenido en aceros al Cromo-Níquel. Da dureza secundaria de revenido. Además aumenta la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables en presencia de disoluciones de cloruros y reduce los ataques por picaduras.

Vanadio (V): El Vanadio facilita la formación de grano pequeño y reduce la pérdida de resistencia durante el templeado, aumentando por lo tanto la capacidad de endurecimiento. Así mismo, es un formador de carburos que imparten resistencia al desgaste en aceros para herramientas, herramientas de corte, etc.

Níquel (Ni): Disminuye las temperaturas críticas del acero y aumenta la templabilidad del acero. No tiende a formar carburos. Se pueden obtener aceros resistentes con menos contenido en carbono, incrementándose la tenacidad y la resistencia a la fatiga. Aumenta la ductilidad y la resistencia a la corrosión.

2.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

Los Ensayos No Destructivos en soldadura, tienen dos funciones:

- **Control de la calidad:** el control del rendimiento del soldador, del equipo y de la calidad de los consumibles y materiales bases utilizados.
- **Aceptación o rechazo de la soldadura:** basándose en la idoneidad para el propósito bajo las condiciones de servicios impuesta a la estructura.

El método apropiado de inspección es diferente para cada función. Si la evaluación es una opción viable, las discontinuidades pueden ser detectadas e identificadas, así como su medida, orientación, lo cual limita la examinación no destructiva a una técnica volumétrica.

En la elección del método, hay que tener en cuenta la naturaleza del material, su estado estructural, es decir, los procesos de elaboración a los que ha estado sometido, tamaño y forma del producto, así como, tener conocimiento de las discontinuidades, que se pretenden detectar ya que todos los métodos presentan limitaciones de interpretación, debido a la geometría y a la naturaleza del material, así como, limitaciones en el campo de observación, y en la velocidad de aplicación que permite el ensayo.

A continuación se nombrarán los métodos de ensayos no destructivos más comunes y de más amplia utilización en la industria.

Los métodos más usados de END son:

- Inspección visual (VT).
- Líquidos penetrantes (PT).

- Partículas magnéticas (MT).
- Ultrasonido Industrial (UT).
- Radiografía Industrial (RT).

2.3.1. Inspección visual (VT)

Para muchas soldaduras no críticas, la integridad es verificada principalmente por inspección visual. Es el primer y más antiguo ensayo no destructivo aplicado en cualquier tipo de pieza o componente industrial. Está frecuentemente asociado a otros ensayos de materiales. Constituye una parte importante en la práctica del control de calidad, ampliamente utilizada para detectar discontinuidades. La inspección visual es simple, rápida y relativamente económica, además puede y debe ser usada antes, durante y después de la soldadura. La técnica permite chequear los siguientes aspectos: Forma y dimensión del cordón, defectos superficiales tales como grietas, rugosidad, salpicaduras, socavaduras, pliegues, y limpieza superficial.

Además se debe conocer cómo cambia el aspecto del cordón de soldadura en función de las variaciones que experimenta la longitud de arco. Arcos largos, aunque se apliquen con intensidades y velocidades adecuadas, pueden producir porosidades, inclusiones y penetración irregular. Las tensiones bajas y altas producen idénticos efectos que sus inversos, o sea, intensidades altas y bajas. La Figura 2.9, muestra aspectos superficiales debido a las diferentes técnicas de soldadura.

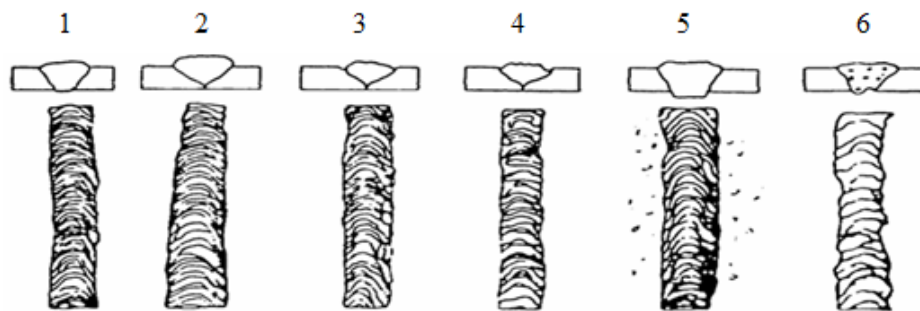


Figura 2.9 Aspectos Superficiales en la Soldadura.

- 1- Intensidad, velocidad y arco normales: contorno uniforme y buena penetración.
- 2- Intensidad normal y velocidad lenta: sobreepesor elevado y baja penetración.

- 3- Intensidad baja y velocidad normal: cordón estrecho, ondas no uniformes y socavaduras.
- 4- Intensidad normal y velocidad alta: ondas no uniformes, socavaduras y baja penetración.
- 5- Intensidad alta y velocidad normal: ondas alargadas, salpicaduras, penetración excesiva y socavaduras.
- 6- Intensidad normal y arco largo: penetración desigual, porosidad e inclusiones.

La inspección visual de soldaduras parece indicar que uno debe limitarse a estudiar detenidamente la superficie de la soldadura terminada para evaluar su calidad. Pero la inspección visual, ejecutada correctamente, es un ejercicio detallado que significa mucho más.

La inspección visual comienza cuando el material llega a los almacenes, continúa durante todo el proceso de soldeo y termina cuando el inspector examina el equipo acabado, marca las zonas a reparar y completa su informe de inspección.

Aplicada conscientemente por personal experimentado, la inspección visual de soldaduras identifica materiales que incumplen su especificación; facilita la corrección de defectos durante el proceso de fabricación para evitar su rechazo posterior y reduce la necesidad de END posteriores.

La inspección visual es, sin ninguna duda, el ensayo no destructivo más empleado. Las razones fundamentales de su empleo pasan por su sencillez; facilidad de utilización; rapidez de ejecución, y economía de su aplicación. A pesar de su simplicidad, jamás deberá ser olvidado; inclusive cuando está prevista la ejecución de otros ensayos más sofisticados siempre deberá efectuarse una inspección visual como fase previa. Esto nos facilitará el trabajo posterior, y, en numerosas ocasiones, será elemento determinante para todo el proceso.

2.3.2. Ultrasonido industrial (UT)

El ensayo por ultrasonido es un método de inspección que usa ondas sonoras de alta frecuencia, las ondas sonoras viajan a distintas velocidades en los distintos materiales. Sin embargo, la velocidad de propagación del sonido en un material dado, es un valor constante para ese material. Hay varias formas en las que el sonido viaja a

través de un material, pero esta distinción no es de importancia para una discusión a este nivel. Un tipo de onda sonora, llamada longitudinal, viaja a una velocidad de 340 m/s (1100 pies/s) en el aire, alrededor de 5790 m/s (19000 ft/s) en acero y alrededor de 6100 m/s (20000 pies/s) en aluminio.

El haz de energía ultrasónica (ondas situadas en la gamma de 0,2 MHz a 25MHz) es introducido en la pieza a ser ensayada; este haz viaja a través del material con solo una pequeña pérdida, excepto cuando es interceptada y reflectada por una discontinuidad o por un cambio de material. Los ensayos por ultrasonido usan energía eléctrica en la forma de voltaje aplicado, y este voltaje se convierte por un transductor en energía mecánica y en la forma de ondas sonoras. El transductor realiza esta conversión de energía debido al fenómeno conocido como efecto “piezoeléctrico”. Esto ocurre con distintos materiales, tanto los que ocurren naturalmente como los realizados artificialmente; cuarzo, titanio y bario son ejemplos de materiales piezoeléctricos de cada tipo. Un material piezoeléctrico producirá un cambio mecánico en la dimensión cuando se excita con un pulso eléctrico. De igual forma, este mismo material producirá un pulso eléctrico cuando se actúa sobre él en forma mecánica.

Para realizar el ensayo por ultrasonido, se fija el transductor a una unidad base electrónica. Siguiendo una secuencia de arranque y procedimiento de calibración, la unidad base actúa como un dispositivo de medición electrónico. Esta máquina generará pulsos electrónicos precisos que son transmitidos por un cable coaxial hasta el transductor que fue colocado en contacto acústico con el objeto de ensayo. Los pulsos son de muy breve duración y alta frecuencia (típicamente 1 a 10 millones de Hz, o ciclos por segundo). Este sonido de alta frecuencia tiene la capacidad de ser dirigido con precisión, similarmente a la luz de un flash.

Cuando se excita por pulsos electrónicos, el transductor responde con una vibración mecánica, y crea una onda sonora que se transmite a través del objeto de ensayo a la velocidad que sea típica del material. Se puede escuchar un fenómeno similar cuando un metal es golpeado con un martillo para dar un sonido. Este sonido es una onda sonora (menor frecuencia) que viaja a través del metal.

La onda sonora generada continuará viajando a través del metal a una velocidad dada y retornará al transductor cuando encuentre algún reflector, tal como un cambio de densidad, y sea reflejado. Si este reflector está orientado apropiadamente, rebotará el sonido de retorno hacia el transductor a la misma velocidad y contactará al transductor. Cuando es impactado por dicha onda sonora que retorna, el cristal piezoeléctrico convertirá esta energía sonora nuevamente en pulsos electrónicos que son amplificados y pueden ser mostrados por el tubo de rayos catódicos [TCR (CRT)] como una indicación visual a ser interpretada por el operador (Llanos & Constant, 2000).

Usando los bloques de calibración Figura 2.10, que tienen una densidad, dimensiones, y perfil especificado, la unidad de ultrasonido puede ser calibrada para medir el tiempo que toma al sonido la trayectoria del viaje, y convertir dicho tiempo en dimensión de la pieza. Por esto el equipo de ultra sonido permite al operador medir cuanto lleva al sonido viajar a través de un material hasta un reflector, y retornar hacia el transductor, del que puede generarse la información sobre la dimensión como la distancia del reflector debajo de la superficie, y su tamaño.

En general, la representación en la pantalla provee al operador con dos tipos de información. Primero, las indicaciones aparecerán en varias ubicaciones a lo largo del eje horizontal de la pantalla. (Siempre habrá una indicación, llamada ‘indicación del eco de la interfase eco inicial, que se ubicará cerca del lado izquierdo de la pantalla.) Cuando el sonido entra a una pieza y rebota desde un reflector volviendo al transductor, su retorno es indicado por una señal que crece verticalmente de la línea horizontal. En segundo lugar la altura de la señal puede medirse y da una medida relativa de la cantidad de sonido reflejado.

Una vez que se calibró el instrumento, la ubicación de la indicación del reflector en el eje horizontal puede ser relacionada con la distancia física que ha viajado el sonido en la pieza para llegar al reflector. La altura de esa señal en la pantalla es una indicación relativa del tamaño del reflector. Usando dicha información, el operador experimentado puede determinar frecuentemente La

naturaleza y tamaño del reflector y relacionarlo con un código o especificación para aceptabilidad o rechazo.

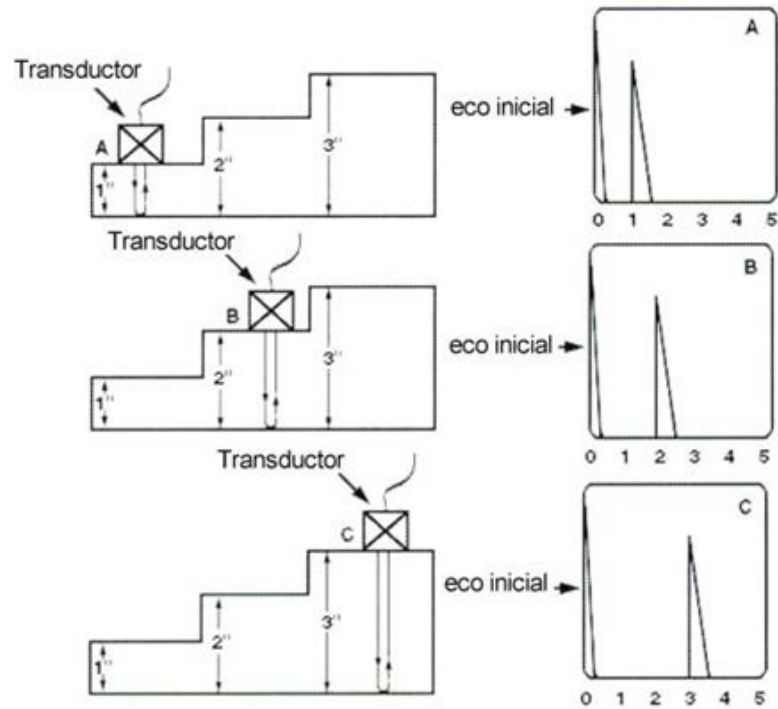


Figura 2.10 Secuencia de Calibración para Transductor de Haz Longitudinal.

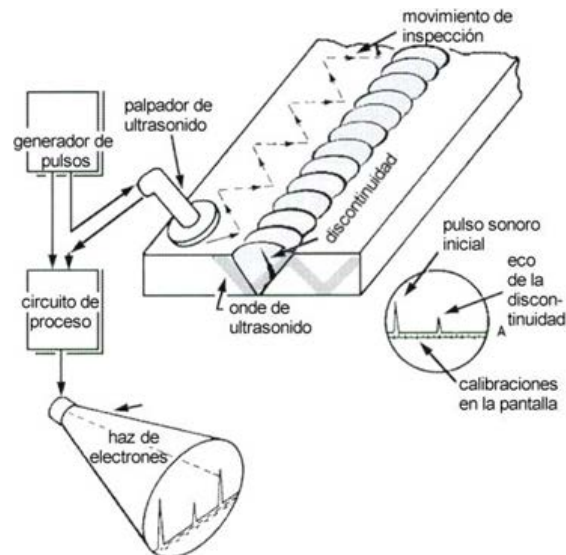


Figura 2.11 Reflexión del Sonido desde una Discontinuidad.

Hay dos tipos de transductores de ultrasonidos básicos: ondas longitudinales (transductores de haz recto) se usan para determinar la profundidad de una discontinuidad debajo de la superficie del material. Estos transductores transmiten el haz dentro de la pieza en forma perpendicular a la superficie de la pieza, como se muestra en la Figura 2.11, ondas transversales shear (transductores con haz en ángulo) se usan en forma extensiva para la evaluación de soldadura debido a que envían el haz dentro de la pieza en ángulo, permitiendo que el ensayo se realice sin remover el sobre espesor áspero de la soldadura. Muy frecuentemente el transductor de haz longitudinal se fija a una cuña de plástico que provee el ángulo necesario. La Figura 2.12, muestra cómo se propaga el sonido a través del material cuando se usa un haz en ángulo.



Figura 2.12 Propagación de un Haz en Angulo.

Hay dos tipos de ensayos ultrasónicos, de contacto e inmersión. En el ensayo por contacto, el transductor es ubicado contra la superficie de la pieza. Debido a que el sonido de alta frecuencia no se transmite fácilmente a través del aire, se coloca un líquido entre la pieza a ensayar y el transductor para mejorar el contacto. El líquido se conoce como “medio acoplante”. En el ensayo por inmersión, la pieza a ser evaluada se ubica bajo el agua y se transmite el sonido desde el transductor y hacia la pieza a través del agua. El ensayo de contacto tiene la ventaja de ser portátil, mientras que el de inmersión es más conveniente para el ensayo de producción de piezas pequeñas o de formas irregulares.

Las aplicaciones del ensayo por ultrasonido incluyen tanto la detección de discontinuidades superficiales o sub-superficiales. Este método es más sensible para discontinuidades planares, especialmente aquellas que están orientadas en forma

perpendicular al haz sonoro. Por este método se pueden detectar laminaciones, fisuras, falta de fusión, inclusiones y agujeros. Pueden realizarse también mediciones de espesor.

Uno de los principales beneficios del ensayo por ultrasonido es que se considera como un ensayo verdaderamente volumétrico. Esto es, que es capaz de determinar no sólo la ubicación en longitud y lateral, sino que también provee al operador con una determinación de la profundidad de la discontinuidad debajo de la superficie. Otra mayor ventaja de ensayo por ultrasonido es que sólo requiere acceso de un solo lado del material a ser ensayado. Esta es una gran ventaja en la inspección de recipientes, tanques, y sistemas de cañerías.

Otra ventaja importante es que el ensayo por ultrasonido detecta de mejor manera aquellas discontinuidades planares críticas tales como fisuras y falta de fusión. Debido a que se pueden alcanzar distintos ángulos de haz con cuñas de plexiglás, el ensayo por ultrasonido puede detectar laminaciones, falta de fusión y fisuras que están orientadas de manera tal que no podría hacerse con ensayo radiográfico.

El ensayo por ultrasonido tiene capacidad de penetración profunda, hasta 200 pulgadas en acero, y puede ser muy preciso. Los equipos de ensayo por ultrasonido modernos tienen un peso muy bajo y frecuentemente la batería como fuente lo hace muy portátil. Las máquinas más nuevas tienen posibilidad de almacenar datos dentro de las unidades, que se pueden llevar con la mano y sólo pesa uno o dos libras.

La mayor limitación de este método de ensayo es que requiere operadores altamente capacitados y experimentados debido a que la interpretación puede ser dificultosa. También, la superficie del objeto de ensayo debe estar totalmente suave, y se requiere medio acoplante para el ensayo de contacto. Se requieren normas de referencia, y este método de inspección de soldadura generalmente se limita a soldaduras a tope en materiales que tienen un espesor mayor a $\frac{1}{4}$ pulgada.

2.3.3. Radiografía industrial (RT)

La radiografía es un método de ensayos no destructivos basado en el principio de transmisión o absorción de radiación preferencial. Las áreas de espesor reducido o menor densidad transmiten más, y en consecuencia absorben menos radiación. La radiación que pasa a través del objeto de ensayo, formará una imagen contrastante en una película que recibe la radiación.

Las áreas de alta transmisión de radiación, o baja absorción, en la película revelada aparecen como áreas negras. Las áreas de baja transmisión de radiación, o alta absorción, en las películas reveladas aparecen como áreas claras. La Figura 2.13, muestra el efecto del espesor en la oscuridad de la película. El área de menor espesor del objeto de ensayo produce un área más oscura en la película debido a que se transmite más radiación a la película. El área de mayor espesor del objeto de ensayo produce el área más clara porque el objeto absorbe más radiación y se transmite menos. La figura 2.14, muestra el efecto de la densidad del material en la oscuridad de la película.

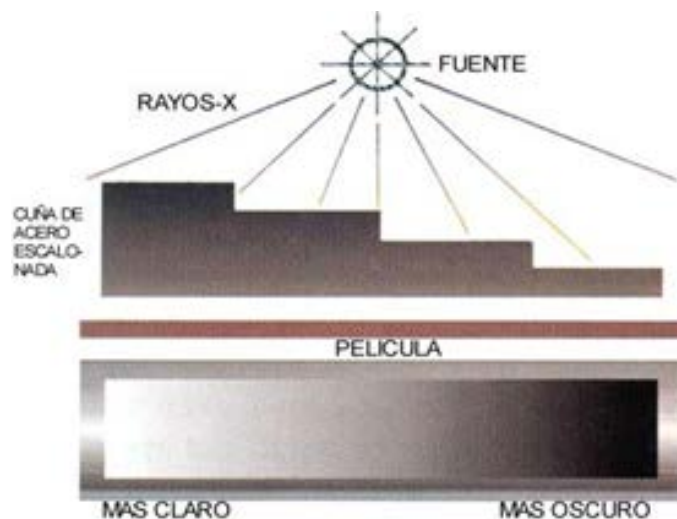


Figura 2.13 Efecto del Espesor de la Pieza en la Transmisión de Radiación (Absorción).

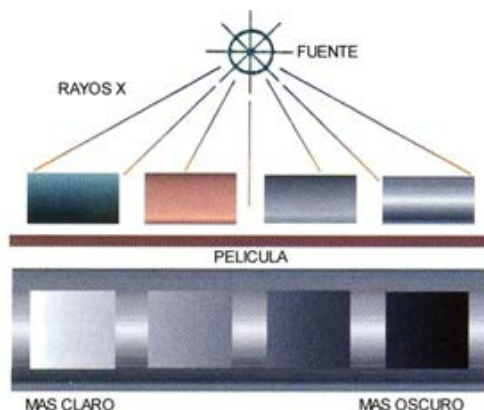


Figura 2.14 Efecto de la Densidad del Material en la Transmisión de Radiación (Absorción).

De los materiales mostrados en la Figura 2.14, el plomo tiene la mayor densidad (11.34 g/cc), seguido en orden por el cobre (8.96 g/cc), el acero (7.87 g/cc), y el aluminio (2.70 g/cc). Con la mayor densidad (peso por unidad de volumen), el plomo absorbe la mayor parte de la radiación, y por esto produce la película más clara.

La radiación de baja energía, que no sea de partículas, se da en la forma de radiación gamma o rayos X. Los rayos gamma son el resultado de la desintegración de los materiales radioactivos; las fuentes radioactivas incluyen al Iridio 192, Cesio 137 y Cobalto 60. Estas fuentes emiten radiación en forma constante y deben mantenerse en un contenedor de almacenamiento protegido, conocido como “cámara gamma”, cuando no está en uso. Estos contenedores frecuentemente emplean protecciones de plomo y acero.

Los rayos X fabricados artificialmente; se producen cuando los electrones, viajando a altas velocidades, chocan con la materia. La conversión de energía eléctrica en radiación X se alcanza en un tubo de vacío. Se pasa una corriente baja a través de un filamento incandescente para producir electrones. La aplicación de alto potencial (voltaje) entre el filamento y el metal de objetivo acelera los electrones a través de este potencial diferencial. La acción de un flujo de electrones que golpean contra el objetivo produce rayos X. Sólo se produce radiación cuando se aplica el voltaje a un tubo de rayos X. Usando tanto fuentes de rayos X o gamma, la pieza no continúa siendo radioactiva seguido al ensayo.

Las discontinuidades por debajo de la superficie que son detectadas fácilmente por este método son las que tienen una densidad distinta al material que se está radiando. Estas incluyen huecos, inclusiones metálicas y no metálicas, y fisuras y faltas de fusión alineadas en forma favorable. Los huecos tales como porosidad, producen áreas oscuras en la película, debido a que representan una pérdida significativa de densidad del material. Las inclusiones metálicas producen áreas claras en la película si tienen mayor densidad que la del objeto de ensayo.

Las inclusiones no metálicas, tales como la escoria, producen frecuentemente áreas oscuras en la película; sin embargo, algunos electrodos contienen revestimientos que producen escoria de una densidad similar a la del metal de soldadura depositado y la escoria producida por ellos es muy difícil de encontrar e interpretar. Las fisuras y fusiones incompletas deben estar alineadas de forma tal que la profundidad de las discontinuidades sea casi paralela al haz de radiación para que sean detectadas. Las discontinuidades superficiales también aparecerán en la película; sin embargo, no se recomienda el uso del ensayo de radiación, debido a que la inspección visual es mucho más económica. Algunas de estas discontinuidades son la socavación, excesivo sobre espesor, falta de fusión, y sobre espesor de raíz por penetración. El ensayo radiográfico es muy versátil y puede ser usado para inspeccionar todos los materiales de ingeniería.

El equipo requerido para realizar los ensayos radiográficos comienza con una fuente de radiación; esta fuente puede ser tanto una máquina de rayos X, que requiere una alimentación eléctrica, o un isótopo radioactivo que produce radiación gamma. Los isótopos ofrecen frecuentemente facilidad para su transporte. Cualquiera de los tipos de radiación requieren películas, porta películas hermético a la luz, y se usan letras de plomo para identificar el objeto de ensayo. Debido a la alta densidad del plomo, y el espesor incrementado en forma local, estas letras forman áreas claras en la película revelada. Los Indicadores de Calidad de Imagen (ICI), o penetrámetros (‘pennys’) se usan para verificar la resolución de sensibilidad del ensayo. Estos ICI normalmente son de dos tipos; ‘cuñas’ o ‘alambre’. Ambos tipos están especificados por tipo de material; además, los de tipo cuña tendrán espesor especificado e incluyen

agujeros de distinto tamaño, mientras que los alambres tendrán diámetros especificados. La sensibilidad se verifica por la habilidad de detectar una diferencia dada en densidad debido al espesor del ICI o el diámetro del agujero, o el diámetro del alambre. La Figura 2.15, muestra ambos tipos de ICI o Indicadores de Calidad de Imagen.

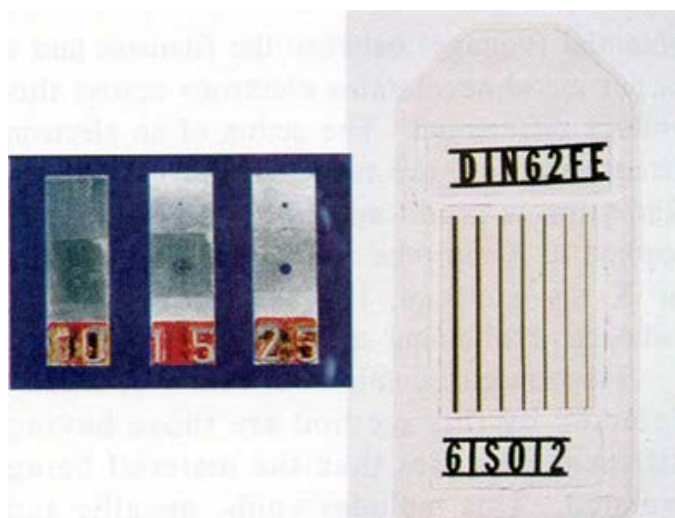


Figura 2.15 Indicadores de Calidad de Imagen Tipo Cuña y Alambre.

La mayor ventaja de este método de ensayo es que puede detectar discontinuidades por debajo de la superficie en todos los metales comunes de la ingeniería. Una ventaja posterior es que las películas reveladas sirven como un registro permanente excelente del ensayo, si se almacena apropiadamente lejos de un calor y luz excesivos.

Junto con estas ventajas hay varias desventajas. Una de ellas es el riesgo impuesto a las personas por una exposición excesiva a la radiación. Se requieren muchas horas de entrenamiento en seguridad sobre radiación para garantizar la seguridad tanto del personal que realiza el ensayo radiográfico como de otro personal en la vecindad del ensayo. Por esta razón, el ensayo se debe realizar sólo después que se evacuó el área de ensayo, que puede presentar problemas de cronograma. Los equipos de ensayos radiográficos pueden ser muy caros y los períodos de entrenamiento requeridos para lograr operadores e intérpretes competentes son algo largos. La interpretación de películas debe realizarse por aquellos certificados

actualmente como mínimo con Nivel II por SNT TC-1A de ASNT. Otra limitación de este método de ensayo es la necesidad de tener acceso a ambos lados del objeto de ensayo (un lado para la fuente y el opuesto para la película), que se muestra en la Figura 2.16.

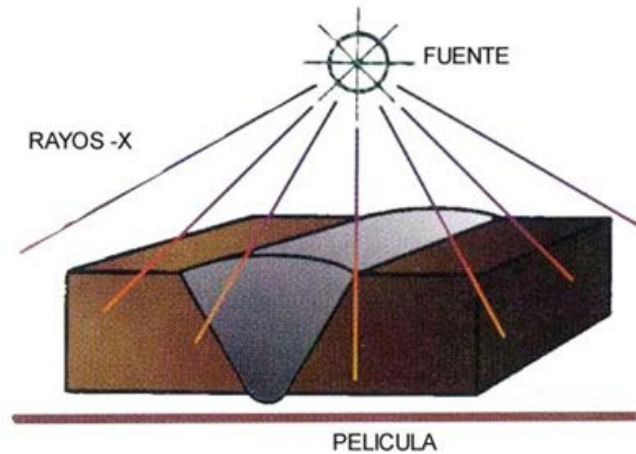


Figura 2.16 Orientación de la Fuente de Radiación, Chapa de Ensayo y Película Radiográfica.

Otra desventaja del ensayo radiográfico es que puede no detectar las fallas que están consideradas como más críticas (ej. fisuras y falta de fusión) salvo que la fuente de radiación esté orientada preferentemente con respecto a la dirección de la discontinuidad. Además, las configuraciones de algunos objetos de ensayo (ej. soldadura de componentes secundarios o de filete) pueden hacer tanto la realización como la interpretación del ensayo más difícil. Sin embargo, el personal de ensayo con experiencia puede obtener radiografías de estas geometrías más complicadas e interpretarlas con alto grado de precisión.

La sensibilidad del método depende de un gran número de factores y en particular:

- De la nitidez y contraste de las imágenes.
- De la posición y dimensiones de los defectos.
- De la potencia del tubo de rayos X y condiciones operatorias, tiempo de exposición, calidad de la película, etc.

Ejemplo de esta radiografía revelada se puede observar en la Figura 2.17.



Figura 2.17 Radiografía Revelada.

2.3.3.1. Defectos encontrados en la Soldadura a través de la Radiografía.

Las discontinuidades superficiales que son detectadas por radiografía incluye: porosidades, socavaduras, pliegues, marcas de esmeril, exceso de penetración, salpicaduras, ranuras longitudinales. La Figura 2.18 a la Figura 2.27, mostraran como se ven estas fallas en las placas radiográficas.

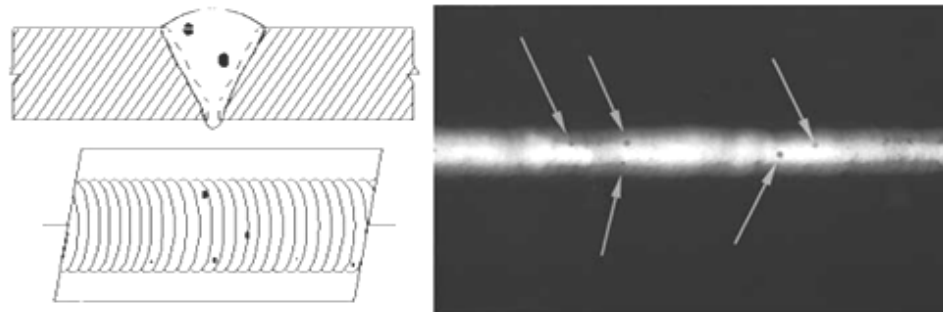


Figura 2.18 Porosidades.

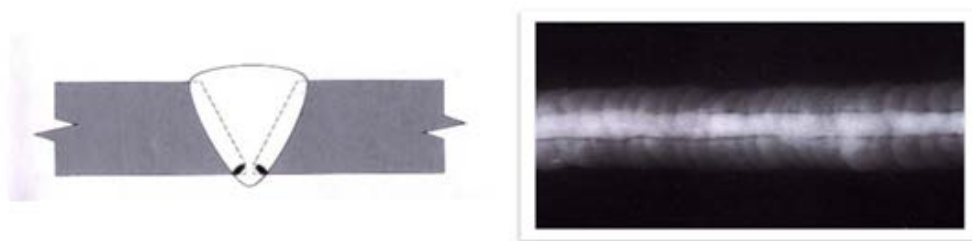


Figura 2.19 Escorias Alineadas.

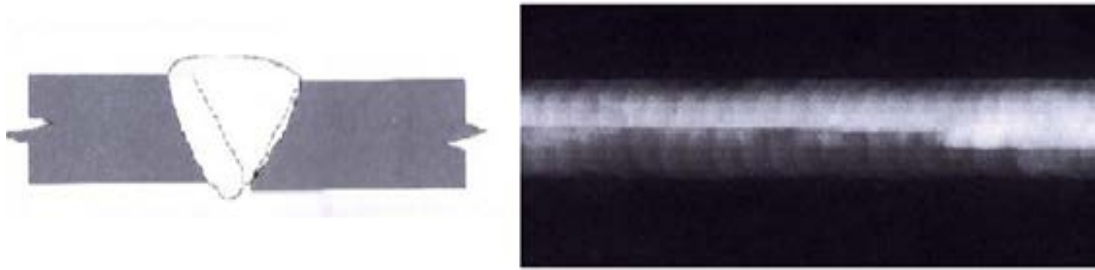


Figura 2.20 Falta de Penetración Asociada a la Desalineación.

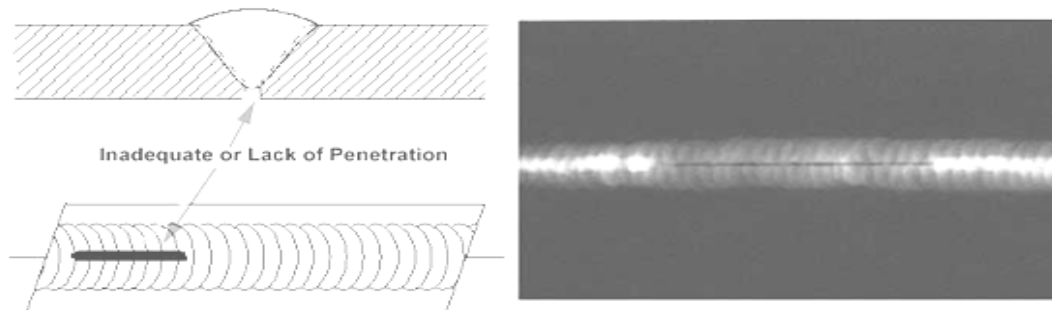


Figura 2.21 Penetración Incompleta (IP) o Falta de Penetración (LOP).

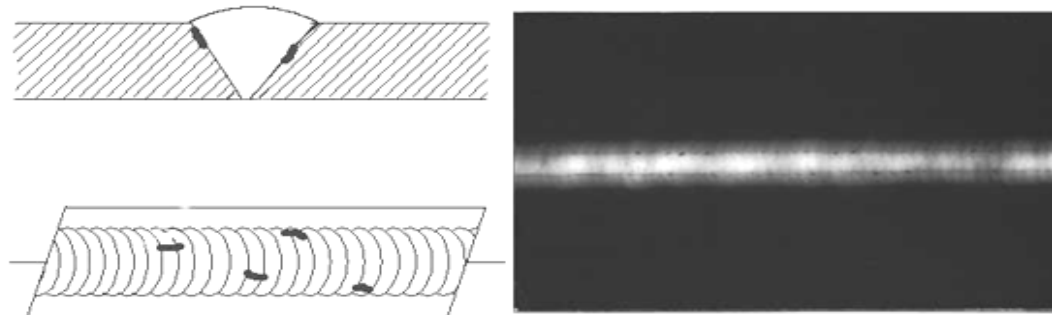


Figura 2.22 Fusión Incompleta.

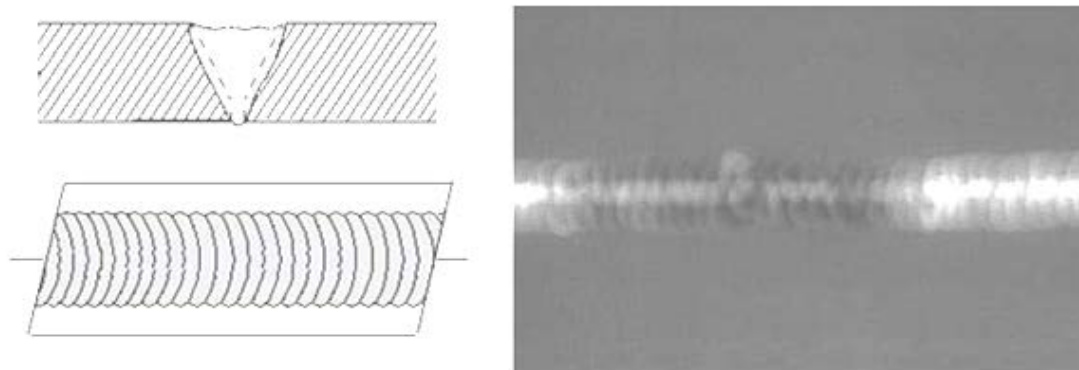


Figura 2.23 Refuerzo de Soldadura Inadecuado.

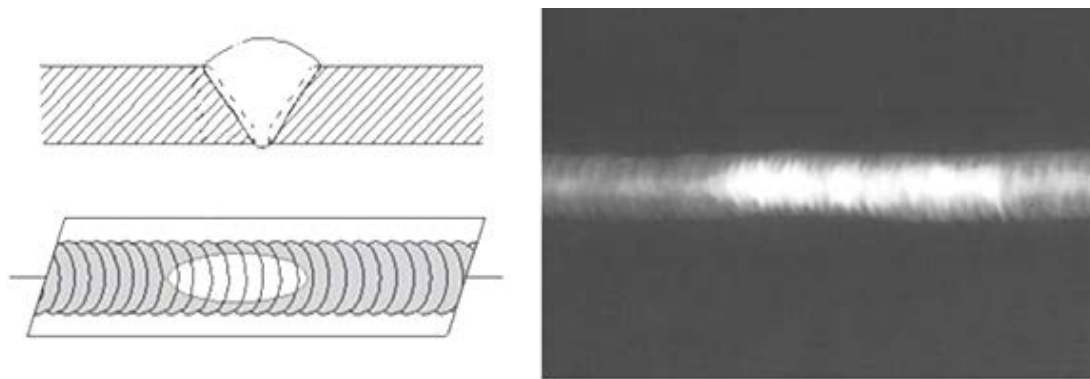


Figura 2.24 Refuerzo de Soldadura Excesivo.

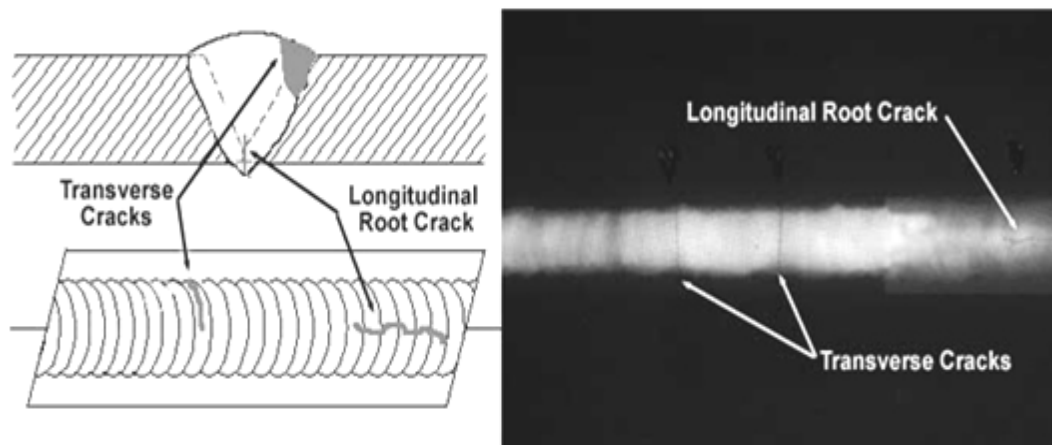


Figura 2.25 Agrietamientos.

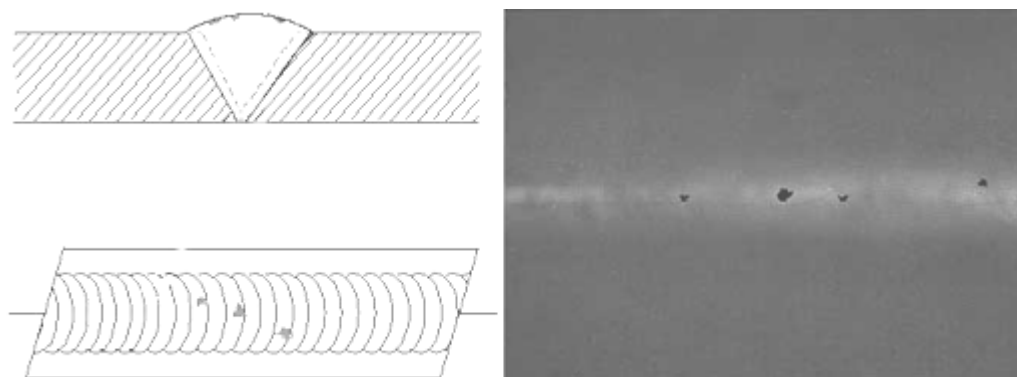


Figura 2.26 Inclusiones de Oxido.

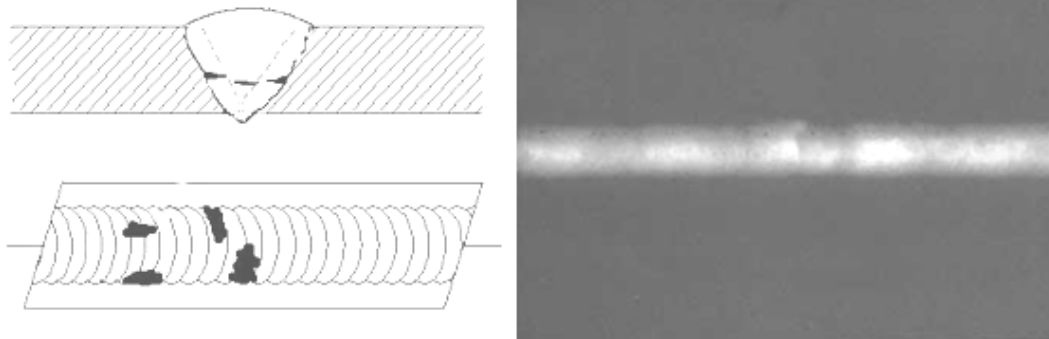


Figura 2.27 Soldadura Fría (Cold Lap).

2.4. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

2.4.1. Dureza

Desde el punto de vista mecánico la dureza es la capacidad de un material para resistir la indentación o la penetración. El calor de la soldadura puede cambiar la dureza de los metales que se estén soldando, o el resultado final puede ser una diferencia en dureza entre el metal de soldadura depositado y el metal de base. Una diferencia en la dureza indica por lo general una diferencia en la resistencia o en alguna otra propiedad o propiedades. Mediante el estudio de la Metalurgia de la Soldadura, puede aprenderse más sobre las causas de la dureza y la forma de controlarla. (Ignoto, 2011).

La razón principal para hacer una prueba de dureza es la de suministrar información sobre otras propiedades. Por ejemplo, en los aceros la resistencia a la tracción de un material la cual está relacionada directamente con su dureza. Las pruebas de dureza se hacen a un bajo costo y no son destructivas. Una prueba de dureza puede, sustituir a la más difícil y destructiva prueba de tensión.

En general, de dos metales de composición similar, el de mayor dureza tiene mayor resistencia a la tensión, menor ductilidad, y mayor resistencia al desgaste abrasivo. La dureza elevada indica también una baja resistencia al impacto, aunque algunos aceros que han recibido un tratamiento térmico correcto tienen tanto una alta dureza como una buena resistencia al impacto. Las pruebas de dureza se usan mucho para verificar la uniformidad del material de las partes metálicas durante la

producción. Cualquier falta de uniformidad en el material es revelada rápidamente por su excesiva dureza o por su excesiva blandura.

Los ensayos de dureza que actualmente se usan en las industrias son los siguientes:

- **Dureza Brinell:** Emplea como punta una bola de acero templado o carburo de W. Para materiales duros, es poco exacta pero fácil de aplicar. Poco precisa con chapas de menos de 6mm de espesor. Estima resistencia a tracción.
- **Dureza Vickers:** Emplea como penetrador un diamante con forma de pirámide cuadrangular. Para materiales blandos, los valores Vickers coinciden con los de la escala Brinell. Mejora del ensayo Brinell para efectuar ensayos de dureza con chapas de hasta 2mm de espesor.
- **Dureza Knoop:** Mide la dureza en valores de escala absolutas, y se valoran con la profundidad de señales grabadas sobre un mineral mediante un utensilio con una punta de diamante al que se le ejerce una fuerza estándar.
- **Dureza Rockwell:** Se utiliza como punta un cono de diamante (en algunos casos bola de acero). Es la más extendida, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella.
- **Rockwell superficial:** Existe una variante del ensayo, llamada Rockwell superficial, para la caracterización de piezas muy delgadas, como cuchillas de afeitar o capas de materiales que han recibido algún tratamiento de endurecimiento superficial.
- **Dureza Rosiwal:** Mide en escalas absoluta de durezas, se expresa como la resistencia a la abrasión medias en pruebas de laboratorio y tomando como base el corindón con un valor de 1000.
- **Dureza Shore:** Emplea un escleroscopio. Se deja caer un indentador en la superficie del material y se ve el rebote. Es adimensional, pero consta de varias escalas. A mayor rebote -> mayor dureza. Aplicable para control de calidad superficial. Es un método elástico, no de penetración como los otros.

- **Dureza Webster:** Emplea máquinas manuales en la medición, siendo apto para piezas de difícil manejo como perfiles largos extruidos. El valor obtenido se suele convertir a valores Rockwell.

2.4.2. Macroataque

El ensayo de macroataque consiste en examinar macro estructuralmente un material a bajas magnificaciones, agregando un agente de composición química a la superficie del material a examinar, revelando la heterogeneidad de este. Esta técnica es frecuentemente usada en la evaluación de aceros para observar defectos y variaciones en su estructura. En uniones soldadas es usado para identificar defectos como grietas y poros como también para definir las zonas de la soldadura.

Distintos reactivos químicos son empleados en el macroataque, estos dependen de lo que se quiera examinar, ya que cada uno de materiales reacciona de manera diferente debido a la variación en la composición química de los reactivos. La norma de la (American Society of Testing and Materials, 2000), describe el procedimiento a seguir en el ensayo de macroataque así como también da a conocer el reactivo a usar dependiendo del material y lo que se quiere observar.

Es considerado un ensayo destructivo debido a que se socava o corroe, la superficie en donde se aplicó el reactivo como se puede observar en la Figura 2.28.

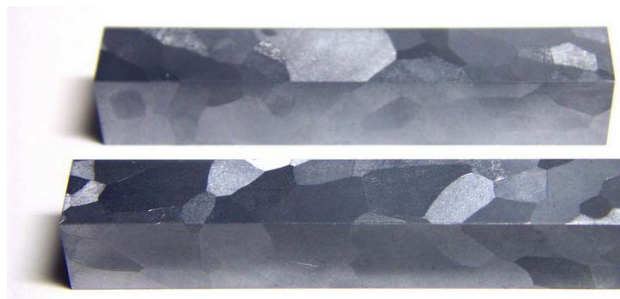


Figura 2.28 Barras de Vanadio Macroatacadas.

2.4.3. Microataque

El microataque es un ataque químico que se realiza al momento de un examen metalográfico para revelar la microestructura de un material, observando bajo un microscopio de alta magnificación, las características constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas. Figura 2.29. La norma (American Society of Testing and Materials, 2007), cubre los procedimientos y los reactivos a usar en el microataque, así como también las medidas de seguridad que se tienen que tomar en cuenta al momento de manipular los reactivos químicos que se van a utilizar.



Figura 2.29 Microestructura de un Acero AISI 1015 Microatacado con Nital.

2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL

Los Diseños Factoriales son metodologías experimentales que se utilizan cuando se estudian diversas variables y se desea conocer el efecto de la interacción entre ellas. Fueron creados para generar procesos de calidad, lo que los convierte en métodos más prácticos que estadísticos, teniendo en cuenta el ahorro de costos y optimización de procesos. Genichi Taguchi desde 1950 los desarrolló como una aproximación al diseño de experimentos con el objetivo de reducir los costos y los tiempos emanados de la experimentación.

Este tipo de diseño se usa en estudios en los cuales la cantidad de factores a estudiar es igual o mayor a dos, es decir, en experimentos en los que intervienen diversos factores que, en conjunto o asociados, influyen en la respuesta del sistema.

Un estudio realizado bajo este diseño logra que sean evaluadas todas las combinaciones de factores posibles, para así apreciar los efectos de dichas combinaciones en la respuesta o salidas del sistema. Los factores se pueden definir como variables independientes, los cuales influyen en la salida del sistema. Mientras que las variables que indican la respuesta del sistema o salidas del proceso, se denominan variables dependientes. En el diseño experimental factorial cada combinación de factores es conocido como tratamientos.

En el modelo básico de un diseño experimental factorial (X^Y), la base (X) es un número entero ≥ 2 que representa los niveles o valores que toman las variables, y el exponente (Y) es un número entero o fraccionario, en algunos casos, también ≥ 2 que significa el número de variables a evaluar. Cada ensayo involucra un mínimo de 3 réplicas para garantizar significancia estadística. Así, un diseño 2^3 involucra 3 variables en 2 niveles cada una, lo que equivale a 12 ensayos y 4 condiciones de prueba. Un diseño 3^2 , por su parte, es el equivalente a 2 variables con 3 niveles de prueba cada una, lo que serían 27 ensayos y 9 condiciones de prueba. Los diseños más comunes son los que involucran menos corridas o ensayos, como 2^3 , 2^2 y 3^2 e incluso 3^3 . Para un mayor número de variables y niveles de prueba, el número de corridas hace que el estudio sea significativamente prohibitivo en términos de tiempo y costos.

2.6. ANOVA

El análisis de la varianza (ANOVA) es un método estadístico utilizado para determinar la similitud o diferencias entre dos o más grupos de datos, disponiendo de medidas cuantitativas continuas, que se pueden suponer como procedentes de una distribución de probabilidad normal comparándolas con más de dos grupos.

En el planteamiento más simple de análisis de la varianza se tiene una variable numérica cuantitativa (resultado), y se desea determinar en qué medida se puede atribuir la variabilidad de ésta a otra variable cualitativa nominal que se denominar factor. Se está hablando por tanto de análisis de la varianza para un solo factor, que puede tener 2 o más categorías o niveles. Este factor, cuyo posible efecto

sobre la variable medida que se desea analizar, puede tener unos niveles fijos, y se habla entonces de modelo de efectos fijos; o bien puede tratarse de una muestra procedente de un conjunto de niveles más amplio denominado modelo de efectos aleatorios.

Para el análisis de varianza, se descompone la variabilidad total de los datos de dos fuentes de variación: la debida a los grupos de datos y la debida a la presencia dentro de cada grupo de datos. Matemáticamente, la suma de cuadrados total, SS_T , puede descomponerse como el total de dos sumas de cuadrados:

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad \text{Ec.2.1}$$

La suma de cuadrados debido a la regresión, SS_R , mide la variación entre los resultados individuales y la media de cada grupo de resultados, siendo su formula la descrita por la siguiente ecuación:

$$SS_R = \sum_{u=1}^n (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2 \quad \text{Ec.2.2}$$

Siendo $\hat{Y}_u$ el valor observado en la u-ésima corrida. SS_E , o suma de cuadrados residual, mide las desviaciones entre la media de cada grupo de datos y el resultado medio global.

$$SS_E = \sum_{u=1}^n (Y_u - \bar{Y}_u)^2 \quad \text{Ec.2.3}$$

Los análisis de varianza se expresan en tablas que permiten resumir los datos obtenidos y las distintas varianzas calculadas como se muestra a continuación en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Resumen del análisis de varianza.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Varianza
Residuo	SS_E	$N-k$	$SS_E / (N-k)$
Regresión	SS_R	$k-1$	$SS_R / (k-1)$
Total	SS_T	$N-1$	$SS_T / (N-1)$

La varianza de residuo se conoce como MSW, o Mean Square Within, y viene dada por el cociente entre SS_R y los correspondientes grados de libertad, donde k es el número de grupos de valores y N el número total de muestras. La varianza de regresión se denomina MSB, o Mean Square Between.

Como se asume antes de generar un análisis de varianza que: a) Cada conjunto de datos es independiente del resto y b) Los resultados para cada conjunto deben seguir una distribución normal, la ecuación de regresión ajustada se prueba usando el valor F como valor estadístico de prueba, el cual corresponde a la relación entre las medias de cuadrados:

$$F = \frac{MSB}{MSW} \quad \text{Ec.2.4}$$

Este valor se compara, usando una distribución normal de probabilidades con un criterio de dos colas y en intervalo de confianza predefinido, lo que permite aceptar o rechazar la hipótesis si el valor obtenido está fuera o dentro de los límites de la distribución.

2.7. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

La Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

Cuando decimos que el valor real esperado, η , que toma la variable de interés considerada está influido por los niveles de k factores cuantitativos, $X_1, X_2, \dots, X_k$, esto significa que existe alguna función de $X_1, X_2, \dots, X_k$ (que se supone continua en $X_i, \forall i = 1, \dots, k$) que proporciona el correspondiente valor de η para alguna combinación dada de niveles:

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad \text{Ec. 2.5.}$$

De tal forma que la variable respuesta puede expresarse como:

$$Y = \eta + \varepsilon = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde ε es el error observado en la respuesta.

La relación $\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ existente entre η y los niveles de los k factores puede representarse a través de una hipersuperficie (subconjunto de un espacio euclídeo $(k+1)$ -dimensional) a la que llamaremos superficie de respuesta.

2.8. SUPERFICIE DE RESPUESTA

La relación $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ entre Y y los niveles de los k factores $x_1, x_2, \dots, x_k$ representa una superficie. Con k factores la superficie está en $k+1$ dimensiones. Por ejemplo cuando se tiene $Y = f(x_1)$ la superficie está en dos dimensiones, mientras que si tenemos $Y = f(x_1, x_2)$ la superficie está en tres dimensiones, esto se observa en la Figura 2.30.

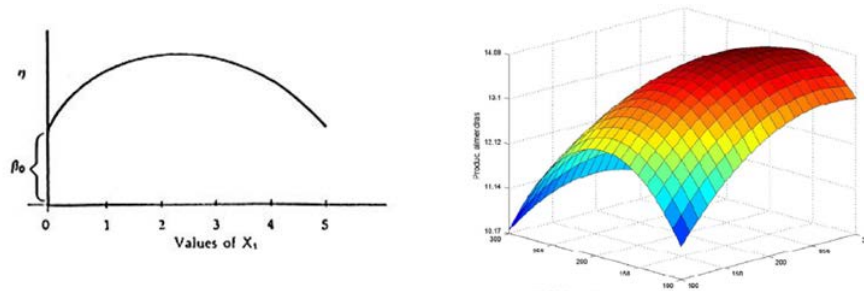


Figura 2.30 Superficie de Respuesta de dos y tres dimensiones respectivamente.

2.9. GRÁFICA DE CONTORNOS

La gráfica de contornos facilita la visualización de la forma de una superficie de respuesta en tres dimensiones. En ésta las curvas de los valores iguales de respuesta se grafican en un plano donde los ejes coordenados representan los niveles de los factores. Cada curva representa un valor específico de la altura de la superficie, es decir un valor específico de $\hat{Y}$. Esto se muestra en la Figura 2.31 la gráfica contenida en esta figura nos ayuda a enfocar nuestra atención en los niveles de los factores a los cuales ocurre un cambio en la altura de la superficie.

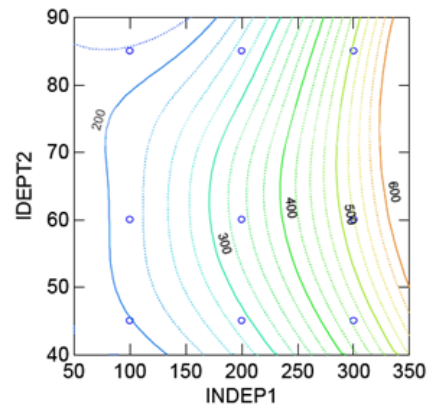


Figura 2.31 Gráfica de Contornos.

La región experimental especifica la región de valores para los niveles de los factores. Esto se puede hacer empleando los niveles actuales de operación para cada factor; si se desea explorar los alrededores se incrementa y decrementa el valor del nivel en una cantidad determinada.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN Y DISEÑO DEL TRABAJO.

Esta investigación está realizada, bajo el método científico, ya que se dirige a la solución de problemas, y en este caso las interrogantes previamente planteadas, mediante la producción de nuevos conocimientos, constituyendo la solución o respuesta a tales incógnitas.

Debido al grado de profundidad con el que se aborda el trabajo, el nivel de la investigación es de tipo: descriptiva correlacional, ya que esta consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento, y su finalidad es determinar el grado de relación o asociación (no causal) existente entre dos o más variables.

Se realizarán estudios en los que se busque medir las variables y luego, mediante pruebas de hipótesis correlacionales y la aplicación de técnicas estadísticas, se estima la correlación, sin establecer de forma directa las posibles relaciones causales.

La utilidad y el propósito principal de estos estudios es saber cómo se comporta las variables, conociendo el comportamiento de otras variables relacionadas, para intentar prescindir el valor aproximado que tendrá una variable en un grupo de individuos, a partir del valor obtenido en las variables relacionadas.

3.2. PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES.

- Se realizará una revisión bibliográfica a través de libros, documentos, revistas, publicaciones, manuales, publicaciones de Internet, de todo lo concerniente al proceso de soldadura GMAW, proceso de recuperación por soldadura, parámetros en la soldadura, inspecciones por rayos “x”, inspecciones por ultrasonido, metalografía, macroataque, microataque y ensayos de dureza,

para obtener todas las bases teóricas que se requieren a lo largo del trabajo de investigación.

- Seleccionar los parámetros que se cambiarán en el proceso semiautomático de soldadura partiendo de las condiciones dadas por el fabricante.
- Determinar el número de probetas a partir de la combinación de parámetros establecidos mediante el diseño experimental factorial, para así realizar una matriz con las distintas combinaciones de parámetros que se usaran en las pruebas.
- Determinar las dimensiones de las probetas para los ensayos de soldadura, con ayuda de las normas respectivas y buscando obtener la mayor similitud entre la probeta y la parte interna de la camisa de la bomba tipo tornillo.
- Comprar el acero requerido para la fabricación de las probetas.
- Realizar la fabricación y preparación de las probetas.
- Aplicar el proceso de soldadura en las probetas, utilizando la combinación de los parámetros establecidos y simulando el proceso de recuperación de las bombas tipo tornillo.
- Realizar ensayos no destructivos en los cordones de soldadura para la determinación de fallas.
- Realizar cortes transversales en las probetas para la observación de las zonas de la soldadura (material de aporte, ZAC, material base).
- Realizar el ensayo de macroataque para definir las zonas de la soldadura.
- Realizar un barrido de dureza mediante micro-indentación, para conocer los cambios en la metalurgia de la soldadura.
- Realizar un ensayo metalográfico a todas las probetas, observando las microestructuras que se han formado en las zonas de la soldadura y evaluando cómo afecta la metalurgia de esta.
- Aplicar el programa de optimización y análisis de varianza ANOVA a través del software estadístico MINITAB, y elegir las mejores condiciones del proceso semiautomático de soldadura.
- Realizar nuevos cortes en las probetas donde se puedan observar los cordones solapados.

- Evaluar a fondo la microestructura a las diferentes probetas y realizar un análisis de rayos x por dispersión de energía (EDS), con la utilización de Microscopia Electrónica de Barrido.
- Conclusiones.

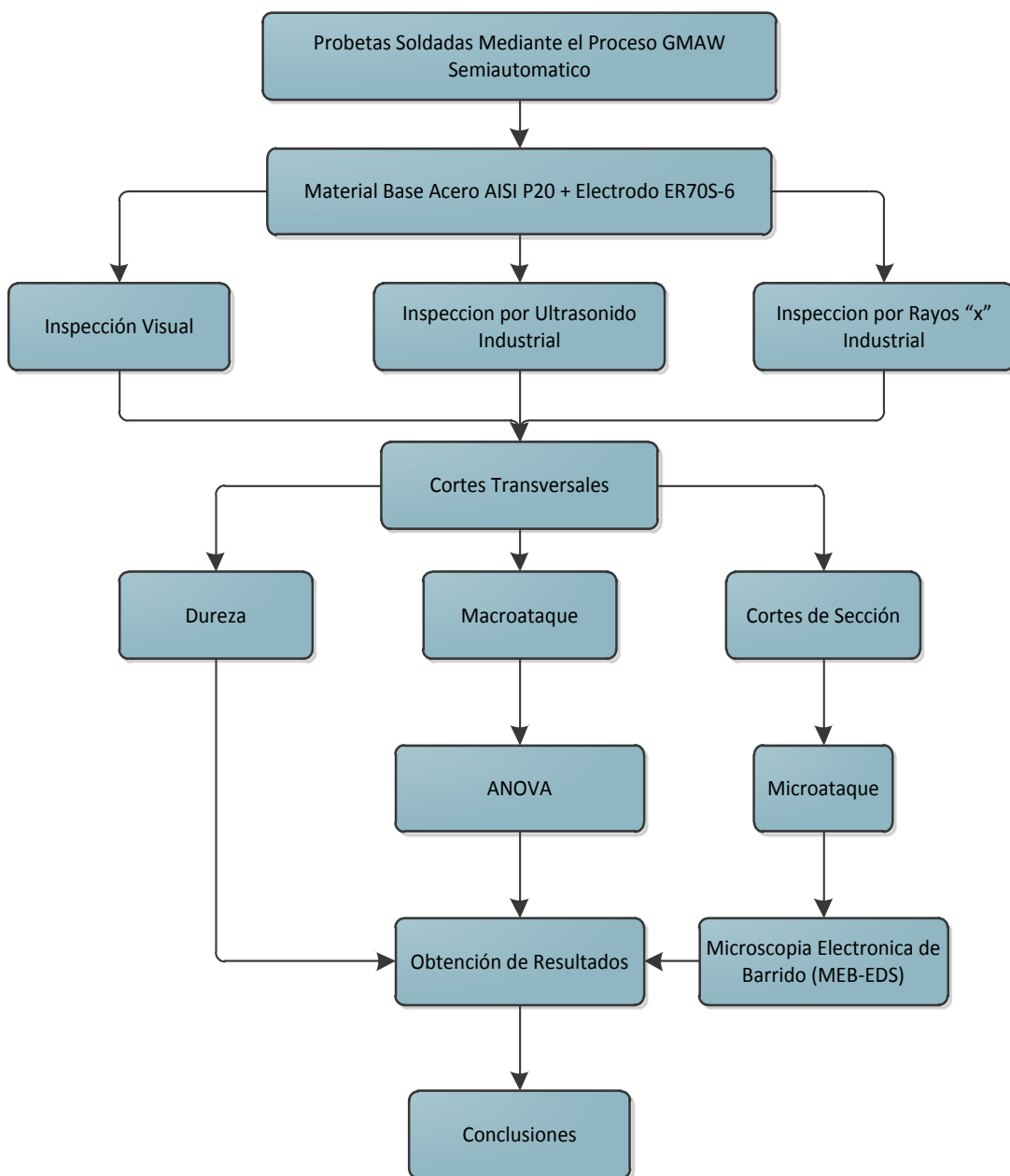


Figura 3.1 Diagrama de flujo del trabajo de investigación.

3.3. SELECCIÓN DE PARÁMETROS.

Después de evaluar rigurosamente con la empresa Plasmatec Ingenieros C.A., los parámetros que puedan estar afectando el proceso de soldadura al ser cambiado de manual a semiautomático, son las variables que maneja el operador, ya que las variables del equipo siempre se han mantenido fijas, como se mencionó antes una de las variables del operador es la velocidad de avance, que conjunto a la velocidad de oscilación, simulan la mano experta del soldador, al momento de la soldadura. Es por eso que estas variables llegan a ser unas de las más determinantes en el proceso de recuperación por soldadura, ya que influyen en la penetración del cordón y el calor aportado a la pieza.

Mientras las demás variables en variables como amperaje y voltaje entre otras, serán las predeterminadas por la empresa y se mantendrán fijas, las variables de velocidad de avance y velocidad de oscilación serán las combinadas para lograr los parámetros más óptimos del proceso.

3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL APLICADO.

Al tener seleccionado las variables que se usaran en el presente trabajo, se aplicara un diseño experimental factorial, ya que este permite estudiar el efecto de cada variable sobre la posible respuesta, así como el efecto de las interacciones entre las variables.

Debido a que estudiaremos dos variables, y estipularemos tres niveles o valores para cada variable, usaremos un diseño factorial 3^2 , en donde la base de la potencia es el número de niveles y el exponente es el número de variables. Esto da como resultado un total de 9 ($3^2 = 9$) condiciones, es decir, que se usaran 9 probetas. En la Tabla 3.1, se mostraran todas las condiciones que se estudiaran en el presente trabajo de investigación.

Tabla 3.1 Matriz resultado del diseño factorial

Condición	Velocidad de Avance (mm/min)	Velocidad de Oscilación (ciclos/min)
1	70	24
2	100	24
3	120	24
4	70	28
5	100	28
6	120	28
7	70	32
8	100	32
9	120	32

3.5. PROBETAS.

3.5.1. Descripción del Material Base y Geometría utilizados.

3.5.1.1. Material Base

El material utilizado como sustrato es un acero AISI P20 siendo este un acero de herramienta, que presenta la siguiente composición química:

Tabla 3.2 Composición química del acero AISI P20 (ASTM-A681)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S
0.38	0.30	1.50	2	0.2	1.1	0.05

El material base que utiliza la bomba P-3001 es el ASTM A216 WCB siendo este un acero de fundición, que presenta la siguiente composición química:

Tabla 3.3 Composición química del acero ASTM-A216WCB (ASTM-A216)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	Cu	V	S
0.30	0.60	1	0.5	0.2	0.5	0.04	0.3	0.03	0.045

En la Tabla 3.4 se observa las propiedades de resistencia ultima a la tracción y dureza del acero AISI P20 y del acero ASTM-A216 WCB.

Tabla 3.4 Propiedades mecánicas del Acero AISI P20 y ASTM A-216 WCB

	Resistencia Última a la Tracción (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Dureza Vickers (HV)
AISI P20	945 a 1030	827 a 862	315
ASTM A-216 WCB	485 a 655	250	280

Para calcular el carbono equivalente utilizaremos la fórmula propuesta por el Instituto internacional de soldadura (IIW) (Ec.3.1.), En base a ecuaciones propuestas por Dearden y O`Neil en 1940, la cual puede utilizarse para $C > 0,18\%$, o cuando se requieran soldaduras con tiempos de enfriamiento lentos, mayores de 12 segundos.

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Mediante el Diagrama de Graville (Figura 3.2) se permite una clasificación de los aceros en base a su soldabilidad asociada a problemas de fisura en frío, en función del porcentaje de carbono y de elementos de aleación medidos a través del carbono equivalente del IIW.

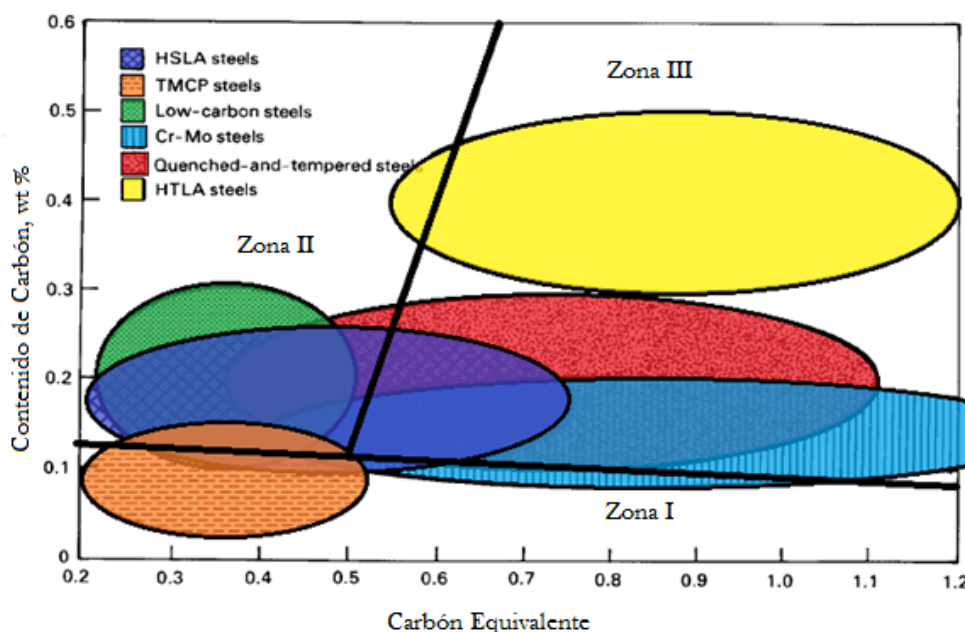


Figura 3.2 Diagrama de Graville (Salazar, 2006)

El diagrama agrupa a los aceros de acuerdo al tipo de curva de templabilidad (Ensayo de Jominy) y se distinguen tres zonas.

En la zona I los aceros tienen bajo carbono, consecuentemente aún bajo las condiciones más exigidas que puedan generarse durante la soldadura (elevado nivel de hidrógeno y alta restricción) no son muy susceptibles a fisura.

En la Zona II los aceros tienen altos contenidos de carbono y bajos elementos de aleación. Las curvas de templabilidad indican un amplio rango de durezas, con lo cual para evitar microestructuras sensibles a la fisura deberá considerarse una disminución de la velocidad de enfriamiento de la ZAC, a través de un control en el aporte térmico y empleo de precalentamiento al conjunto soldado.

En la zona III los aceros poseen elevado carbono y elementos de aleación, lo que les confiere un alto endurecimiento, por lo que la soldadura produciría microestructuras susceptibles a fisura bajo cualquier condición. Por lo tanto, para evitar la fisura en frío asistida por hidrógeno en los aceros ubicados en la zona III deberían emplearse procesos de soldadura y consumibles de bajo hidrógeno, precalentamiento y eventualmente tratamientos térmicos post-soldadura.

3.5.1.2. Geometría.

Para la realización de este trabajo se utilizó una Placa de acero AISI P20, con un espesor de 22 mm, un ancho de 250 mm y 700 mm de largo. Luego se mecanizó la placa de Acero para obtener 9 probetas con las condiciones antes mencionadas en la Tabla 3.1 con unas dimensiones de 120 mm de largo por 130 mm de ancho con 22 mm de espesor como se puede observar en la Figura 3.3.

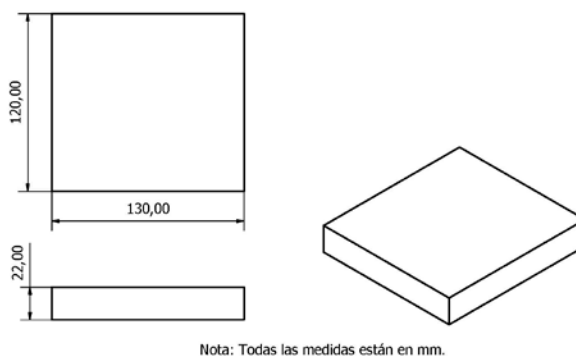


Figura 3.3 Dimensiones y diseño de la probeta.

Se seleccionó esta geometría en la probeta para simular lo mejor posible a la carcasa interna de la bomba P-3001.

3.5.2. Descripción del Material de Aporte Utilizado.

3.5.2.1. Material de Aporte.

El material utilizado como aporte es un alambre macizo de acero al carbono con 1.2 mm de diámetro especificado como ER 70S-6 de la marca UNIBRAZE™, que presenta la siguiente composición química:

Tabla 3.5 Composición química del alambre ER70S-6 (UNIBRAZE™)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	Cu	V	S
0.15	1.15	1.85	0.15	0.15	0.15	0.25	0.5	0.03	0.35

3.5.2.2. Geometría.

La geometría de los cordones de soldadura es variable, los parámetros que influyen de una manera significativa son la velocidad de avance y la velocidad de oscilación, ya que estas dos condiciones varían, se tienen diferentes medidas de ancho y de altura del cordón de soldadura, en promedio en el cordón de soldadura se puede hablar de un ancho de 25 mm con una altura de 5,7 mm; se colocaron en cada probeta 3 cordones solapados (Figura 3.4), de la siguiente manera:

Al comenzar el segundo cordón de soldadura, la pistola GMAW se desplaza con una distancia equivalente a la mitad del ancho del cordón, quedando solapado la mitad del primer cordón. Y así repitiendo el proceso con el tercer cordón de soldadura. , en promedio se puede decir que el ancho de los 3 cordones solapados es de 50 mm.

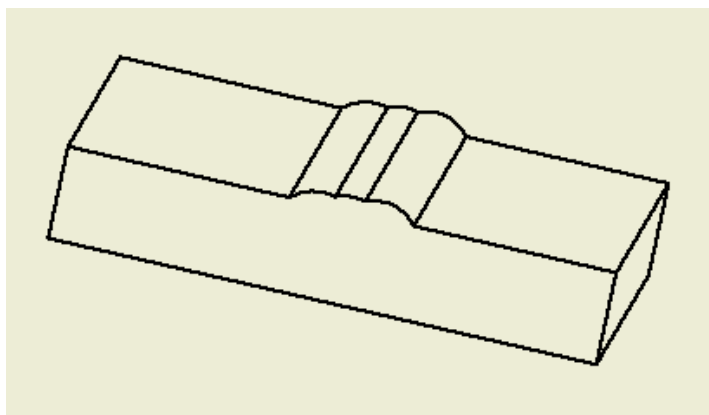


Figura 3.4 Geometría de la probeta.

3.5.3. Descripción del Gas de Protección a utilizar.

El gas de protección a utilizar en el proceso GMAW es una mezcla ARDOMIX 2 (Ar + 2%CO₂).

3.6. PREPARACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE LAS PROBETAS A SOLDAR.

Para la preparación de las probetas y la deposición del material de aporte con las condiciones dadas en la Tabla 3.1, se utilizara una máquina de soldadura tipo GMAW de la marca Termal Arc modelo FABSTAR® 4030.

3.6.1. Procedimiento

- Ya teniendo el material base de las dimensiones requeridas se procede a la limpieza de la superficie con un cepillo de cerdas metálicas, donde va a ser depositado el material de aporte.
- Se seleccionan los parámetros a utilizar de voltaje y amperaje en la soldadora GMAW y en la maquina semiautomática los parámetros de velocidad de avance y velocidad de oscilación.
- Posicionamiento de la probeta en el espacio de trabajo y la distancia del electrodo a la superficie de la pieza.
- Se procede a depositar el primer cordón de soldadura.
- Al comenzar el segundo cordón de soldadura, la pistola GMAW se desplaza con una distancia equivalente a la mitad del ancho del cordón, quedando solapado la mitad del primer cordón.
- Se repite el procedimiento con el tercer cordón de soldadura.
- La probeta se enfría a temperatura ambiente.

3.7. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

3.7.1. Inspección visual

Esta prueba consiste en buscar todas las posibles imperfecciones, poros, grietas, escorias, mal formación del cordón, entre otras, que se presenten a simple vista después del proceso de soldadura.

3.7.1.1. Materiales:

- Cepillo de cerdas metálicas.
- Lupa.
- Cinta métrica.
- Reglas.

3.7.1.2. Procedimiento:

- Examinar el aspecto de las soldaduras, su rugosidad, salpicaduras, oxido, y restos de escoria.
- Con el cepillo de cerdas metálicas, limpiar las superficies y cualquier desperdicio de los anteriormente mencionados, si están presentes, para poder observar adecuadamente los cordones y las imperfecciones.
- Inspeccionar con ayuda de una lupa, para detectar las posibles discontinuidades que puedan reducir la vida de la soldadura, tales como cráteres en los extremos de los cordones, grietas, falta de penetración, mordeduras y solapamientos.
- Hacer las mediciones correspondientes de altura y espesor de los cordones mediante reglas y cintas métricas.

3.7.2. Radiografía Industrial

Consiste en detectar discontinuidades, inclusiones, fisuras, entre otras, que están por debajo de la superficie de la junta soldada.

3.7.2.1. Materiales:

- Equipo de Rayos “X” Marca: ANDREX. (Figura 3.5)
- Película radiográfica AGFA Structurix D7.
- Indicador de calidad de imagen (ICI).
- Cuarto oscuro.
- Revelador AGFA G128. (Figura 3.6)
- Fijador AGFA G328. (Figura 3.6)

- Negatoscopio. (Figura 3.7)

3.7.2.2. Procedimiento:

- Evaluar y asignar según el espesor de la probeta, la película radiográfica a usar y los parámetros que se usaran en el proceso.
- Se seleccionara con la ayuda del diagrama de exposición suministrada por el fabricante de la película radiográfica, Figura 3.8, y la ecuación Ec 3.2. el tiempo de exposición de la probeta.

$$t_{exp} = \frac{E(mA.min)}{I(mA)} \quad \text{Ec.3.2.}$$

Dónde: t_{exp} = Tiempo de exposición (min)
E = Exposición de la radiación (mA.min)
I = Intensidad de corriente (mA)

- Antes de encender el equipo, se abrirán los pasos de agua que administran la refrigeración del equipo y se verificara que la puerta del bunker de plomo esté completamente cerrada.
- Se precalentara el equipo radiográfico siguiendo las normas del laboratorio de Rayos X.
- Por medidas de seguridad se utilizara un contador Geiger para revisar si hay fugas de radiación durante las pruebas.
- Durante el precalentamiento también se realizara la preparación de la película radiográfica, que consiste en, colocar la película en un sobre especializado que contiene una placa de plomo de bajo espesor y otra placa protectora, este procedimiento se realiza en un cuarto oscuro, ya que la película es fotosensible.
- Se colocara la placa debajo del foco del equipo de manera centrada con este, sobre la placa se situaran las muestras a las que se les realizara el estudio.
- Se ubicara en una de las superficies de las muestras, el indicador de calidad de imagen (ICI), sin interrumpir alguna zona que quiera ser estudiada.
- Por último se removerá el protector del foco de salida del equipo, se cerrara la puerta del bunker y se procederá a realizar la radiografía.
- Se encenderá el equipo y se regularan los parámetros previamente establecidos.
- Transcurrido el tiempo de exposición se procederá al apagado del equipo, y se retirara la placa de su ubicación para ser revelada.

- La película será revelada en un cuarto oscuro, sumergiéndola en un líquido revelador durante 7 minutos, luego se enjuaga con abundante agua y se sumerge en una solución fijadora durante 5 minutos para ser enjugada nuevamente con abundante agua y posteriormente ser colocada en una rejilla de secado.
- Después de secada la película se coloca en un negatoscopio y se observa la calidad de la radiografía.



Figura 3.5 Consola del equipo de rayos X.



Figura 3.6 Revelador G128 (Color Naranja); Fijador G328 (Color Azul)



Figura 3.7 Negatoscopio

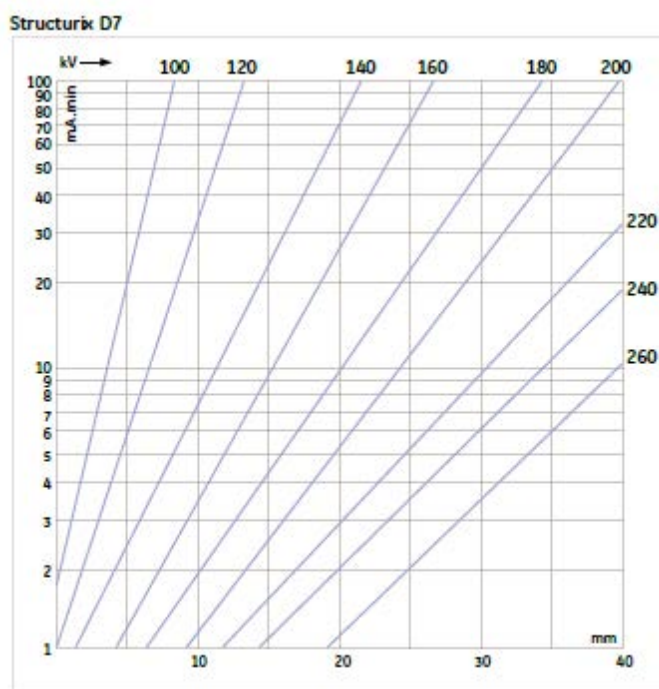


Figura 3.8 Diagrama de exposición para la película AGFA Structurix D7

3.7.3. Ultrasonido Industrial

Este ensayo consiste en encontrar todos los posibles defectos que presente la probeta, tales como: fisuras, grietas, poros, entre otras, por medio de una inspección que utiliza ondas sonoras de alta frecuencia, que se propagan a distintas velocidades dependiendo de la densidad del material, reflejando las discontinuidades por un cambio en la frecuencia de la onda. Estos cambios de frecuencia son observados por el osciloscopio, equipo de medidor del ultrasonido, y el palpador será el indicador que permitirá ver si la energía incrementa disminuye, o se refleja.

3.7.3.1. Materiales:

- Probeta.
- Marcador.
- Equipo de ultrasonido Krautkramer Branson USN50.
- Palpador 5MHz.
- Líquido acoplante (Aceite Mineral).
- Bloque de acero calibrador IIW.

3.7.3.2. Procedimiento:

- Se fija el transductor al equipo, mediante el cable coaxial.
- Encender el equipo.
- Se calibra el equipo por medio del bloque de calibración (Figura 3.9).
- Se prepara la probeta, eliminando cualquier desperdicio que se pueda encontrar en la cara a estudiar.
- Para un estudio sistemático del ultrasonido, realizar una cuadrícula en la superficie, con el marcador indeleble, para enmarcar las áreas de estudio de la probeta.
- Se coloca el líquido acoplante, este caso utilizaremos aceite mineral, en la superficie de estudio.
- Colocar en contacto acústico el palpador con la superficie que se desea analizar de la probeta.
- Mediante el método de ultrasonido, de ecos pulsantes, se estudiarán las áreas enmarcadas anteriormente, observando los cambios en la morfología del material a través del osciloscopio.
- Anotar los datos obtenidos de cada una de las áreas, para su posterior análisis.
- Repetir todo el procedimiento, para el análisis de las probetas restantes.



Figura 3.9 Bloque calibrador (IIW) y equipo de ultrasonido.

3.8. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

3.8.1. Prueba Dureza.

Para la elaboración de este ensayo se utilizaron las probetas previamente cortadas de forma transversal, con un espesor aproximado de 22mm. Se utilizó un micro durómetro marca Buehler (Figura 3.10), el cual está constituido por dos lentes de 10x y 40x de aumento y por un indentador piramidal con un ángulo de 136°, el cual fue utilizado para la realización del ensayo de dureza Vickers.



Figura 3.10 Microdurómetro Buehler.

3.8.1.1. Materiales:

- Probetas cortadas de espesor 22mm
- Microdurómetro Marca: Buehler 1105.

3.8.1.2. Procedimiento:

- El ensayo Vickers consta básicamente, del posicionamiento de la superficie de estudio de la probeta de forma perpendicular al lente de observación y al receptáculo del indentador.
- Ya posicionada, se seleccionó una carga de 300gr con un tiempo de indentación de 15 segundos.

- Se procedió a ubicar el cero de la máquina en ambos ejes del indentador, ubicando líneas paralelas y haciéndolas coincidir para marcar un punto de referencia que servirá de cero para la medición de diagonales.
- Seleccionados los parámetros de indentación, se realizó un barrido de dureza en línea recta, con 9 indentaciones divididos en una indentación central en la zona a evaluar, cuatro indentaciones del lado derecho y cuatro indentaciones del lado izquierdo.
- En la Tabla 3.6 se da a conocer cada una de las zonas.
- En la Figura 3.11 se puede observar las zonas donde se realizara la indentación central o base del barrido.

Tabla 3.6 Zonas de barrido de dureza.

Zonas	Definición
Zona I	Cordón solapado superior.
Zona II	Cordón solapado inferior.
Zona III	Línea limítrofe entre material de aporte y ZAC.
Zona IV	ZAC.
Zona V	Línea limítrofe entre ZAC y material base.
Zona VI	Material base.

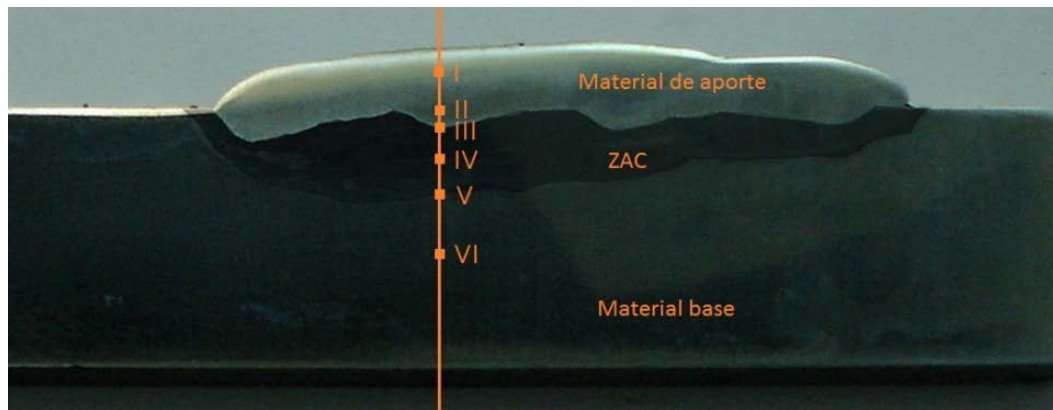


Figura 3.11 Zonas de microindentación en las probetas de soldadura.

Después de obtener todos los valores de dureza se estudiara la tendencia obtenida en cada una de las probetas enfocándonos en la ZAC. Dependiendo de los valores de dureza se comprobara la uniformidad del proceso de soldadura.

3.8.2. Estudio de discontinuidades estructurales a nivel macro.

En búsqueda de una mejor observación de las zonas de soldadura, se realizó un ataque químico siguiendo la norma ASTM-E340 Standard Test Method for

Macroetching Metals and Alloys. El agente químico designado por la norma, para visualizar las zonas de soldadura, es una solución de persulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) y agua.

3.8.2.1. Materiales:

- Probeta
- Algodón
- Persulfato de Amonio $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$
- Agua
- Secador eléctrico

3.8.2.2. Procedimiento:

- Se procede a frotar la probeta, humedeciendo un algodón con persulfato de amonio.
- Después de unos segundos, se observara una reacción que revelara la estructura deseada.
- Para detener la reacción química del persulfato, se procede a enjuagar con abundante agua.
- Por último, se secan las probetas con el secador eléctrico.

3.8.3. Estudio metalográfico (Microataque)

Para el estudio metalográfico se realizó un microataque con una solución al 5% de ácido nítrico HNO_3 y etanol (Nital), regido bajo la norma ASTM-E407. Con el ataque químico realizado se revela la microestructura general en cada una de las zonas de soldadura.

3.8.3.1. Materiales:

- Probetas
- Nital 5%
- Recipiente de vidrio
- Guantes de látex
- Agua
- Alcohol
- Secador eléctrico

3.8.3.2. Procedimiento:

- En el recipiente de vidrio se colocan 15ml de nital
- Colocarse los guantes de látex.
- Sumergir durante pocos segundos la probeta dentro del recipiente, procurar que la superficie que se desee atacar este en contacto directo con la solución, para obtener una reacción uniforme.
- Esperar unos segundos, y proceder a chequear la cara de la probeta que estuvo en contacto con la solución, deberá estar opaca.
- Detener la reacción, enjuagando con abundante agua.
- Enjuagar con alcohol la superficie, para desplazar el agua contenida en ella.
- Por último, se secan las probetas con el secador eléctrico.

3.9. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y ESPECTROSCOPIA (MEB-EDS).

El Microscopio electrónico de barrido utiliza un haz de electrones para formar una imagen, teniendo la ventaja de obtener grandes magnificaciones con alta resolución. El equipo permite la observación y la caracterización simultánea en puntos o áreas específicas, esto se debe al espectroscopio de energía dispersiva (EDS) que se encuentra integrado al equipo de microscopia electrónica de barrido.

Con este equipo se busca obtener una mayor información de la calidad en el proceso de soldadura, observando detenidamente las microestructuras formadas en las distintas zonas de la probeta.

3.9.1. Materiales:

- Microscopio electrónico de barrido, marca: Philips, modelo: XL-30. (Figura 3.12)
- Probetas previamente cortadas.

3.9.2. Procedimiento:

- Se requiere de la preparación metalográfica para la observación de las microestructuras, realizado anteriormente.
- Encendido del equipo y puesta a punto.
- Colocación de las muestras a estudiar dentro del microscopio.
- Revisar detenidamente las microestructuras formadas en cada una de las zonas.
- Capturar las imágenes necesarias para su posterior análisis.

- Realizar la caracterización de cada una de las zonas y de los defectos que se pueden conseguir en la muestra.
- Analizar y discutir imágenes.



Figura 3.12 Microscopio electrónico de barrido (MEB-EDS)

CAPITULO IV

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE SELECCIÓN DEL MATERIAL BASE

Debido a que el acero ASTM A216 WCB, material del que está formado la bomba P-3001 es de difícil adquisición se requiere de una selección del material que lo sustituya, en la elaboración de las probetas a ser ensayadas; el material que se utilizara es el acero AISI P20 ya que fue el acero disponible que tuviera un porcentaje en peso de carbono (C) parecido o similar al del acero ASTM A216 WCB. De la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 se obtiene que el Carbón (C) en % en peso del acero AISI P20 es de 0,38 y del acero ASTM A216 WCB es de 0,30 siendo estos muy similares y diferenciándose apenas por 0,08.

Además se necesita confirmar si los dos aceros tienen una soldabilidad similar y esto se realiza a través del Carbono Equivalente, para el cálculo del Carbono Equivalente se tiene que a partir de la Ec. 3.1.

Calculando el Carbono Equivalente del Acero AISI P20 se tiene que:

$$CE_{IIW} P20 = 0.38 + \frac{1.25}{6} + \frac{2 + 0.2 + 0}{5} + \frac{1.1 + 0}{15} = 1.143333$$

Por otra parte para el Acero tenemos ASTM A216 WCB se tiene que:

$$CE_{IIW} A216 WCB = 0.30 + \frac{1}{6} + \frac{0.5 + 0.2 + 0.03}{5} + \frac{0.5 + 0.3}{15} = 0.6666$$

De los resultados obtenidos se puede decir que a pesar de la diferencia de 0,5 en carbono equivalente que hay entre ellos, los dos aceros al ser ingresados al Diagrama de Graville Figura 4.1, se encuentran en la Zona III, que es una zona de baja Soldabilidad: en esta zona deberían emplearse procesos de soldadura y consumibles de bajo hidrógeno, precalentamiento y eventualmente tratamientos térmicos post-soldadura (Esto según la Norma AWS D1.1). Concluyendo que los

ensayos a realizar tendrán el mismo efecto en el Acero AISI P20 y en el Acero ASTM A216 WCB.

Otra ventaja es que el valor obtenido en el Carbono Equivalente del Acero AISI P20, debido a que hay mayor presencia de carbono y elementos aleantes es mayor en comparación al Carbono Equivalente del Acero ASTM A216 WCB, por lo tanto los resultados satisfactorios obtenidos en los ensayos a realizar en el Acero AISI P20 serán mucho más satisfactorios en el Acero ASTM A216 WCB.

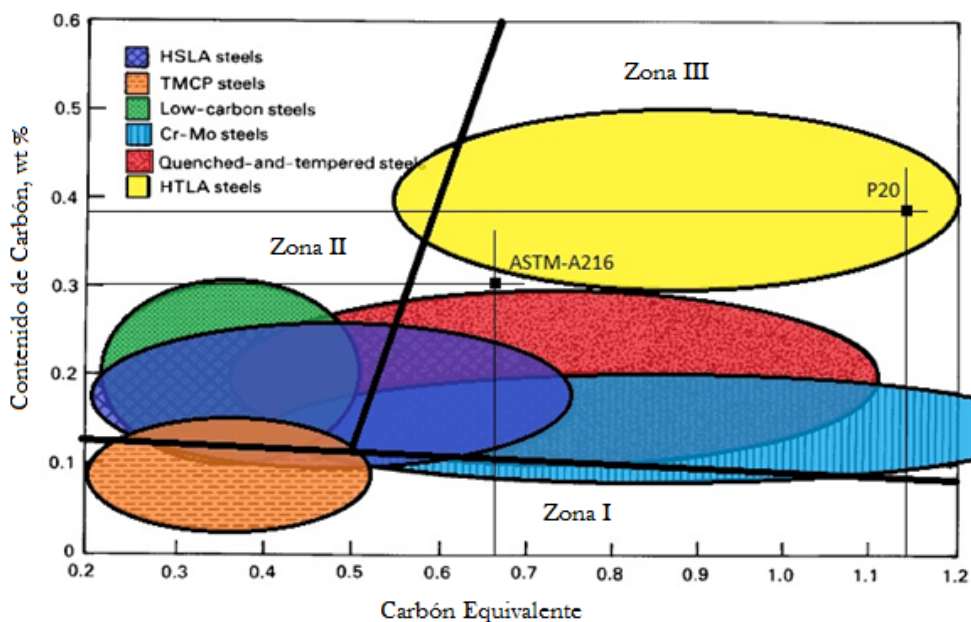


Figura 4.1 Representación de los aceros AISI P20 y ASTM-A216 en el diagrama de Graville

Adicionalmente otro aspecto a ensayar dentro del estudio de soldabilidad de ambos aceros está relacionado con su vulnerabilidad a fragilizar tanto en frío como en caliente, aspecto que puede ser eventualmente determinado a través del cálculo de la relación Mn/S en donde obtendremos, de la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 el Manganese (Mn) y el Azufre (S) en % en peso del acero AISI P20 es 1,5 y 0,05 respectivamente y del acero ASTM A216 WCB es 1 y 0,045 respectivamente, obteniendo la relación Mn/S entre los dos elementos se tiene que:

$$\frac{Mn}{S}(P20) = \frac{1,5}{0,05} = 30$$

$$\frac{Mn}{S} (A216 WCB) = \frac{1}{0,045} = 22,22$$

La relación Mn/S es muy cercana entre ambos aceros siendo los dos aceros propensos a fallas por sulfuros de manganeso, el acero AISI P20 el más propenso debido a que es el valor mayor, tendrá mayores posibilidades de falla por la formación de Sulfuro de Manganeso (MnS).

De lo anteriormente expuesto es posible concluir que el acero utilizado en el presente estudio es apropiado para predecir u optimizar los parámetros en el proceso de soldadura de las bombas P-3001, por presentar comportamiento similar en cuanto a la soldabilidad.

4.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

4.2.1. ANÁLISIS DE INSPECCIÓN VISUAL:

Para la Inspección Visual de las probetas soldadas Figura 4.2., se tomaron los siguientes factores en consideración: Contorno; (Regular (R) o Irregular (I)), Distribución Longitudinal del Material; (Acumulación excesiva (AE), adecuada (A), insuficiente (IN)) y Salpicaduras (Numerosas (N), Inexistentes (INX), Pocas (P)). En la tabla 4.1., se puede apreciar los resultados de cada una de las condiciones para los distintos factores.

El Contorno de todas las probetas es Regular, esto dado a que las probetas fueron soldadas por una maquina semiautomática que tiene como principio de funcionamiento un brazo que tiene un movimiento lineal y un movimiento oscilante, la trayectoria de soldadura es constante en cada probeta al fijar los parámetros.

En la Distribución Longitudinal del Material se observa que hay una tendencia a presentar aporte excesivo en las probetas 1, 4 y 7 donde se presenta la velocidad de Avance más lenta de 70 mm/min y la probeta 2 también presenta un excesivo aporte del material.



Figura 4.2 Muestreo de probetas con las distintas condiciones.

Las probetas que presentan numerosas salpicaduras son la 2, 4 y 5 y el resto de las probetas presenta pocas salpicaduras, no se encontró una probeta en el muestreo que tuviera ausencia de salpicaduras. Estas salpicaduras se deben a la corriente de (200 A), al voltaje de (20 V) y al gas de protección Ar +2%CO₂ y juntas generan el tipo de transferencia metálica conocido como Corto Circuito, esto se observa en el trabajo de (Pires, Quintino, & Miranda, 2007) en la Figura 4.3.

Tabla 4.1 Control de inspección visual

Probeta	Velocidad de Oscilación	Velocidad de Avance	Contorno		Distribución Longitudinal del Material			Salpicaduras		
			R	I	AE	A	IN	INX	P	N
1	24	70	X		X				X	
2	24	100	X		X					X
3	24	120	X			X			X	
4	28	70	X		X					X
5	28	100	X			X				X
6	28	120	X			X			X	
7	32	70	X		X				X	
8	32	100	X			X			X	
9	32	120	X			X			X	

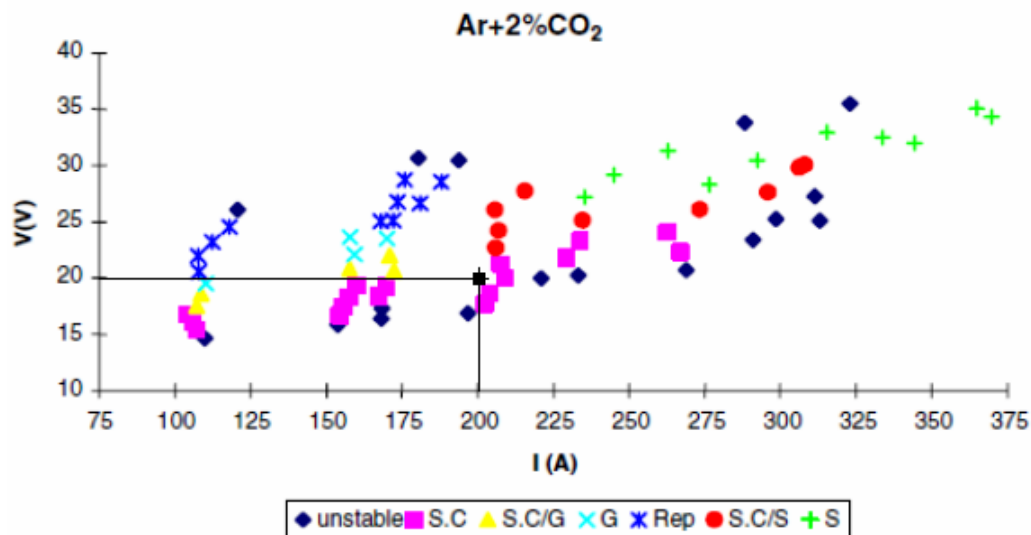


Figura 4.3 Mapa de Modo de Transferencia Metálica para una mezcla de gas de protección Ar + 2% CO₂; en donde: SC= Corto Circuito, G= Globular, S=Spray, Unstable= Inestable, R=Repelida, SC/G= Modo de transferencia entre Corto Circuito y Globular, SC/S= Modo de transferencia entre Corto Circuito y Spray.

4.2.2. ANÁLISIS DE INSPECCIÓN DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL.

El primer cálculo que se debe de tomar en cuenta es la escogencia del tiempo de exposición de la probeta (t_{exp}) en min, de la **Ec.3.2**. Para realizar este cálculo se tiene que tomar en cuenta que las probetas tienen un espesor de 22 mm y que el Equipo de Rayos “X” Marca Andrex llega a 160 kV, y a 8 mA. y se cuenta en el Laboratorio con película radiográfica AGFA Structurix D7 que es a su vez una película de Revelado Rápido. Para una Distancia Foco Película (DFP) igual a 70mm se puede utilizar la Figura 3.4, en el eje de las abscisas con el espesor (22mm) y en el eje de las ordenadas el Voltaje (150kV) obtenemos la Exposición a la Radiación ($E = 100 \text{ mA} \times \text{min}$).

$$t_{exp} = \frac{E(\text{mA} \times \text{min})}{I(\text{mA})} = \frac{100 \text{ mA} \times \text{min}}{5 \text{ mA}} = 20 \text{ min}$$

Teniendo el tiempo de exposición de 20min se realizó una prueba en la cual los resultados obtenidos no fueron los esperados; La recomendación del experto encargado del equipo de Rayos “X” fue aumentar el tiempo de exposición a 36 min ya que el espesor de la probeta está en el límite que puede manejar el equipo. Cabe destacar que el tiempo de exposición es acumulativo y se hicieron 6 tomas de 6 min cada una, dejando enfriar el equipo entre cada toma unos 20 min.

Se utilizó un indicador de calidad de imagen (ICI) tipo agujero numero treinta (30) para obtener una calidad 4-2T Figura 4.4. En donde el primer número de la designación del nivel de calidad se refiere al espesor del ICI que debe mostrarse en por ciento del espesor de la probeta (4%); el segundo número se refiere al diámetro del agujero del indicador de calidad de imagen, que debe revelarse, expresado como un múltiplo del espesor del ICI (2T).

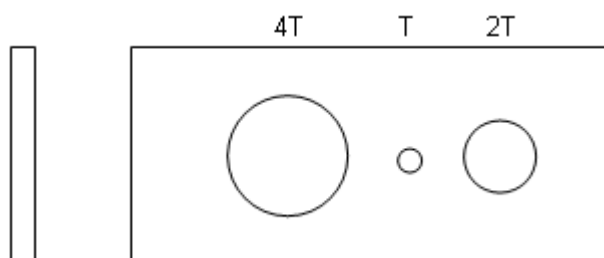


Figura 4.4 Indicador de calidad de imagen (ICI).

Luego de haber revelado la placa se colocan las placas en el Negatoscopio obteniendo lo observado en las Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7.



Figura 4.5 Radiografía de probetas 4-8-9



Figura 4.6 Radiografía de probetas 2-5-7

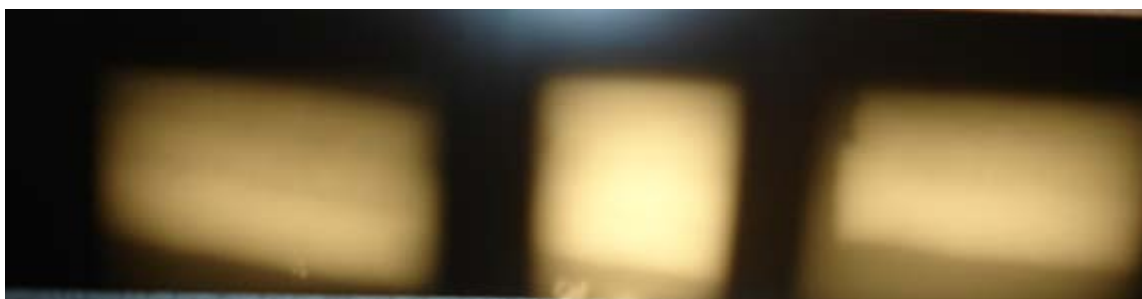


Figura 4.7 Radiografía de probetas 1-3-6

A pesar de que se consiguieron poros e inclusiones en las probetas 1 y 3, y una fisura muy leve en la probeta 7, se necesita de una mayor información para concluir la calidad de estas muestras, por lo tanto el estudio de Rayos “X” no fue

determinante y se necesita combinar este estudio con los demás estudios en especial con el estudio de Ultrasonido para poder observar explícitamente las fallas.

4.2.3. INSPECCIÓN ULTRASONIDO INDUSTRIAL.

Para la Inspección de Ultrasonido se utilizó un Palpador de 5MHz con un diámetro de 0,375 pulgadas, este fue recomendado por el Experto. El equipo Krautkramer Branson USN 50 es calibrado con ayuda del bloque calibrador resultando los siguientes valores:

- Campo: 250 mm → 500mm.
- Velocidad del Material: 3231 m/s.
- Retardo: 3,211 μ s.

Se colocó una ganancia de 36,0 dB recomendada por el experto para observar de manera más clara el cambio en el osciloscopio.

Al momento de realizar el ensayo de Ultrasonido por la técnica de Eco–Pulsante, se ve que no hay presencia de discontinuidad cuando el Osciloscopio presenta una tendencia decreciente como se observa en la Figura 4.8; Cuando se presenta una discontinuidad el osciloscopio refleja una distorsión en la onda como se puede ver en la Figura 4.9.

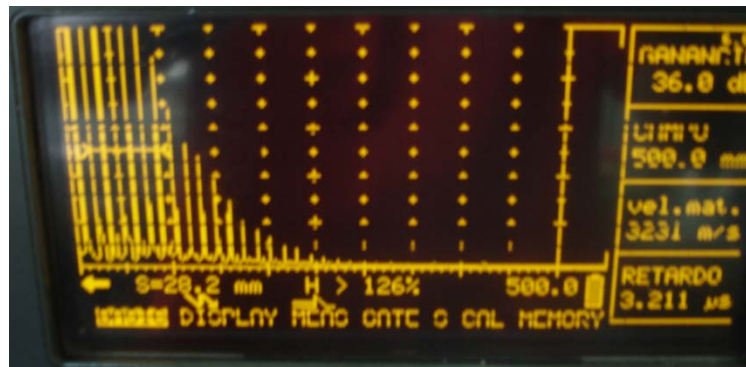


Figura 4.8 Foto pantalla osciloscopio sin defecto.

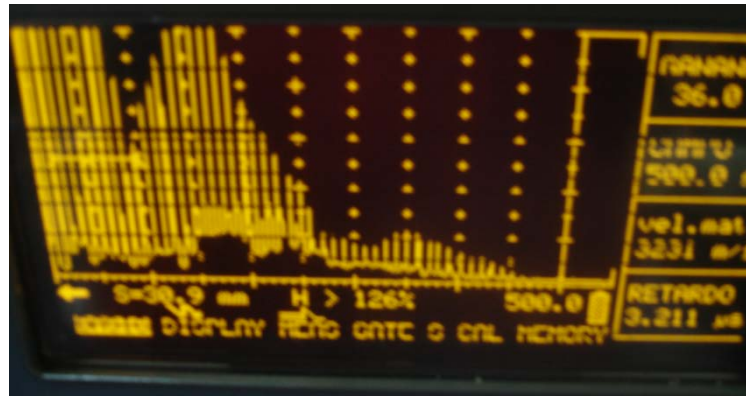
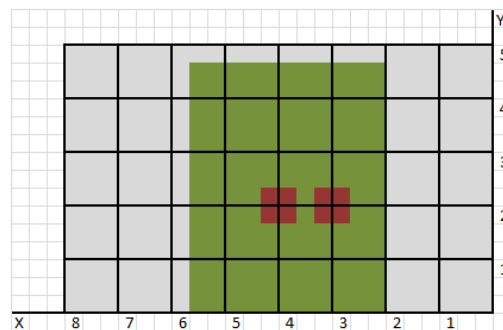


Figura 4.9 Foto pantalla osciloscopio con defecto.

Se realizó este procedimiento para cada una de las probetas, dividiendo la probeta en una malla con coordenadas X, Y; usando como escala para las coordenadas el tamaño del diámetro del palpador, para este estudio solo se enfocó en la penetración del material de aporte con respecto al material base por lo tanto al evaluar cada punto de la probeta solo se identificó si existe una falla o no, en otras palabras no se distinguió entre el tipo de falla.



(X1,Y1) = Material Base	(X4,Y3) = Soldadura Aceptada
(X1,Y2) = Material Base	(X4,Y4) = Soldadura Aceptada
(X1,Y3) = Material Base	(X5,Y1) = Soldadura Aceptada
(X1,Y4) = Material Base	(X5,Y2) = Soldadura Aceptada
(X2,Y1) = Soldadura Aceptada	(X5,Y3) = Soldadura Aceptada
(X2,Y2) = Soldadura Aceptada	(X5,Y4) = Soldadura Aceptada
(X2,Y3) = Soldadura Aceptada	(X6,Y1) = Material Base
(X2,Y4) = Soldadura Aceptada	(X6,Y2) = Material Base
(X3,Y1) = Soldadura Aceptada	(X6,Y3) = Material Base
(X3,Y2) = Falla	(X6,Y4) = Material Base
(X3,Y3) = Soldadura Aceptada	(X7,Y1) = Material Base
(X3,Y4) = Soldadura Aceptada	(X7,Y2) = Material Base
(X4,Y1) = Soldadura Aceptada	(X7,Y3) = Material Base
(X4,Y2) = Falla	(X7,Y4) = Material Base

Figura 4.10 Representación de las zonas de falla en la probeta#1.

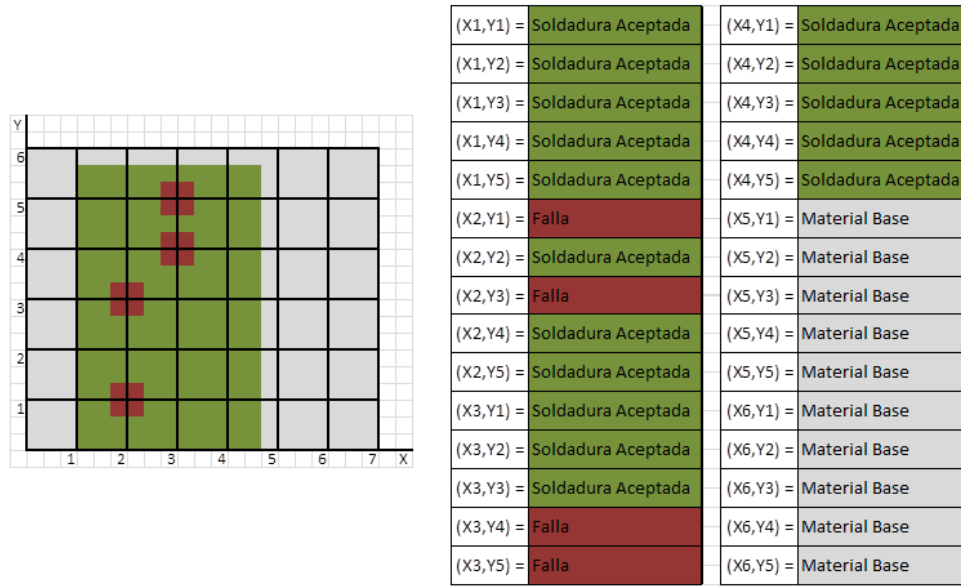


Figura 4.11 Representación de las zonas de falla en la probeta#2.

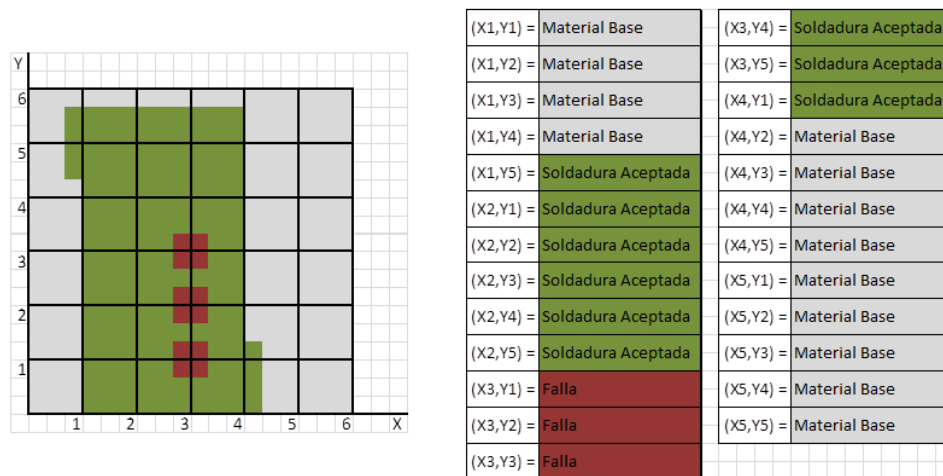


Figura 4.12 Representación de las zonas de falla en la probeta#3.

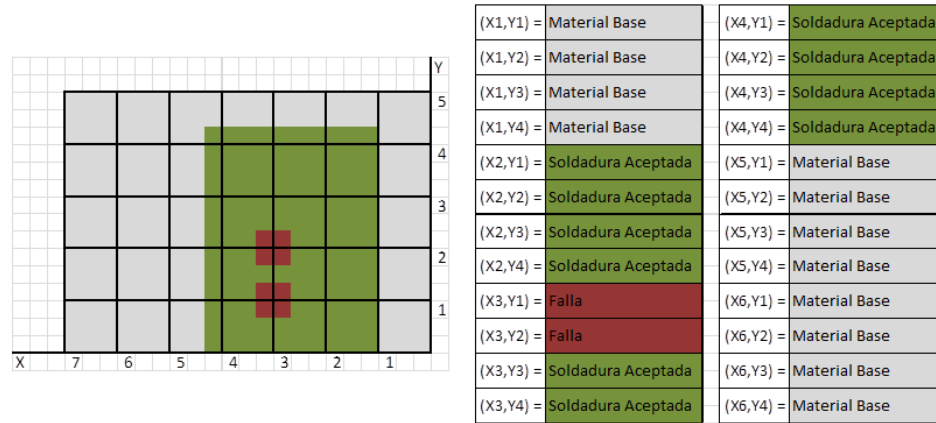


Figura 4.13 Representación de las zonas de falla en la probeta#4.

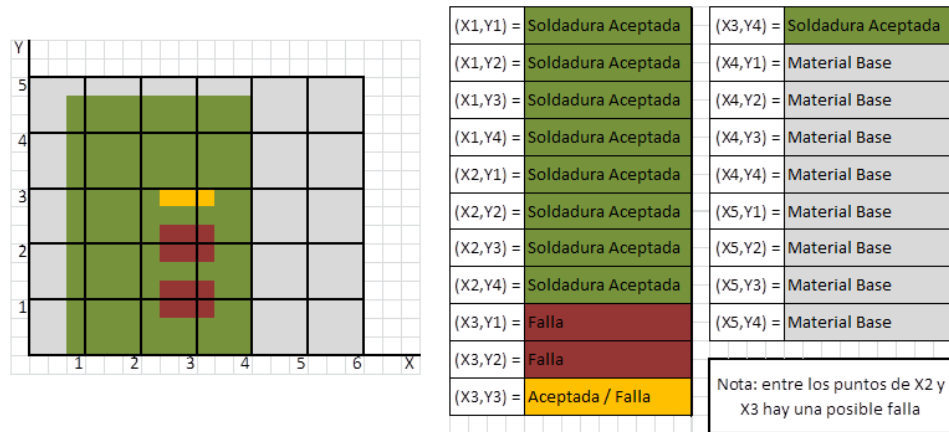


Figura 4.14 Representación de las zonas de falla en la probeta#5.

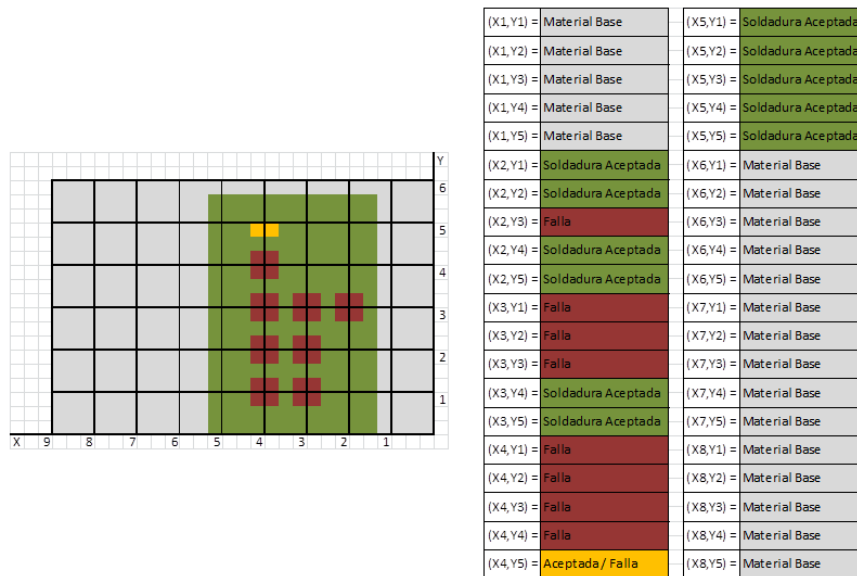


Figura 4.15 Representación de las zonas de falla en la probeta#6.

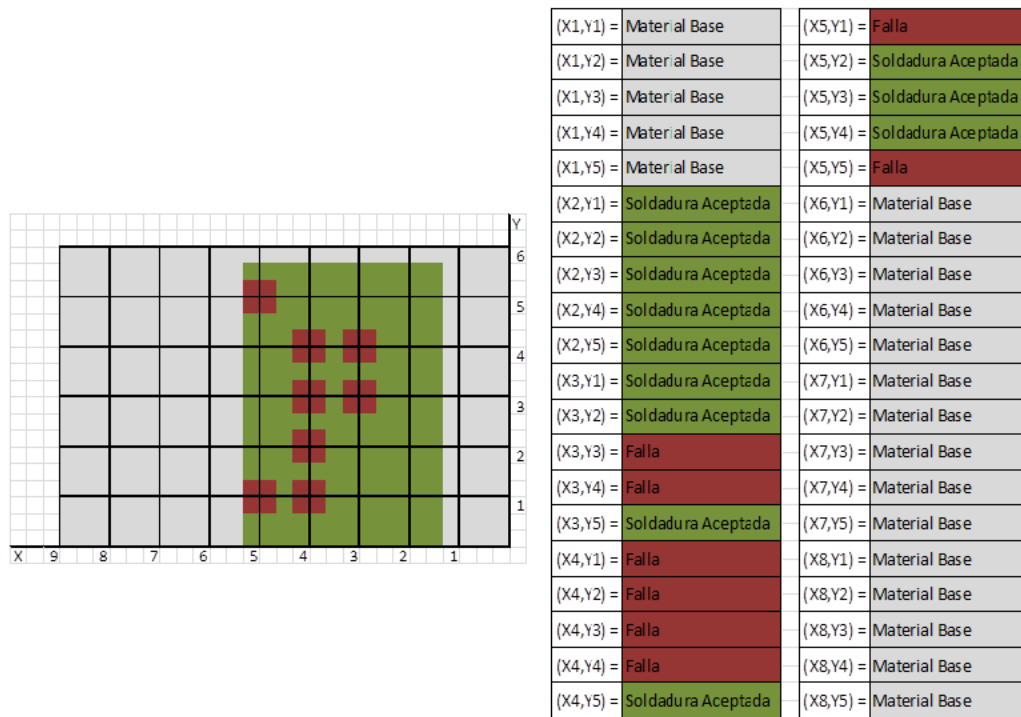


Figura 4.16 Representación de las zonas de falla en la probeta#7.

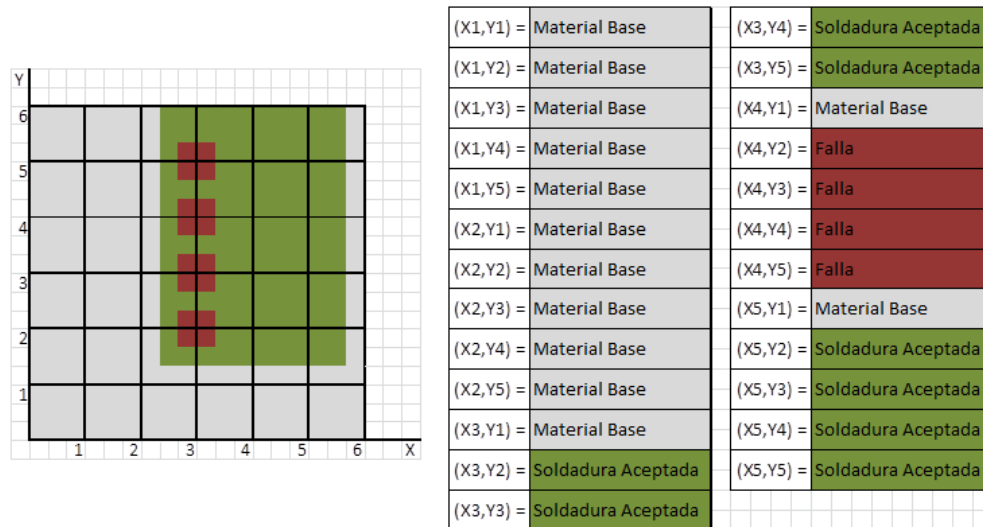


Figura 4.17 Representación de las zonas de falla en la probeta#8.

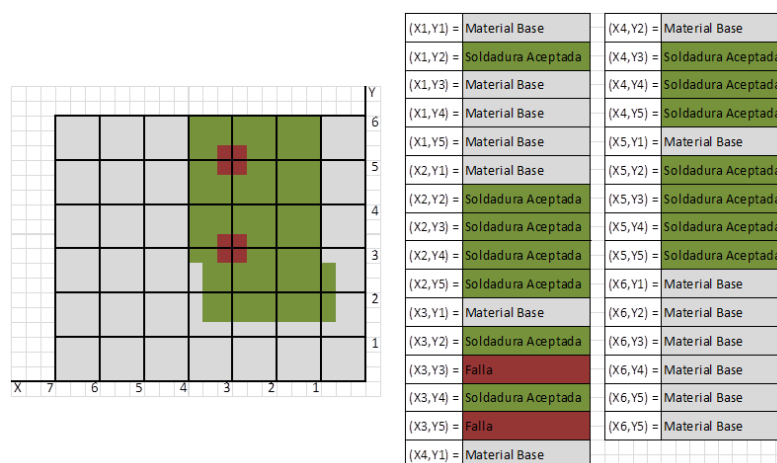


Figura 4.18 Representación de las zonas de falla en la probeta#9.

Observando las Figuras 4.15 y 4.16, probetas 6 y 7 respectivamente, apreciamos una gran cantidad de fallas en el cordón de soldadura, siendo los parámetros de soldadura que presentaron el peor comportamiento. Debido al patrón de fallas presentado en estas probetas, se puede inferir que son fisuras e inclusiones que afectan significativamente la estructura del cordón.

En las Figuras 4.11, 4.12, 4.14, y 4.17, probetas 2, 3, 4, 5 y 8 respectivamente, se observan una moderada cantidad de fallas, generadas por inclusiones, poros y pequeñas fisuras en el material de aporte.

Las probetas que presentaron el mejor comportamiento, debido a la cantidad reducida de falla, son las probetas 1, 4 y 9 representadas por las Figuras 4.10, 4.13 y 4.18. Las fallas que podrían estar presentes en estas probetas, son poros e inclusiones que pueden ser aceptados al momento del estudio del cordón. Los parámetros utilizados para la fabricación de estas probetas serían los más óptimos para el proceso de soldadura en cuanto al estudio por ultrasonido.

4.3. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

4.3.1. ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DUREZA.

En la Tabla 4.2, se observan los valores promedio del ensayo de dureza mediante microindentaciones, obtenidos en la superficie de cada una de las probetas

analizadas, siendo éstos el promedio de indentaciones por cada zona definida en la Tabla 3.5, obteniendo 54 indentaciones por condición.

Tabla 4.2 Valores promedio de dureza Vickers
(Va=velocidad de avance; Vo=velocidad de oscilación)

Probeta #	Condición	Zona	Dureza (HV ₃₀₀)
1	Va=70mm/min Vo=24ciclos/min	I	211.10
		II	225.48
		III	246.27
		IV	460.12
		V	291.04
		VI	244.97
2	Va=100mm/min Vo=24ciclos/min	I	206.46
		II	207.80
		III	378.47
		IV	550.87
		V	291.04
		VI	297.06
3	Va=120mm/min Vo=24ciclos/min	I	244.17
		II	298.02
		III	465.22
		IV	571.74
		V	365.59
		VI	302.26
4	Va=70mm/min Vo=28ciclos/min	I	206.93
		II	206.14
		III	285.38
		IV	545.86
		V	388.50
		VI	261.02
5	Va=100mm/min Vo=28ciclos/min	I	208.91
		II	259.18
		III	369.24
		IV	564.52
		V	309.58
		VI	291.89
6	Va=120mm/min Vo=28ciclos/min	I	233.26
		II	263.41
		III	433.58
		IV	526.67
		V	358.82
		VI	312.20

7	Va=70mm/min Vo=32ciclos/min	I	195.43
		II	206.72
		III	438.62
		IV	599.52
		V	305.86
		VI	277.24
8	Va=100mm/min Vo=32ciclos/min	I	215.18
		II	211.08
		III	329.10
		IV	550.91
		V	381.81
		VI	299.93
9	Va=120mm/min Vo=32ciclos/min	I	243.72
		II	259.02
		III	370.61
		IV	591.04
		V	406.70
		VI	303.50

Podemos observar que los valores de dureza en la zona IV, identificada anteriormente como la zona afectada por el calor, son muy superiores a las demás zonas, revelando que hay una falta de uniformidad o un cambio en las propiedades del acero. Esto es posible debido al gran aporte de calor del proceso y al enfriamiento rápido del material, generando estructuras frágiles de alta dureza en la zona de fusión, confirmado por la existencia de fisuras y discontinuidades en algunas de las probetas. Es necesario establecer una temperatura de precalentamiento ya que esta pueda aliviar las tensiones producidas en el proceso y retardar el tiempo de enfriamiento, evitando la formación de estructuras frágiles.

Los valores de las zonas restantes (Zona I, Zona II, Zona III, Zona V y Zona VI), no sufren de una variación importante, es decir que no se encuentran cambios en la propiedad del material de aporte y en el material base que no se encuentra afectado térmicamente. A pesar de que se observa un leve aumento en el valor de dureza en la zona III y la zona V, esto es debido a que se encuentran cercanas a la zona afectada por el calor.

Examinando la interacción entre la variación de las condiciones y los valores de dureza, estos permanecen igual en todas las probetas, razón que puede ser

explicada debido a que el aporte de calor es tan grande que a pesar de las variaciones en los parámetros, sigue afectando de la misma manera a la soldadura.

4.3.2. ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE DISCONTINUIDADES A NIVEL MACRO.

Con este estudio se revelaran las distintas zonas metalúrgicas que se formaron en el proceso de soldadura, y que están definidas en el corte transversal de la probeta. En la Figura 4.19 se observan las probetas ya atacadas con la solución de persulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) y agua.

Con las zonas ya definidas se buscan discontinuidades, inclusiones y fisuras que pueden amenazar la integridad del cordón, en la probeta#2 se observó una falla por soldadura fría (Figura 4.20), esto quiere decir que el material depositado se solidificó antes de unirse con el material base, sin producir la unión por soldadura, esto se debe a que el arco en la soldadura no produjo suficiente calor para fundir el material base y que este se uniera con el material de aporte.

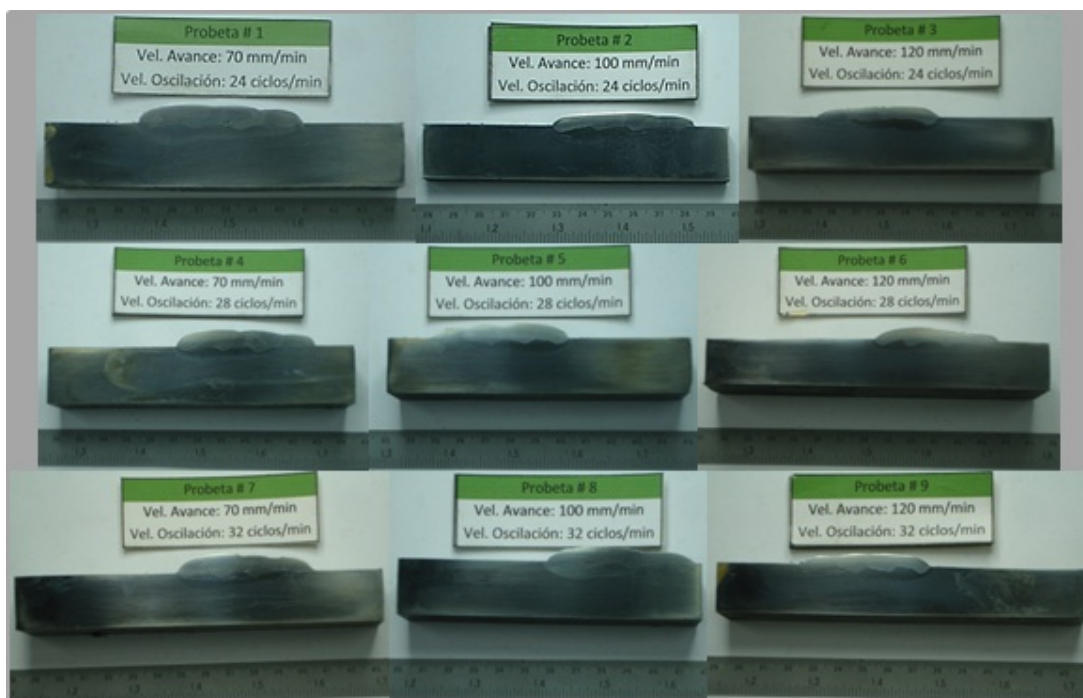


Figura 4.19 Probetas macroatacadas.

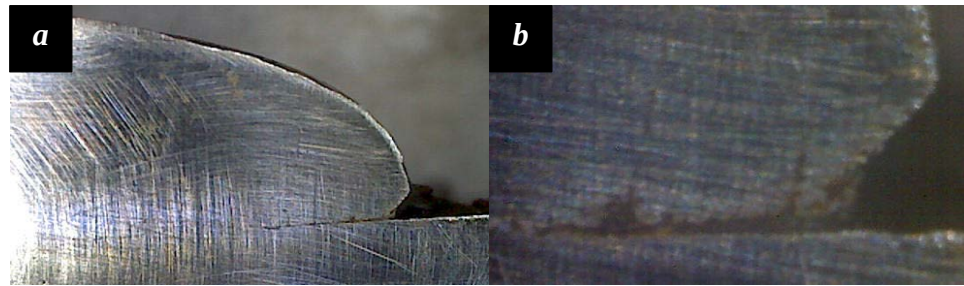


Figura 4.20 Probeta#2, Falla por soldadura fría, a:10x, b:20x

Se encontró otra falla en la probeta #7, que a simple vista se observan grietas e inclusiones a lo largo de la zona limítrofe del material de aporte y la zona afectada por el calor (Figura 4.21). Estas inclusiones, son escorias que no llegan a la superficie del cordón debido a una rápida solidificación del material de aporte, generando tensiones en la zona de fusión posibilitando un surgimiento de grieta. Una de las posibles causas de los defectos en las probetas es la posibilidad de una mala limpieza en la superficie, que al momento de ser soldada, genere una mayor formación de escoria, facilitado la inclusión de escoria en el material depositado.



Figura 4.21 Probeta#7 zona cordón-ZAC 20x.

La probeta #9, aunque presento la formación de inclusiones no afectan significativamente la calidad del cordón, siendo esta condición la de mejor comportamiento en este estudio.

Algo característico que se observó en todas las probetas son las zonas de mayor penetración, que por ser depositado el material de aporte de manera oscilatorio se formaron picos de penetración en cada extremo del cordón depositado, acentuando la visualización del cordón solapado en el proceso, como se ve en la Figura 4.22. La penetración en cada una de las probetas con las distintas condiciones fueron medidas en cuatro puntos del cordón obteniendo los valores medios de la Tabla 4.3.



Figura 4.22 Forma de la penetración por movimiento oscilatorio.

Tabla 4.3 Valores promedio de penetración en las distintas condiciones.

Condición #	Penetración (mm)
1	2.08
2	1.98
3	1.88
4	1.65
5	2.18
6	2.46
7	1.50
8	2.16
9	2.48

Estos valores serán ingresados en el software estadístico MINITAB 16, para obtener mediante un análisis de varianza la influencia de cada parámetro en las distintas condiciones, con la penetración.

4.3.3. ANALISIS DEL ENSAYO METALOGRAFICO.

Después de atacar químicamente con nital, la superficie de las probetas, se reveló la microestructura generada por el proceso de soldadura, visualizando cambios bruscos entre las zonas de la soldadura. En la Figura 4.23, se observa este tipo de cambios y que son recurrentes en las 9 condiciones estudiadas. Es por eso que para un análisis exhaustivo de la microestructura se utilizara el equipo de microscopia electrónica de barrido, que complementara este estudio, que no se notan diferencias significativas a nivel microestructural entre las probetas estudiadas.

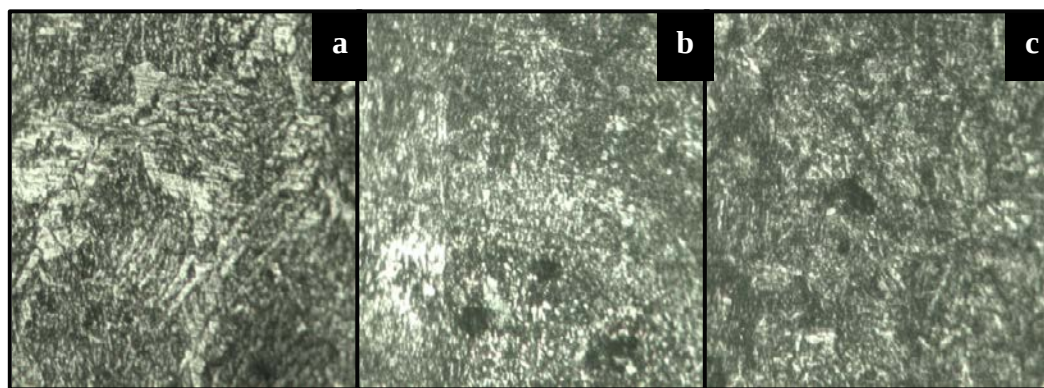


Figura 4.23 Probeta Microatacada 200x; a) Material de aporte, b) ZAC, c) Material base.

4.4. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

Con ayuda del software estadístico MINITAB se realizó un análisis de varianza donde la variable que obtendremos como respuesta será la penetración, y así determinar la influencia de la velocidad de avance y la velocidad de oscilación sobre esta. En la Tabla 4.4 se presentan los resultados del análisis de varianza ANOVA donde los parámetros independientes (velocidad de avance y velocidad de oscilación) y el parámetro dependiente (penetración), en la cual se aprecian diferentes datos tales como las fuentes de variación, suma de cuadrados, promedio de cuadrados, un valor estadístico “F” y el valor de significación “P” de las variables empleadas en el diseño experimental.

Tabla 4.4 Análisis de varianza en función de la penetración.

Origen	GL	Suma de cuadrados	Suma de cuadrados Ajustada	Promedio de cuadrados Ajustado.	Relación “F”	Probabilidad “P”
Va (mm/min)	2	1.7568	1.7568	0.8784	2.99	0.067
Vo (ciclos/min)	2	0.0885	0.0885	0.0442	0.15	0.861
Interacción (Va*Vo)	4	1.6640	1.6640	0.4160	1.42	0.255

Observando el valor de “P” de las dos variables estudiadas, se obtiene un valor mayor al valor crítico de 0.05, esto quiere decir que las variables de velocidad de avance y velocidad de oscilación individualmente no tienen un efecto estadístico significativo sobre la penetración del proceso de soldadura, aunque al estar el valor “P” de la velocidad de avance cercano al valor crítico, todavía puede existir una relación de dependencia entre esta variable y la variable de respuesta.

Ahora al observar el valor “P” en la interacción de las dos variables encontramos, que tampoco tiene una influencia estadística significativa, siendo este resultado influenciado por el efecto del valor “P” de la velocidad de oscilación. Por lo que es preferible el estudio estadístico individual de la velocidad de avance, ya que esta tendrá mayor influencia en el proceso de soldadura.

En la gráfica de la Figura 4.24, se puede apreciar como es el efecto de los parámetros escogidos, en la penetración de manera independiente. Para el rango de velocidad de avance de (70 – 120)mm/min se observa una mayor influencia en la penetración del cordón, que mientras a mayor velocidad mayor será la penetración del cordón, esto difiere con lo publicado en (The Welding Institute, 1980), donde explica que a mayor velocidad menor penetración, esto se debe a que los parámetros usados todavía se encuentran por debajo y no han llegado al punto óptimo de penetración donde al seguir aumentando la velocidad, la penetración disminuiría.

También se aprecia, en la Figura 4.24, que la influencia de la velocidad oscilación en la penetración no es de gran importancia ya que la variación obtenida en función de la velocidad se mantuvo en la media de la penetración, confirmando el valor de significación “P” obtenido en el análisis de varianza.

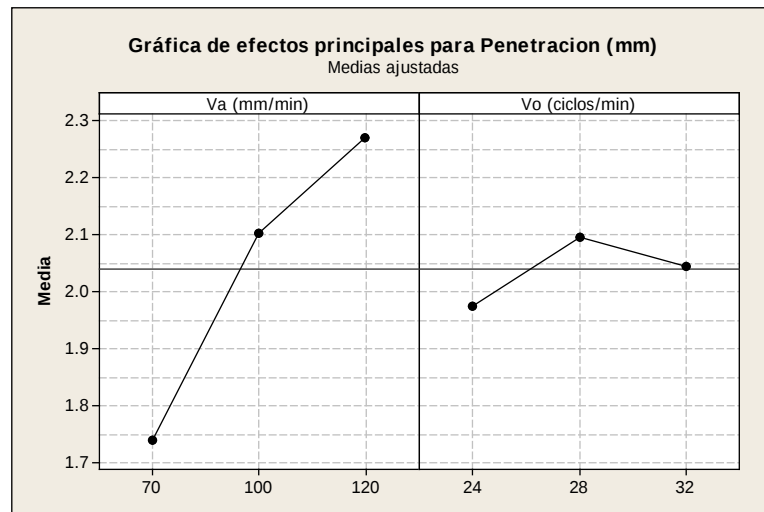


Figura 4.24 Gráfica de los efectos individuales de los parámetros.

En la Figura 4.25, se observa una gráfica donde los parámetros de velocidad de oscilación y velocidad de avance interactúan entre sí en función de la penetración, obteniendo que a la velocidad más baja de oscilación, la penetración disminuye mientras se aumenta la velocidad de avance, caso contrario en los valores de velocidad media y alta, en la que hay mayor penetración al aumentar la velocidad de avance, obteniendo así los valores más óptimos del proceso, siendo estos los mayor velocidad de avance y media y alta velocidad de oscilación.

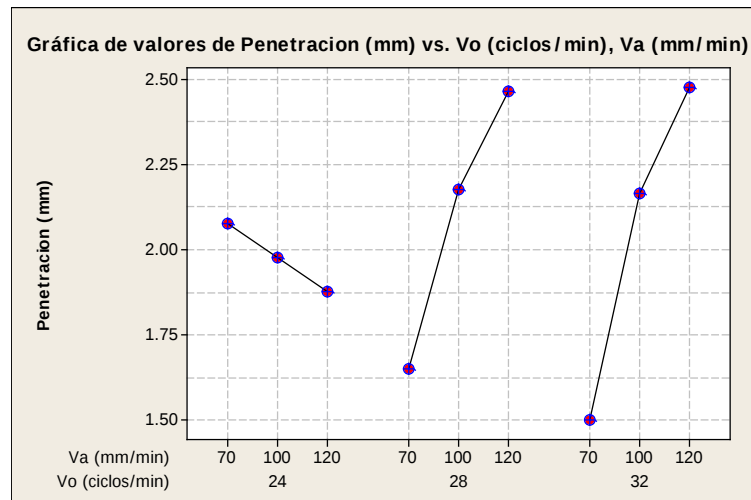


Figura 4.25 Gráfico de interacción de parámetros.

Para obtener las condiciones más óptimas aplicadas al proceso de soldadura se utilizara la metodología de superficie de respuesta, donde obtendremos un área de valores óptimos que con la ayuda de la gráfica de contornos la podremos apreciar mejor. La gráfica de contornos es una proyección horizontal de la superficie de respuesta, que nos permite delimitar las distintas áreas de una superficie.

En la Figura 4.26 y en la Figura 4.27 se pueden observar la superficie de respuesta y la gráfica de contorno, que se obtuvieron a través del software estadístico, en estas podemos estimar que las áreas en donde la penetración fue mayor, es el área que se encuentra cercana a los valores de 120 mm/min (velocidad de avance) y 32 ciclos/min (velocidad de oscilación). En la gráfica de contornos se pueden visualizar de mejor manera las áreas de menor y mayor penetración, el área de color rojo será el área donde hay poca penetración del cordón y el área verde claro el área de mayor penetración. El área de valores en donde la penetración es mayor a los 2,4 mm, delimitadas por el color verde claro, corresponde a una velocidad de avance entre (111 y 120) mm/min y una velocidad de oscilación entre (27 y 32) ciclos/min. Lo que también quiere decir que hay la posibilidad que valores más óptimos en cuanto a la penetración de material de aporte, se puedan obtener con un mayor aumento de las velocidades estudiadas.

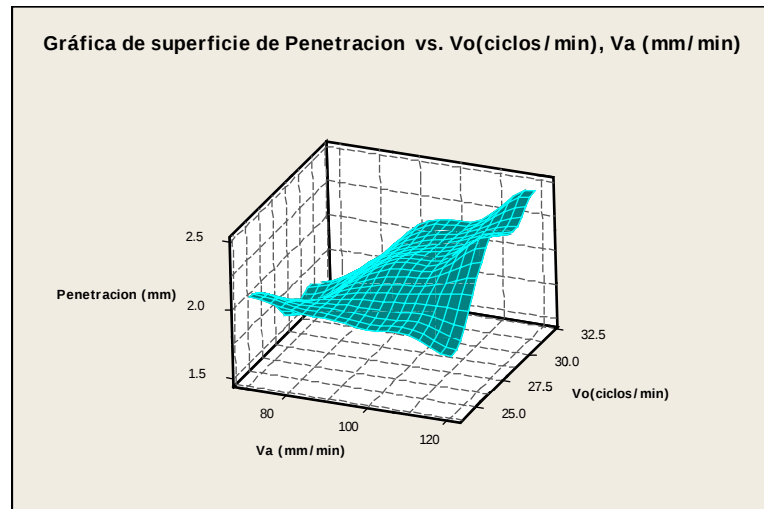


Figura 4.26 Gráfica de superficie de respuesta en función de la penetración.

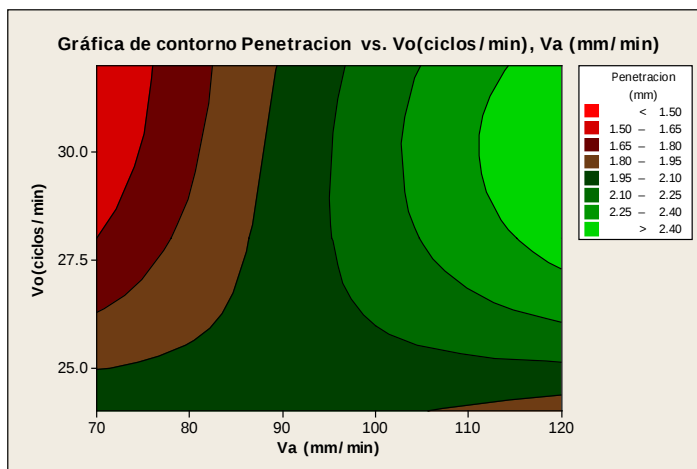


Figura 4.27 Grafica de contornos en función de la penetración.

Al analizar toda la información obtenida mediante el análisis de varianza y las distintas gráficas, los valores más óptimos en función de la penetración, es el valor de 120 mm/min para la velocidad de avance y de 32 ciclos/min para la velocidad de oscilación, aunque pueden existir valores de mayor velocidad que también pueden ser óptimos.

4.5. ANÁLISIS DEL ENSAYO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).

Se realizó la microscopia electrónica de barrido a las probetas que presentaron la peor condición en la inspección visual (condición #7), así como también la de mayor, mediano y menor dureza en la zona afectada por el calor (condiciones #7, #4, #1, respectivamente), la mejor y la peor condición en el ensayo de ultrasonido (condiciones #9, #6, respectivamente), la mejor condición del análisis de varianza (condición #9) y finalmente la que representa las condiciones que tiene actualmente la empresa (condición #5).

En todas las condiciones que estamos evaluando, la estructura del material de depósito, no varía de forma importante en las distintas condiciones de soldadura, observándose en la Figura 4.28. Además, en el análisis químico del material de aporte, Figura 4.29, tampoco se encuentra una variación significativa, mostrando valores similares en las distintas condiciones, en cuanto al porcentaje en peso de

hierro (Fe), manganeso (Mn), cromo (Cr) y silicio (Si), valores que a su vez son similares a los dados por el fabricante. Confirmando que no hay cambios significativos que afecten la propiedad del material.

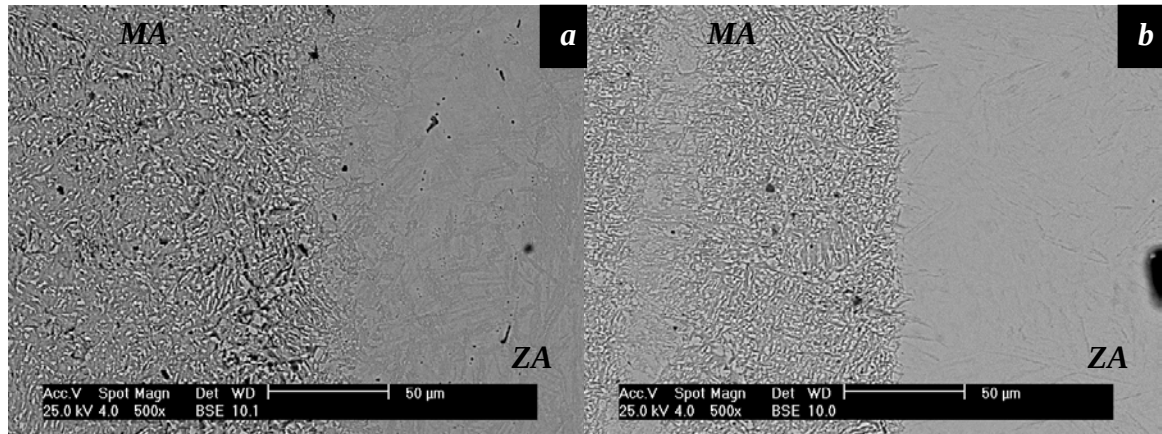


Figura 4.28 Zona material de depósito-ZAC-500x, a.-Probeta#5; b.-Probeta#9.

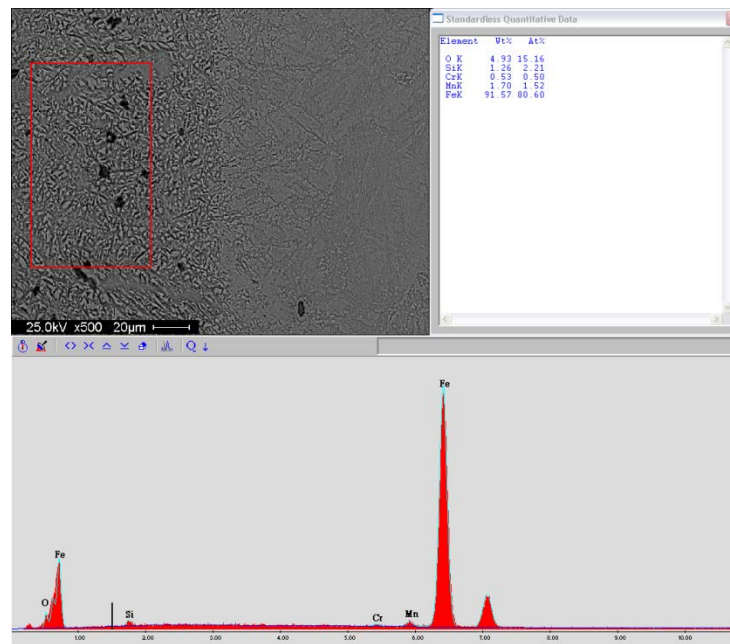


Figura 4.29 Análisis espectroscópico del material depositado Probeta#1 500x

Sin embargo si se observa cierta variación en lo que se conoce como zona de fusión, que funde y luego solidifica violentamente, generando estructuras de tipo Widmāstatten, como se puede observar en la Figura 4.30, las cuales tienen cierta

fragilidad. En este punto pareciera ser que radica la condición crítica de la de la integridad física de la unión.

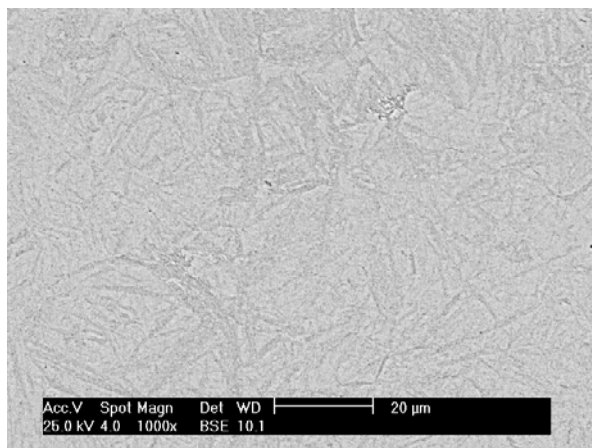


Figura 4.30 Estructura de la ferrita acicular tipo Widmāstatten en ZAC. 1000x.

En base de que se ha observado consistentemente que si existe la grieta, esta, se propaga en la intercara del material de aporte y de la zona afectada por el calor, a través de la estructura Widmāstatten debido a su fragilidad. En las probetas más afectadas, este tipo de estructuras de tipo Widmāstatten tienen una mayor dimensión y una presencia masiva de esta fase. En la Figura 4.31 se observa como la grieta se propaga en la estructura frágil.

Otro aspecto importante en cuanto a las condiciones que se han estudiado que la zona afectada por el calor es muy amplia, y pareciera ser que es debido a la presencia de una importante cantidad de carbón, que genera el incremento de la colonia perlítica, la cual se ve interrumpida abruptamente entre la zona afectada por el calor y el material base, como se observa en la Figura 4.32, donde la colonia perlítica son las formaciones que se observan más claras en la imagen. Aunque no se ha podido determinar zonas disfuncionales, tiene mayor amplitud dependiendo de la condición.

La ferrita Widmāstatten se forma debido a las altas temperaturas del metal con un enfriamiento muy rápido (fuera del equilibrio), esto se podría evitar controlando la forma de enfriamiento del proceso de soldadura, aplicando pre y post calentamiento,

en el proceso de recuperación por soldadura, como también regulando el aporte de calor del proceso en sí.

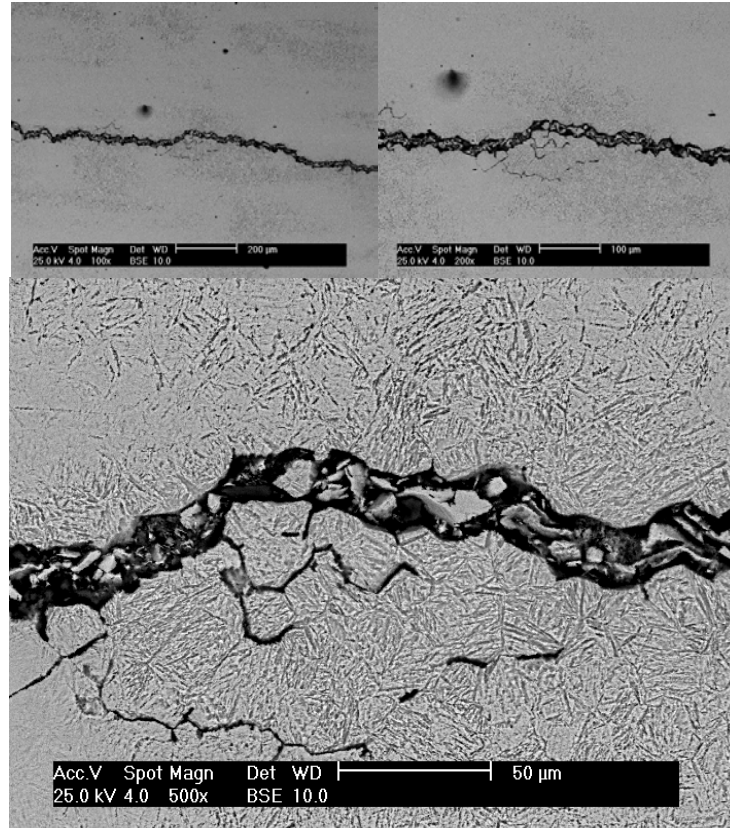


Figura 4.31 Propagación de la grieta en la estructura ferrítica tipo Widmstätten. Probeta #7 500x.

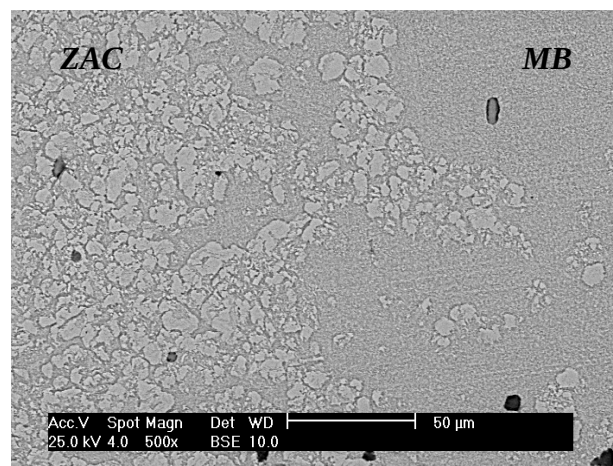


Figura 4.32 Interrupción de la colonia perlítica en el material base. Probeta#4 500x.

También se observan grandes cantidades de inclusiones provocadas por formaciones de sulfuro de manganeso, que según sea la condición, la geometría de la inclusión aumenta o disminuye. La Figura 4.33 muestra el análisis espectroscópico en el que el porcentaje en peso del manganeso (Mn) y el azufre (S) son los mayores conseguidos. Estas inclusiones pueden generar esfuerzos residuales que unido a la interfase incoherente, puede ocasionar una falla de gran magnitud.

La Figura 4.34 y la Figura 4.35, muestra los análisis espectroscópicos del material base y de la zona afectada por el calor en la probeta#1. Los valores de, hierro (Fe), cromo (Cr), manganeso (Mn) y silicio (Si), arrojados por este análisis permanecieron constantes en todas las demás probetas, obteniendo los valores esperados para el acero AISI P20. Lo cual sugiere que este cambio estructural no tiene consigo una variación químico elemental.

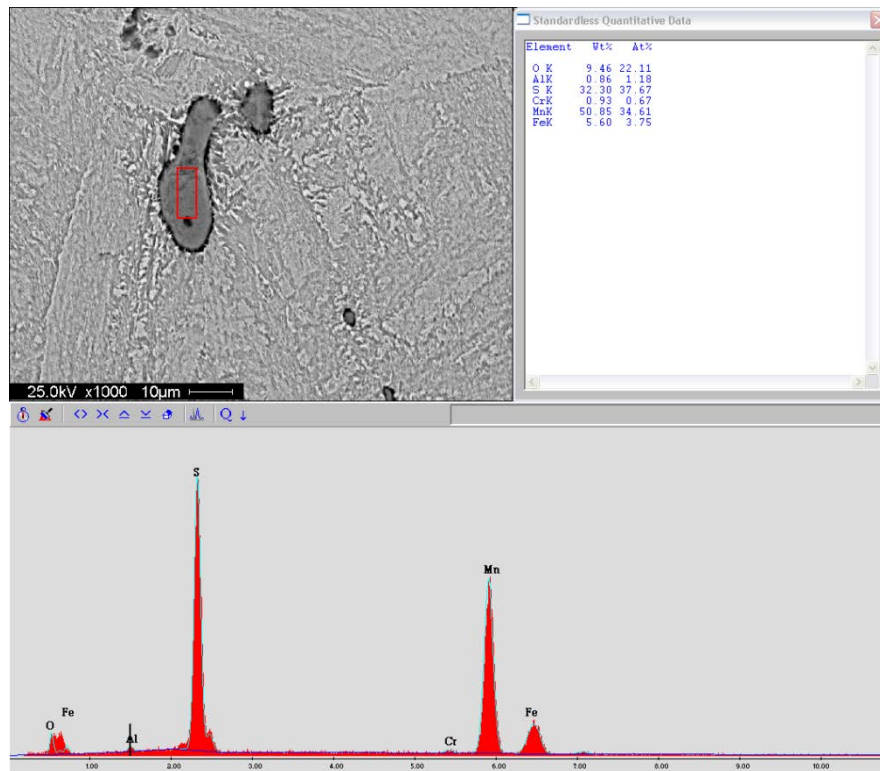


Figura 4.33 Inclusión por sulfuro de manganeso zona ZAC Probeta#1 1000x.

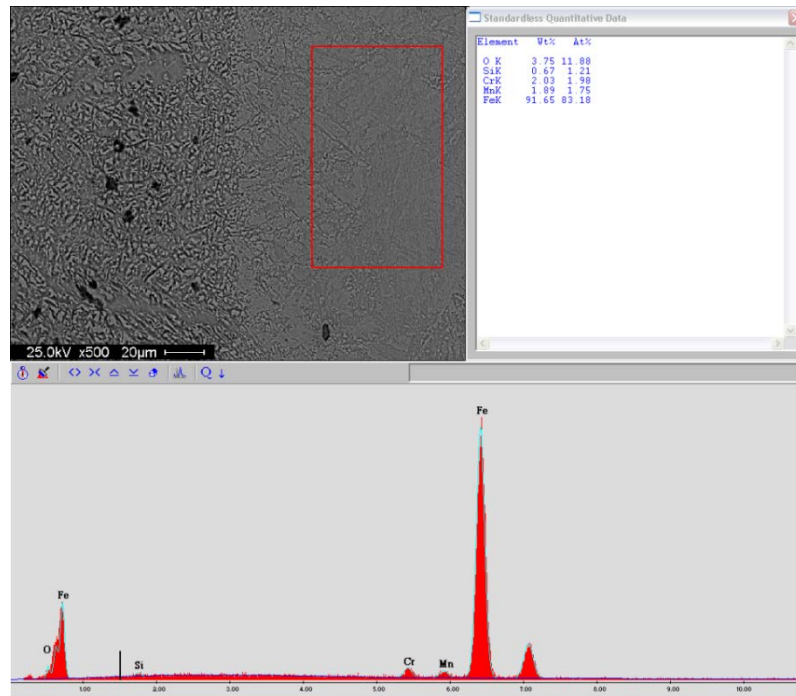


Figura 4.34 Análisis espectroscópico de ZAC, probeta#1, 500x.

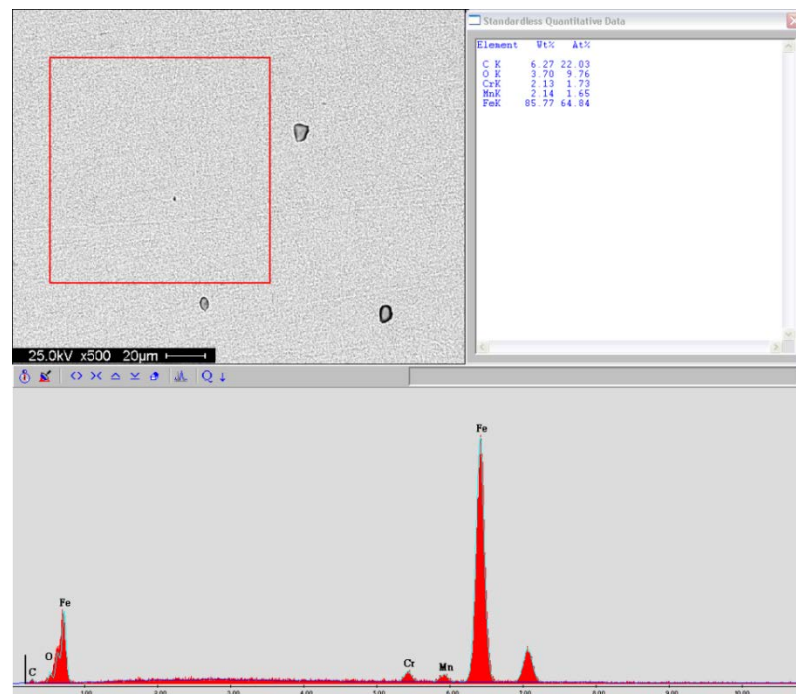


Figura 4.35 Análisis espectroscópico del material base, probeta#1, 500x

Después de haber analizado la microestructura en las zonas de la soldadura, la probeta#9 es la que presento defectos con poca importancia como inclusiones o porosidades de tamaños reducidos y que se encuentran en la zona superficial del cordón, que pueden desaparecer con un precalentamiento adecuado. Y a pesar del marcado cambio microestructural entre el material de aporte y la zona afectada por el calor, la microestructura entrelazada es continua a lo largo de la unión, generando una buena adherencia.

CONCLUSIONES

Después de ser analizados los resultados obtenidos en el presente trabajo, se presentan las siguientes conclusiones:

- En base a los resultados obtenidos en el análisis de varianza los valores óptimos de velocidad de avance y velocidad de oscilación para el proceso de recuperación por soldadura se encuentra en el intervalo de:

Parámetros	Velocidad de avance (mm/min)	Velocidad de oscilación (ciclos/min)
Rango Óptimo	111 - 120	27.3 - 32

- Debido a que el acero AISI P20, tiene una mayor resistencia a la soldabilidad, el intervalo de valores óptimos mejoraran considerablemente la soldadura en el acero ASTM A-216 WCB, incluso los parámetros tendrán una mayor influencia en el proceso de recuperación.
- El calor aportado en el proceso de soldadura genera cambios microestructurales y estructurales tanto en la soldadura como en el material base. Aumentado su resistencia al desgaste pero disminuyendo la resistencia al impacto.
- Es necesario la implementación del precalentamiento de la pieza a recuperar, esto evitara el enfriamiento rápido del material de aporte, que genera microestructuras no deseadas en la zona afectada térmicamente.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda un precalentamiento de 160°C, calculado mediante la norma AWS-D1.1 bajo el método de control de hidrogeno.
- Controlar el aporte de calor generado por el depósito de material.
- Realizar estudios posteriores para analizar la influencia de los parámetros de voltaje y amperaje en el proceso de recuperación por soldadura.
- Utilizar la velocidad de avance y velocidad de oscilación más alta.
- Realizar post-calentamiento en la soldadura para liberar esfuerzos acumulados y evitar el enfriamiento rápido de material de aporte.
- En caso de un posterior estudio, utilizar probetas de mayores dimensiones para mejorar la absorción de calor de la pieza y simular de una mejor manera el proceso de recuperación en la bomba hidráulica tipo tornillo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Testing and Materials. (2000). *ASTM E340 - 00(2006) Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys*. USA: ASTM.
- American Society of Testing and Materials. (2007). *ASTM E407 - 07e1 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. USA: ASTM.
- American Society of Testing and Materials. (2008). *ASTM A216 / A216M - 08 Standard Specification for Steel Castings, Carbon, Suitable for Fusion Welding, for High Temperature Service*. USA: ASTM.
- American Society of Testing and Materials. (2008). *ASTM A681 - 08 Standard Specification for Tool Steels Alloy*. USA: ASTM.
- American Society of Testing and Materials. (2010). *ASTM A488 / A488M - 10 Standard Practice for Steel Castings, Welding, Qualifications of Procedures and Personnel*. USA: ASTM.
- American Society of Testing and Materials. (2011). *ASTM E384 - 11e1 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*. USA: ASTM.
- American Welding Society. (2010). *AWS D1.1 Structural Welding Code-Steel*. Miami, FL: AWS.
- American Welding Society Inc. (1997). *Welding Handbook, Metals and Their Weldability* (7ma ed., Vol. 4). Florida: AWS.
- ASM International. (1993). *ASM Handbook, Metallography and Microstructures* (10ma ed., Vol. 9). USA: ASM.
- ASM international. (1993). *ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering* (10ma ed., Vol. 6). USA: ASM.
- CASTI. (2003). *Metals Blue Book, Welding Filler Metals* (4ta ed.). Alberta: CASTI Publishing Inc.
- Coloma, P. (2007). *Planificación, Construcción y Recuperación de Construcciones Soldadas: Análisis de tres casos*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

- Hobart Brothers A.G. (1964). *Proceso de Soldadura electrica HOBART, Micro-Wire*. Amsterdam: Hobart Brothers A.G.
- Ignoto, V. (2011). Soldadura para Ingenieros. *Apuntes*. Caracas: No Publicado.
- Iordachescu, D., & Quintino, L. (2008). Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. *Journal of Materials Procesing Technology*, 391-397.
- Kim, I., Son, K., Yang, Y., & Yaragada, P. (2003). Sensitivity analysis for process parameter in GMA welding processes using a factorial design method. *International Journal of Machines Tools and Manufacture*, 763-769.
- Krassik, I., Messina, I., Cooper, P., & Heald, C. (2001). *Pump Handbook* (3ra ed.). USA: McGraw-Hill.
- Lant, T., Robinson, B., Spafford, B., & Storesund, J. (2001). Review of weld repair procedures for low alloy steels designed to minimise the risk of future cracking. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 813-818.
- Lazaro, A., & Lincoln, M. (1998). Soldadura de Mantenimiento, Tecnologia, Procesos y Consumibles. *Articulo Tecnico*, 50-52.
- Llanos, A., & Constant, H. (2000). *Estudio de los especimenes tubulares con discontinuidades en la soldadura por medio de las tecnicas de radiografia y ultrasonido*. Caracas: No publicado.
- Mousavi, M., & Haeri, M. (2011). Estimation and control of droplet size and frequency in projected spray mode of a gas metal arc welding (GMAW) process. *ISA Transactions*, 409-418.
- Nelik, L. (1999). *Centrifugal and Rotary Pumps, fundamentals with aplicaciones*. USA: CRC Press.
- Palmer, A., & King, R. (2004). *Subsea Pipeline Engineering*. Tulsa: PennWell Corporation.
- Pires, I., Quintino, L., & Miranda, R. (2007). Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation. *Materials & Design*, 1623-1631.

- Robinson, A., & Bonell, S. (2010). Longer life with welded claddings. *World Pupms*, 42-45.
- Salazar, M. (2006). *Soldabilidad de los aceros*. Patagonia: Universidad Nacional del Comahue.
- Silva, B., Pires, I., & Quintino, L. (2008). Welding technologies for repairing plastic injection moulds. *Materials Scince forum*, 587-588.
- Smith, W. (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingenieria de Materiales* (3ra ed.). Madrid: McGraw-Hill Interamericana de Espana.
- The Welding Institute. (1980). *Weld Hardfacing and Surfacing*. Cambridge: The Welding Institute.
- Valero, M. (2004). *Recuperacion y Mejora de Comportamiento de Elementos de Maquinas por Soldadura, Recargue, Proyeccion Termica y Aplicaciones Especiales*.
- Vilar, R., Zapata, J., & Ruiz, R. (2009). An automatic system of clasification of weld defects in radiographic images. *NDT&E International*, 467-476.