



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

**TEMA: INFLUENCIA DE LOS GASES DE PROTECCIÓN EN LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTRUCTURA
METALGRÁFICA, CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA Y LA
PRODUCTIVIDAD OBTENIDAS EN EL PROCESO GMAW, AL
SOLDAR ACERO ASTM A36 CON DIFERENTES GASES DE
PROTECCIÓN**

AUTOR: QUISILEMA SÁENZ, CARLOS MAURICIO

DIRECTOR: ING. NARANJO GUATEMALA, CARLOS RODRIGO.

SANGOLQUÍ

Diciembre 2015



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación **“INFLUENCIA DE LOS GASES DE PROTECCIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTRUCTURA METALGRÁFICA, CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA Y LA PRODUCTIVIDAD OBTENIDAS EN EL PROCESO GMAW, AL SOLDAR ACERO ASTM A36 CON DIFERENTES GASES DE PROTECCIÓN”** realizado por el señor estudiante **QUISILEMA SÁENZ CARLOS MAURICIO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos, y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **QUISILEMA SÁENZ CARLOS MAURICIO** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 03 de Diciembre del 2015



ING. CARLOS NARANJO

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, QUISILEMA SÁENZ CARLOS MAURICIO, con cédula de identidad N° 1722655501 declaro que este trabajo de titulación **“INFLUENCIA DE LOS GASES DE PROTECCIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTRUCTURA METALOGRAFICA, CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA Y LA PRODUCTIVIDAD OBTENIDAS EN EL PROCESO GMAW, AL SOLDAR ACERO ASTM A36 CON DIFERENTES GASES DE PROTECCIÓN”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 03 de Diciembre del 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Quisilema Sáenz Carlos Mauricio', written over a horizontal line.

Quisilema Sáenz Carlos Mauricio



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, QUISILEMA SÁENZ CARLOS MAURICIO, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“INFLUENCIA DE LOS GASES DE PROTECCIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTRUCTURA METALOGRAFICA, CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA Y LA PRODUCTIVIDAD OBTENIDAS EN EL PROCESO GMAW, AL SOLDAR ACERO ASTM A36 CON DIFERENTES GASES DE PROTECCIÓN”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 03 de Diciembre del 2015



Quisilema Sáenz Carlos Mauricio

DEDICATORIA

A mis padres, por su esfuerzo de cada día para que a sus hijos seamos mejores personas.

A María Magdalena mi señora madre, que siempre estuvo a mi lado en los momentos más difíciles y en mis malos actos.

A Carlos Omero mi padre, por enseñarme el valor del trabajo y la dedicación y la importancia de realizar todo trabajo a conciencia.

A Maribel mi hermana, por su apoyo incondicional y por ser una hermana ejemplar.

A Diego mi hermano, por confiar en mí y su cooperación en el presente trabajo y por compartir tantos buenos momentos a mi lado.

A mi familia materna Verito, Ricky, Javi, Alejandra y mi tía Juana, por su apoyo y palabras de aliento.

Carlos Mauricio Quisilema Sáenz

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanos por su apoyo y motivación para alcanzar una meta más y la primera de mi vida profesional.

A mis familiares que de una u otra manera estuvieron pendientes del progreso de mi investigación.

Al Ingeniero Carlos Naranjo tutor del presente proyecto de investigación por su asesoría y valiosos conocimientos compartidos para la finalización del proyecto.

Al Ingeniero Luis Segura por su tiempo a pesar de no ser designado como tutor de la investigación.

A todos los docentes que en un instante de mi vida me hicieron apreciar lo hermoso que es la carrera de Ingeniería Mecánica.

A la empresa privada por el apoyo en el presente proyecto de investigación.

A mi grupo de amigos con el cual compartimos agradables e inolvidables momentos.

A los profesores estrictos que me enseñaron a nunca huir a las dificultades.

Carlos Mauricio Quisilema Sáenz

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I	1
GENERALIDADES	1
1.1. TÍTULO	1
1.2. ANTECEDENTES	1
1.3. JUSTIFICACIÓN	1
1.4. OBJETIVOS	2
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.5. ALCANCE	3
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1. PROCESO GMAW	4
2.1.1. EQUIPO PROCESO GMAW	4
2.1.2. TIPOS DE TRANSFERENCIA	5
2.1.2.1. TRANSFERENCIA POR CORTO CIRCUITO	5
2.1.2.2. TRANSFERENCIA GLOBULAR	5
2.1.2.3. TRANSFERENCIA SPRAY	6
2.1.3. TIPOS DE APLICACIÓN	6
2.1.3.1. SEMIAUTOMÁTICA	6
2.1.3.2. AUTOMÁTICA	6
2.1.3.3. MECANIZADA	6

2.1.3.4.	ROBOTIZADA.....	7
2.2.	ACERO ASTM A36.....	7
2.2.1.	SOLDABILIDAD ACERO ASTM A36.....	7
2.2.2.	DENOMINACIÓN ASTM.....	7
2.2.3.	CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	8
2.2.3.1.	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO ASTM A36.....	8
2.2.3.2.	COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO ASTM A36.....	9
2.2.3.3.	CARBONO EQUIVALENTE.....	9
2.2.3.4.	CONSTITUYENTES DEL ACERO ASTM A36.....	10
2.3.	ANÁLISIS DE NORMATIVAS.....	11
2.3.1.	ESPECIFICACIÓN AWS D1.1.....	11
2.3.2.	ESPECIFICACIÓN AWS B4.0.....	12
2.3.3.	ESPECIFICACIÓN AWS B1.11.....	12
2.4.	GAS DE PROTECCIÓN.....	12
2.4.1.	PROPIEDADES.....	12
2.4.1.1.	PROPIEDADES FÍSICAS.....	12
2.4.1.1.1.	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	12
2.4.1.1.2.	DISASOCIACIÓN Y ASOCIACIÓN.....	14
2.4.1.1.3.	REACTIVIDAD.....	15
2.4.1.1.4.	TENSIÓN SUPERFICIAL.....	15
2.4.2.	PRINCIPALES GASES DE PROTECCIÓN.....	16
2.4.2.1.	ARGÓN.....	16
2.4.2.2.	DIÓXIDO DE CARBONO.....	16
2.4.2.3.	MEZCLA ARGÓN – CO ₂	16
2.5.	METALURGIA DE LA SOLDADURA.....	17
2.5.1.	ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE (ZAT).....	17
2.6.	DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA.....	19
2.6.1.	ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	19
2.6.1.1.	CONTENIDO DEL WPS.....	19
2.6.2.	ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	19
2.6.2.1.	ENSAYO DE TENSIÓN.....	20
2.6.2.1.1.	DIMENSIONES ESPECÍMENES DE TENSIÓN.....	21
2.6.2.2.	ENSAYO DE DOBLEZ GUIADO.....	21
2.6.2.2.1.	DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE DOBLADO.....	22

2.6.2.3.	ENSAYO DE TENACIDAD	23
2.6.2.3.1.	ENSAYO CHARPY (NOTCH-V)	23
2.6.2.3.2.	CAÍDA DE PESO (DROP – WEIGTH)	24
2.6.2.3.3.	DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE IMPACTO	25
2.6.2.4.	ENSAYO DE DUREZA	26
2.6.2.4.1.	DUREZA ROCKWELL	27
2.6.2.4.2.	DIMENSIONES ESPECÍMENES DE DUREZA Y METALOGRAFÍA	27
2.6.3.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	28
2.6.3.1.	INSPECCIÓN VISUAL	28
2.7.	CUPÓN DE PRUEBA Y ESPECÍMENES DE PRUEBAS	28
2.8.	PRODUCTIVIDAD	29
2.9.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	30
2.9.1.	DISEÑO DE CUADRADOS LATINOS	30
2.9.1.1.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	30
CAPÍTULO III		32
DISEÑO DE LA SOLDADURA Y EXPERIMENTO		32
3.1.	DISEÑO DEL CUPÓN DE PRUEBA	32
3.2.	FORMA Y TAMAÑO DE LAS JUNTA	32
3.2.1.	TIPO DE JUNTA	32
3.2.1.1.	JUNTA A TOPE	33
3.2.1.2.	JUNTA A ESQUINA	33
3.2.1.3.	JUNTA TRASLAPADA	33
3.2.1.4.	JUNTA DE BORDE	33
3.2.1.5.	JUNTA EN T	33
3.2.1.6.	JUNTA DE PENETRACIÓN COMPLETA	33
3.2.1.7.	JUNTA DE PENETRACIÓN PARCIAL	34
3.2.2.	TIPO DE SOLDADURA	34
3.2.2.1.	SOLDADURA DE FILETE	35
3.2.2.2.	SOLDADURA DE RANURA	35
3.2.3.	DIMENSIONES DE LA JUNTA	35
3.3.	DIMENSIONES DEL CUPÓN DE PRUEBA	37

3.4.	VARIABLES DEL PROCESO	37
3.4.1.	VARIABLES ESENCIALES.....	37
3.5.	MATERIAL BASE.....	38
3.6.	MATERIAL DE APORTE	38
3.7.	DISEÑO DE LOS WPS	39
3.8.	IDENTIFICACIÓN DE LOS WPS.....	41
3.9.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	41
3.9.1.	VARIABLES DE EXPERIMENTACIÓN.....	41
3.9.1.1.	VARIABLES PRINCIPALES DEL EXPERIMENTO.....	42
3.9.1.2.	VARIABLES DE RUIDO.....	42
3.9.2.	FACTORES DEL EXPERIMENTO.....	43
3.9.2.1.	FACTOR PRINCIPAL DE BLOQUE.....	43
3.9.2.2.	FACTORES DE VARIABLE	43
3.9.3.	ESTRUCTURA DEL CUADRADO LATINO GENERADO	44
CAPÍTULO IV.....		45
APLICACIÓN DE LA SOLDADURA Y ENSAYOS		45
4.1.	CONTROLES ANTES DE LA SOLDADURA	45
4.1.1.	SOLDADORA	45
4.1.1.1.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA SOLDADORA	45
4.1.1.2.	AJUSTE DE PARÁMETROS INICIALES EN LA SOLDADORA ..	46
4.1.2.	ENSAMBLE Y CALIBRACIÓN EQUIPO SOLDADOR.....	47
4.1.3.	ELABORACIÓN DE LOS CUPONES	47
4.1.4.	CONTROL METROLÓGICO DE LOS CUPONES	48
4.1.5.	IDENTIFICACIÓN DE LOS CUPONES DE SOLDADURA	48
4.1.6.	CONTROL DE MASA	49
4.2.	CONTROLES DURANTE LA SOLDADURA	50
4.2.1.	VELOCIDAD DE AVANCE.....	50
4.2.2.	VOLTAJE	52
4.2.3.	VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN DEL ALAMBRE.....	52
4.2.4.	AMPERAJE.....	52
4.2.5.	FLUJO DE GAS	53
4.2.6.	TIEMPO DE SOLDADURA	54

4.3.	CONTROLES DESPUÉS DE LA SOLDADURA	55
4.3.1.	LIMPIEZA DE LOS CORDONES	55
4.3.2.	CONTROL DE MASA FINAL	56
4.4.	ENSAYOS.....	56
4.4.1.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	56
4.4.1.1.	GEOMETRÍA DE LOS CORDONES.....	56
4.4.1.2.	ANÁLISIS METALOGRÁFICO	57
4.4.1.2.1.	METALOGRAFÍA.....	57
4.4.1.2.2.	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO	57
4.4.2.	ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	59
4.4.2.1.	ENSAYO DE TENSIÓN	59
4.4.2.1.1.	PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO	59
4.4.2.1.2.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	60
4.4.2.1.3.	CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PROBETAS	61
4.4.2.2.	ENSAYO DE TENACIDAD	61
4.4.2.2.1.	PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO	62
4.4.2.2.2.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	62
4.4.2.2.3.	CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PROBETAS	63
4.4.2.3.	ENSAYO DE DOBLADO GUIADO.....	64
4.4.2.3.1.	PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO.....	64
4.4.2.3.2.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	64
4.4.2.4.	ENSAYO DE DUREZA	66
4.4.2.4.1.	PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO.....	66
4.4.2.4.2.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	67
CAPÍTULO V.....		69
RESULTADOS.....		69
5.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
5.1.1.	TIEMPO DE SOLDADURA.....	69
5.1.2.	MATERIAL DEPOSITADO EN LOS DIFERENTES CUPONES ..	69
5.1.3.	INSPECCIÓN VISUAL	70

5.1.3.1.	DEFECTOS DE SOLDADURA	70
5.1.4.	CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA.....	71
5.1.4.1.	DIMENSIONES.....	71
5.1.5.	ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE	74
5.1.5.1.	RESULTADOS.....	74
5.1.5.2.	ANÁLISIS.....	76
5.1.6.	MICROESTRUCTURA.....	76
5.1.6.1.	RESULTADOS.....	76
5.1.7.	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	81
5.1.7.1.	DUREZA	81
5.1.7.1.1.	RESULTADOS.....	81
5.1.7.1.2.	ANÁLISIS.....	84
5.1.7.2.	TENSIÓN	85
5.1.7.2.1.	RESULTADOS.....	85
5.1.7.2.2.	ANÁLISIS.....	88
5.1.7.3.	TENACIDAD	89
5.1.7.3.1.	RESULTADOS.....	89
5.1.7.3.2.	ANÁLISIS.....	91
5.1.7.4.	DOBLADO	92
5.1.7.4.1.	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	92
5.1.7.4.2.	RESULTADOS.....	92
5.1.8.	PRODUCTIVIDAD	94
CAPÍTULO VI.....		100
ANÁLISIS ECONÓMICO		100
6.1.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO	100
6.2.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS JUNTAS.....	101
6.2.1.	COSTOS DIRECTOS	101
6.2.2.	COSTOS INDIRECTOS.....	101
6.2.3.	COSTO DE CADA JUNTA ELABORADA.....	101
CAPÍTULO VII.....		102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		102

7.1.	CONCLUSIONES	102
7.2.	RECOMENDACIONES	103
	BIBLIOGRAFÍA	104
	ANEXO 1 WPS ESTABLECIDO	105
	ANEXO 2 HOJAS DE DATOS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Equipo soldador empleado en el proyecto.....	4
Figura 2	Perfiles de contorno en función de la conductividad térmica del gas de protección.....	13
Figura 3	Aporte de Calor de los gases.....	14
Figura 4	Diagrama Hierro – carbono aplicado a las fases de transición presentes en la ZAT.....	17
Figura 5	Esquema Tamaño de grano de un acero de bajo contenido carbono.....	18
Figura 6	Muestra de la tracción de la sección reducida	21
Figura 7	Accesorio para ensayo de doblez guiado	22
Figura 8	Muestra para el ensayo de doblado de cara.....	23
Figura 9	Muestra para el ensayo de doblado de raíz.....	23
Figura 10	Esquema del funcionamiento de un péndulo Charpy.	24
Figura 11	Máquina para realizar ensayo de impacto por caída de peso.....	25
Figura 12	Muestra para ensayo de Impacto	25
Figura 13	Ubicación del espécimen de impacto en el cupón de prueba	26
Figura 14	Dimensiones de la muestra para ensayos de dureza y metalografías	28
Figura 15	Cupón de prueba para espesores menores o iguales a 10 mm .	29
Figura 16	Tipos de Juntas	32
Figura 17	Junta de penetración completa.....	34
Figura 18	Junta de penetración parcial.....	34
Figura 19	Tipos de biseles	35
Figura 20	Elementos de una junta	36
Figura 21	Geometría de la junta CJP.....	36
Figura 22	Geometría de la junta PJP	36
Figura 23	Máquina de soldar MILLERMATIC 300	46
Figura 24	Parámetros eléctricos de soldadura calibrados.	46
Figura 25	Equipo de soldadura ensamblado	47
Figura 26	Proceso de corte.....	47
Figura 27	Proceso de biselado	48
Figura 28	Control metrológico de la junta	48
Figura 29	Identificación de cupones sometidos a soldadura con argón.....	49

Figura 30 Identificación de cupones sometidos a soldadura con mezcla Argón – CO ₂	49
Figura 31 Identificación de cupones sometidos a soldadura con CO ₂	49
Figura 32 Control de masa inicial en los cupones.....	50
Figura 33 Balanza TRANSCCELL.....	50
Figura 34 Equipo de avance automático.....	51
Figura 35 Pinza amperimétrica FLUKE 337.....	53
Figura 36 Ajuste del flujo de gas con cada uno de los gases aplicados	54
Figura 37 Cronometro utilizado.....	55
Figura 38 Limpieza de los cordones luego de la soldadura	55
Figura 39 Medición masa final de los cupones	56
Figura 40 Dimensiones de los cordones de soldadura	56
Figura 41 Equipo STRIP GRINDER.....	57
Figura 42 Equipo de pulido POLISHER.....	58
Figura 43 Microscopio Electrónico.....	58
Figura 44 Máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033.....	60
Figura 45 Esquema dimensiones consideradas en la probeta de tensión ...	61
Figura 46 Péndulo de impacto AMSLER 30 HP 130.....	63
Figura 47 Esquema dimensiones consideradas en la probeta de tensión ...	63
Figura 48 Máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033.....	65
Figura 49 Indentaciones realizadas para determinar la dureza	66
Figura 50 Indentación Vickers con sus respectivas diagonales	66
Figura 51 Lectura obtenida del durómetro	67
Figura 52 Durómetro METKON.....	68
Figura 53 Porosidad presente en el cordón de soldadura	71
Figura 54 Perfiles de penetración con los diferentes tipos de gas empleados	73
Figura 55 Gráfica de valores medios del área de la ZAT para los distintos gases de protección vs Flujo.....	75
Figura 56 Zonas presentes en la soldadura a) material base b) Zona afectada térmicamente c) material de aporte.....	76
Figura 57 Microestructura CO ₂ a) Soldadura b) Zona afectada térmicamente	77
Figura 58 Microestructura mezcla Argón – CO ₂ a) Soldadura b) Zona afectada térmicamente.....	78
Figura 59 Microestructura Argón a) Soldadura b) Zona afectada térmicamente	79
Figura 60 Microestructura de la soldadura.....	80
Figura 62 Gráfica de valores medios de dureza para los distintos gases de protección vs Flujo	83
Figura 63 Probeta de tensión sometidas a ensayo	86
Figura 64 Gráfica de valores medios de resistencia para los distintos gases de protección vs Flujo.....	87
Figura 65 Gráfica de valores medios de dureza para los distintos gases de protección vs Flujo	90

Figura 66 Defectos presentes en el ensayo de doblado en el cupón con gas de protección Argón con un flujo de 8 lt/min	92
Figura 67 Resultados del ensayo de doblado a) cupón con gas de protección CO ₂ a 12 lt/min b) cupón con gas de protección mezcla CO ₂ – Argón a 12 lt/min	93
Figura 68 Productividad vs gas de protección y Flujo	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36	8
Tabla 2 Composición química del acero ASTM A36	9
Tabla 3 Características de los constituyentes del acero ASTM A36	11
Tabla 4 Reactividad de los gases de protección	15
Tabla 5 Tipos de ensayos de dureza y microdurezas	26
Tabla 6 Número de probetas por cupón de soldadura	37
Tabla 7 Composición química alambre ER70S-6	39
Tabla 8 Propiedades mecánicas del material depositado	39
Tabla 9 Parámetros de soldadura para el gas Argón	39
Tabla 10 Parámetros de soldadura para la mezcla Argón - CO ₂	40
Tabla 11 Parámetros de soldadura para el gas CO ₂	40
Tabla 12 Especificaciones técnicas de la soldadora MILLERMATIC 300	46
Tabla 13 Especificaciones técnicas de la balanza	50
Tabla 14 Desplazamientos del equipo soldador BUG- O GO FER III- WD ..	51
Tabla 15 Longitud de alambre suministrado en 1 minuto	52
Tabla 16 Especificaciones técnicas de la pinza amperimétrica	53
Tabla 17 Especificaciones técnicas del flujómetro	54
Tabla 18 Especificaciones microscopio electrónico	59
Tabla 19 Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033	60
Tabla 20 Dimensiones de probetas de tensión y secciones transversales ..	61
Tabla 21 Especificaciones técnicas del péndulo de impacto AMSLER 30 HP	62
Tabla 22 Dimensiones de probetas de tensión y secciones transversales ..	63
Tabla 23 Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033	65
Tabla 24 Especificaciones técnicas del durómetro	67
Tabla 25 Tiempo empleado en la realización de la soldadura	69
Tabla 26 Tabla del material depositado	70
Tabla 27 Resumen de los defectos encontrados en los diferentes cupones	70
Tabla 28 Dimensiones de los cordones de soldadura	72
Tabla 29 Área afectada térmicamente	74
Tabla 30 Crecimiento del tamaño de grano en la ZAT	80

Tabla 31	Valores de dureza obtenidos con gas de protección CO ₂	81
Tabla 32	Valores de dureza obtenidos con gas de protección mezcla argón – CO ₂	81
Tabla 33	Valores de dureza obtenidos con gas de protección argón	82
Tabla 34	Resumen de valores de dureza	82
Tabla 35	Resultados del ensayo de tensión	85
Tabla 36	Resumen de los valores de resistencia a la tensión	86
Tabla 37	Resultados del ensayo de tenacidad	89
Tabla 38	Resumen de los valores de energía absorbida.....	89
Tabla 39	Costos unitarios directos.....	94
Tabla 40	Desglose costos unitarios directos.....	94
Tabla 41	Costo directo de soldadura en 100 metros	95
Tabla 42	Costo indirecto de soldadura en 100 metros.....	95
Tabla 43	Costo total de soldadura en 100 metros	95
Tabla 44	Productividad en función del material depositado en 100 m	96
Tabla 46	Material depositado por hora	97
Tabla 47	Tiempo en depositar 30 Kg	97
Tabla 48	Costo hora de soldadura.....	98
Tabla 49	Costo al depositar 30 Kg de material	98
Tabla 50	Costo total del proyecto	100
Tabla 51	Costos Indirectos	101
Tabla 52	Costo Total de las juntas elaboradas	101

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se analiza la influencia de los gases de protección CO₂ , mezcla argón - CO₂ , y argón, en las propiedades mecánicas, estructura metalográfica, configuración geométrica y la productividad en el proceso de soldadura GMAW, debido al no disponer de una investigación previa en el mercado nacional y el proceso GMAW tiene una gran participación en la industria metalmecánica en el área de producción, es necesario realizar el estudio de los gases de protección más empleados en la industria ecuatoriana. Para ofrecer datos confiables que estén a disposición de la sociedad para su desarrollo. Dentro de este proyecto se evalúa las propiedades mecánicas de la junta sometida a soldadura realizando ensayos destructivos de tensión, tenacidad, dureza y doblado, los ensayos no destructivos aplicados son inspección visual y medición de perfiles. La estructura metalográfica analizada corresponde al material de aporte y la zona afectada térmicamente ZAT. La productividad es determinada en función de la materia prima y la maquinaria utilizada. Para tal objetivo se desarrolló los WPS cuyos parámetros fueron el resultado de pruebas experimentales y calibración de los equipos para garantizar la confiabilidad de los resultados. Los valores finales obtenidos son ingresados a un cuadrado latino de dimensión 3x3 para determinar la correlación entre las variables en estudio que para efecto son el gas de protección en tres niveles: CO₂ , mezcla argón - CO₂ , y argón. El flujo de gas de protección presenta un valor inicial de 8 lt/min con aumentos graduales del 50% y 100 % llegando al nivel tres con un flujo de 16 lt/min.

PALABRAS CLAVES

- **SOLDADURA**
- **GAS DE PROTECCIÓN**
- **PROCESO GMAW**
- **INFLUENCIA**
- **PROPIEDADES MECÁNICAS**

ABSTRACT

In this research project the influence of CO₂ shielding gas, mixture argon - CO₂ and argon is analyzed in mechanical properties, metallographic structure, geometry and productivity in the GMAW welding process, due the absence of a preliminary investigation on the domestic market and the GMAW process is highly involved in the metalworking industry in the production area, it is necessary to conduct the study of shielding gases most used in the Ecuadorian industry. To provide reliable data that are available to the company for its development. Within this project the mechanical properties of the weld joint under destructive testing: tension, toughness, hardness and bending, non-destructive testing are applied visual inspection and profile measurement. The metallographic structure analyzed corresponds to the filler and the heat affected zone HAZ. Productivity is determined depending on the raw material and machinery used. To this purpose it developed the WPS whose parameters were the result of pilot testing and calibration of equipment to ensure the reliability of results. The final values obtained are introduce to a Latin square 3x3 dimension to determine the correlation between the study variables that effect the shielding gas are on three levels: CO₂, argon mixture - CO₂ and argon. The shielding gas flow has an initial value of 8 lt/min with gradual increases of 50% and 100%, reaching to level three with a flow of 16 lt/min.

KEYWORDS

- **WELDING**
- **SHIELDING GAS**
- **GMAW PROCESS**
- **INFLUENCE**
- **MECHANICAL PROPERTIES**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. TÍTULO

Influencia de los gases de protección en las propiedades mecánicas, estructura metalográfica, configuración geométrica y la productividad obtenidas en el proceso GMAW, al soldar acero ASTM A36 con diferentes gases de protección.

1.2. ANTECEDENTES

La empresa LINDE adquiere AGA S.A. en el año 2000 realiza la construcción de plantas y estaciones de llenado de gases industriales en el país, obtiene el certificado de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) por parte del ministerio de salud pública y las certificaciones correspondientes a Seguridad y Salud Ocupacional , en el 2012 realizan el cambio de nombre a la casa matriz a " LINDE " , en vías de un desarrollo en el 2014 se firma con la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS el convenio de cooperación técnico – académico para la elaboración de temas de tesis auspiciados por LINDE ECUADOR S.A.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El gas de protección en el proceso GMAW¹ representa una parte esencial del proceso, su aporte en la soldadura depende de su correcta selección debido a que esto incurrirá en el costo final de la soldadura debido a que no se debe invertir mucho tiempo retirando la capa de escoria y las salpicaduras, lo que reduce el tiempo de limpieza; el proceso GMAW es económico y eficiente porque se puede soldar materiales de diferente espesor a tasas de

¹ GMAW o Gas Metal Arc Welding por sus siglas en inglés, término aceptado por la AWS como soldadura de arco con alambre continuo bajo protección gaseosa

deposición muy alta, lo que facilita las velocidades de avance, gracias al gas de protección aplicado la distorsión que presenta es reducida y presenta un acabado superficial superior al que se obtiene soldando con electrodo revestido, además se maximiza las horas hombre sin afectar la calidad de la soldadura presentando excelente fusión y penetración total.[1]

La Empresa LINDE ECUADOR S.A. Proveedora de gases industriales y suministros de soldadura, en vías de un desarrollo bilateral plantea la ejecución del proyecto para el análisis sobre la influencia de los gases de protección en el proceso GMAW al soldar chapas de acero ASTM A36 utilizados en la industria metalmecánica

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia de los gases de protección, en las propiedades mecánicas estructura metalográfica, configuración geométrica de los cordones de soldadura depositados y la productividad, obtenidas en el proceso GMAW, al soldar con diferentes gases de protección.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer un WPS adecuado para el proceso.
- Diseñar el experimento apropiado
- Analizar los resultados obtenidos
- Determinar costos y productividad obtenida.

1.5. ALCANCE

Este proyecto tiene como finalidad analizar la influencia de los gases de protección en las propiedades mecánicas, estructura metalográfica, configuración geométrica de los cordones de soldadura depositados y la productividad del proceso de soldadura GMAW. Partiendo del concepto de diseño de experimentos los factores presentes en el experimento determinan un cuadrado latino, el cuadrado latino de 3x3 se plantea de la elaboración de nueve cupones de prueba de acero ASTM² A36 de 10 mm de espesor, de dimensiones 360 x 525 mm. Ejecutados con sus respectivos WPS preestablecidos, los parámetros físicos para el material base y material de aporte y los parámetros eléctricos en los 9 WPS serán los mismos, de esta manera se obtiene que el factor principal del experimento es el gas de protección, los mismos que para el experimento son: CO₂, Argón, Mezcla Argon-CO₂, además existe la presencia del factor de variable en el cuadrado latino para determinar el efecto directo y correlaciones de los factores aplicados a cada uno de los cupones de prueba.

Para analizar la configuración geométrica de la soldadura se elaborará una junta de penetración parcial utilizando los diferentes gases de protección empleados en los cupones de prueba; para determinar las propiedades mecánicas se ejecutara los respectivos ensayos de tracción, doblado de cara y de raíz, impacto, dureza.

El proyecto finaliza al establecer las distintas interacciones que presentan las propiedades obtenidas de los ensayos en función del factor principal y los factores de variable. Este proyecto se lo realizará en un lapso de 5 meses a un costo de 5643 dólares

² ASTM American Society for Testing and Materials

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. PROCESO GMAW.

El proceso GMAW tiene sus inicios en la década de 1940 el mismo que se dio a conocer como proceso de soldadura por arco eléctrico, alimentado continua y automáticamente por un consumible. Denominado por el acrónimo GMAW proveniente de sus siglas en ingles Gas Metal Arc Welding, Consiste en el soldeo de dos o más metales por medio de la fusión por calor el mismo que es aportado por un arco eléctrico y protegido por un ambiente gaseoso. El tipo de gas empleado en el proceso diferencia el tipo de soldadura la misma que puede ser MIG³ cuando se utiliza un gas inerte, y el término MAG⁴ cuando el gas de protección es un gas activo. Los gases inertes que se utilizan con frecuencia en la industria son: Argón y Helio o mezclas de ambos, el gas activo de preferencia es el CO₂ por su bajo costo, el método típico de aplicación este gas es la mezcla Argón – CO₂ para mejorar las características finales de la soldadura.

2.1.1. EQUIPO PROCESO GMAW



Figura 1 Equipo soldador empleado en el proyecto

³ MIG Metal Inert Gas

⁴ MAG Metal Active Gas

La Máquina de soldar se encarga de suministrar la energía necesaria para fundir el material de aporte con el material base, con la característica de salida de voltaje constante, y alimentar el alambre de forma continua a una velocidad preestablecida.

La pistola de soldadura se encarga de dirigir en material de aporte en forma de alambre, y el gas desde la salida de la maquina hasta la zona de contacto del material base para producir el arco eléctrico.

El cilindro de gas contiene gas a alta presión, está provisto de reguladores a su salida para regular el flujo de trabajo adecuado, que es útil para obtener una Atmosfera de protección al charco de soldadura

2.1.2. TIPOS DE TRANSFERENCIA

2.1.2.1. TRANSFERENCIA POR CORTO CIRCUITO

El tipo de transferencia por cortocircuito es método típico de transferencia cuando a soldadura MAG se refiere, el metal de aporte se deposita sobre el metal base en forma de gotas individuales, cuando la punta del alambre toca el metal fundido y se produce el corto circuito. En este método se emplean corrientes y tensiones bajas aportando poco calor, evitando el sobrecalentamiento de los metales base y la distorsión.

2.1.2.2. TRANSFERENCIA GLOBULAR

La transferencia globular es utilizada tanto en aplicaciones MAG como en MIG, el metal de aporte se transfiere al metal base en forma de gotas de gran tamaño, esto ocurre cuando el peso de la gota formada en la punta del alambre excede la tensión superficial y se desprende, su aplicación se realiza con corrientes altas la misma que permite una mayor penetración, y es recomendada para soldadura en posición horizontal.

2.1.2.3. TRANSFERENCIA SPRAY

La transferencia spray es el método característico en aplicaciones MIG, la transferencia del metal de aporte hacia el material base ocurre mediante partículas muy finas que se transfieren a través del arco eléctrico, la fuerza electromagnética presente es elevada, posibilitando atomizar las gotas desde la punta del alambre en forma lineal al área de soldadura.

2.1.3. TIPOS DE APLICACIÓN

2.1.3.1. SEMIAUTOMÁTICA

Es la aplicación más común en el proceso GMAW en la cual se usa una pistola manual, y el equipo alimenta el consumible de manera automática previa regulación en el mismo, el operador se encarga de accionar el inicio o el paro de la alimentación del alambre el gas de protección, y el arrastre de la misma, el equipo regula en forma constante y automática el amperaje y voltaje.

2.1.3.2. AUTOMÁTICA

Esta aplicación es una variación de la aplicación semiautomática, se necesita de un ajuste inicial de parámetros como voltaje y amperaje de trabajo, los mismos que luego se regulan automáticamente por el equipo, la diferencia radica en la presencia de una boquilla automática la cual es la que aplica la soldadura. El operador interviene prácticamente solo en la regulación o corrección de los parámetros.

2.1.3.3. MECANIZADA

Esta aplicación es una variación de la aplicación semiautomática, se necesita de un ajuste inicial de parámetros en la máquina de soldar y en el equipo soldador, los parámetros de la maquina se regulan automáticamente para mantener un arco estable, El operador interviene en la regulación o

corrección de parámetros sobre la marcha pueden ser parámetros eléctricos, de velocidad de avance o la ruta que sigue el equipo soldador.

2.1.3.4. ROBOTIZADA

La aplicación robotizada es empleada a escala industrial donde se requiere de una alta eficiencia y precisión, los parámetros y coordenadas donde se desea aplicar la soldadura se programan en un código para poder ser cargado en una máquina CNC⁵ la misma que realiza todas las operaciones que se detallan en el código, existe una retroalimentación donde el equipo corrige alguna desviación existente en la ruta o en los parámetros

2.2. ACERO ASTM A36

El acero ASTM A36 debido a sus propiedades, características, su disponibilidad y diversidad en las presentaciones, lo ha posicionado en la primera opción en la industria metalmecánica en el Ecuador. Su desempeño predecible debido a su comportamiento lineal y elástico hasta llegar a la fluencia, le brinda una ventaja competitiva en las distintas aplicaciones: construcción (casas, edificios, puentes), maquinaria, soportes, muebles.

2.2.1. SOLDABILIDAD ACERO ASTM A36

Para determinar la soldabilidad del acero ASTM A36 es necesario primero conocer sus propiedades químicas, mecánicas y requerimientos técnicos los cuales serán analizados en el presente capítulo

2.2.2. DENOMINACIÓN ASTM

La norma ASTM no especifica de manera directa la composición química, se enfoca en su aplicación o ámbito de uso. Por lo cual no existe una relación directa entre la nomenclatura y la composición

El esquema general empleado en la norma es el siguiente

⁵ CNC Computer Numerical Control

YXX

Donde:

Y es la primera letra de la norma que indica el grupo de aplicación

A: Especificaciones para aceros.

B: Especificaciones para materiales no ferrosos.

C: Especificaciones para hormigón y estructuras civiles.

D: especificaciones para químicos, como aceites y pinturas.

XX representa la particularidad que representa a cada acero

2.2.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES

2.2.3.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO ASTM A36

Las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 están especificadas en la tabla 1

Tabla 1

Propiedades mecánicas del acero ASTM A36

PROPIEDADES	UNIDADES MÉTRICAS	UNIDADES IMPERIALES
Esfuerzo último a la tracción	400 – 550 Mpa	58 – 80 Ksi
Esfuerzo de fluencia	250 Mpa	36 Ksi
Módulo de elasticidad	200 Mpa	29 Ksi
Módulo de Poisson	0,26 -029	0,26 – 0,29
Elongación mínima 20 %	200 mm	8 in
Elongación mínima 23 %	50 mm	2 in
Dureza Brinell	119 – 159	119 – 159
Dureza Rockwell B	67 – 83	67 – 83

(Catalogo DIPAC 2015)

2.2.3.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO ASTM A36

La composición química del acero ASTM A36 se especifica en la tabla 2

Tabla 2

Composición química del acero ASTM A36

Elemento	Contenido (%)
Hierro (Fe)	99
Carbono (C)	0,25 máx.
Manganeso (Mn)	No existe requisito
Fosforo (P)	0,04 máx.
Azufre (S)	0,05 máx.
Silicio (Si)	0,40 máx.
*Cobre (Cu)	0,20 min.

(American Society for Testing and Materials)

2.2.3.3. CARBONO EQUIVALENTE

El carbono equivalente de los aceros es una forma de establecer la tendencia que estos tienen a sufrir un endurecimiento o fisurarse en la soldadura. Para establecer el carbono equivalente es necesario conocer los aleantes del acero y sus porcentajes. Para determinar el carbono equivalente del acero ASTM A36 se utilizara la expresión sugerida en la AWS⁶ D1.1 anexo I 6.1.1

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

⁶ AWS American Welding Society

Donde:

CE:	Carbono equivalente
C:	% de carbono
Mn:	% de manganeso
Cr:	% de cromo
Mo:	% de molibdeno en
V:	% de vanadio
Ni:	% de níquel
Cu:	% de cobre

$$CE = 0,25 + \frac{0,4}{6} (\%)$$

$$CE = 0,316 (\%)$$

Con el porcentaje de carbono de 0,25% el acero ASTM A36 presenta una buena soldabilidad al encontrarse en un rango de 0,20% – 0,30%. Con el valor de 0.4% de Si presente el acero el carbono equivalente presenta un valor de 0,316% el mismo que es inferior a 0.4% que determina que es un acero de fácil soldabilidad

2.2.3.4. CONSTITUYENTES DEL ACERO ASTM A36

La soldabilidad de un acero se encuentra determinada por los elementos presentes en el acero, los principales aleantes que se presentan en los aceros son: cromo, vanadio, níquel, molibdeno. El porcentaje o la variación del mismo alteran la soldabilidad del acero en el caso particular del acero ASTM A36, se presenta a continuación la tabla 3 donde se detalla los elementos presentes y su efecto al realizar la soldadura.

Tabla 3

Características de los constituyentes del acero ASTM A36

Elemento	CARACTERÍSTICAS
Carbón	El porcentaje de carbón presente en un acero es un agente endurecedor lo cual facilita su templabilidad, el mismo que si no se aplica un método correcto de enfriamiento tiene a fragilizar la zona adyacente de la soldadura
Silicio	El silicio en combinación con altos porcentajes de carbono, es perjudicial al aumentar la tendencia al agrietamiento
Azufre	Los aceros que en su composición tienen presente porcentajes de azufre, adquieren una tendencia a ser quebradizos además al aplicar la soldadura pueden agrietarse

(Horwitz , 1967)

2.3. ANÁLISIS DE NORMATIVAS

2.3.1. ESPECIFICACIÓN AWS D1.1

La especificación AWS D1.1 es un código que contiene los requerimientos de fabricación y montaje de estructuras metálicas, además contiene los requerimientos para diseño de uniones soldadas compuestas de miembros tubulares o no tubulares.

La sección de inspección contiene los criterios para la calificación y responsabilidades de los inspectores, los criterios de aceptación para soldaduras de producción.

El código fue desarrollado para aplicaciones de estructuras de acero soldadas que utilicen aceros al carbono o de baja aleación, con espesores mayores a 3mm y un $S_y \leq 690$ Mpa

2.3.2. ESPECIFICACIÓN AWS B4.0

La especificación AWS B4.0 establece métodos estándar para realizar ensayos mecánicos de soldadura. Los equipos necesarios además de proporcionar detalles adicionales para la preparación de muestras de ensayo.

Proporciona hojas de resultados modelo para cada prueba utilizando unidades imperiales y sus equivalentes en el Sistema Internacional de Unidades

2.3.3. ESPECIFICACIÓN AWS B1.11

La especificación AWS B1.11 es una guía para la inspección visual de la soldadura, la misma que contiene los pre requisitos, fundamentos, condiciones superficiales y operacionales antes durante y después de realizar la soldadura, establece las discontinuidades comunes que se presentan en la soldadura.

2.4. GAS DE PROTECCIÓN

Los requerimientos para la clasificación de los gases de protección se encuentran prescritos en la especificación AWS A 5.32, es la especificación del gas de protección para la soldadura. La función principal del gas de protección es proporcionar una Atmosfera idónea para proteger la transferencia del metal fundido del media ambiente circundante, y garantizar un arco estable. La calidad final de la soldadura depende directamente del tipo de gas empleado en la soldadura, y su influencia se extiende al tipo de transferencia empleada en el proceso.

2.4.1. PROPIEDADES

2.4.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS

2.4.1.1.1. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica es la capacidad intrínseca que posee cada gas, para transferir el calor. La conductividad térmica del gas afecta en la formación y estabilidad del arco de soldadura, y en el contorno del perfil del cordón de la soldadura, debido a que a mayor conductividad térmica el calor fluye en forma radial, variando el perfil del cordón como se observa en la figura 2, el calor aportado en grados por cada uno de los principales gases, hacia el metal base se observa en la figura 3.

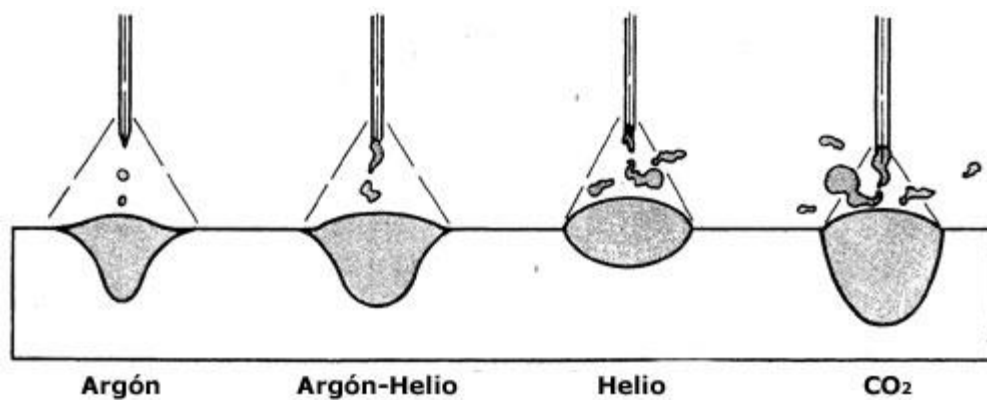


Figura 2 Perfiles de contorno en función de la conductividad térmica del gas de protección

(R. Rowel, 2009)

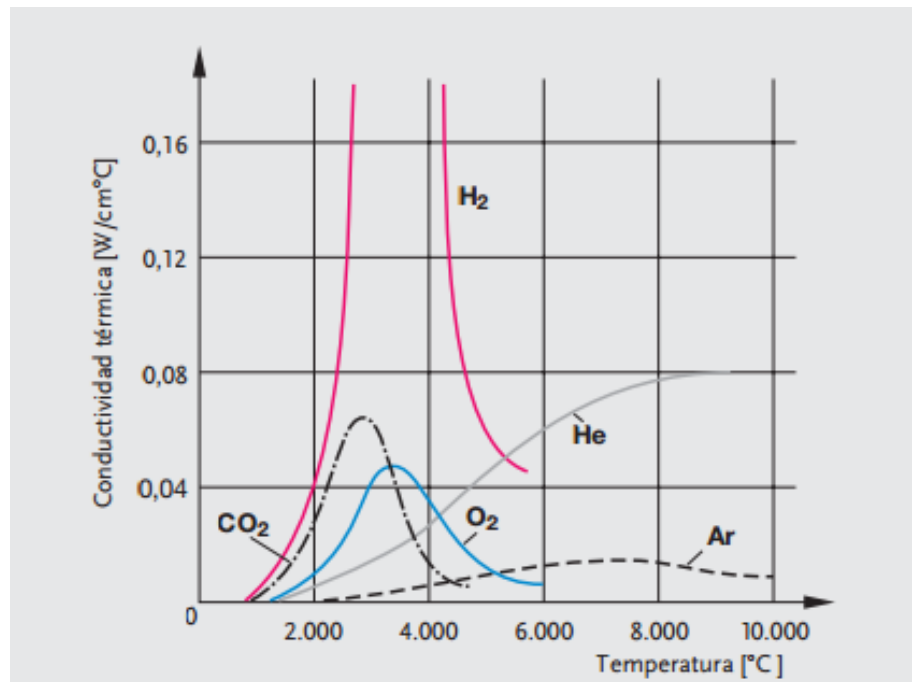


Figura 3 Aporte de Calor de los gases

(R. Rowel, 2009)

2.4.1.1.2. DISASOCIACIÓN Y ASOCIACIÓN

En los gases no todos se presentan en su unidad básica, es decir pueden estar formados por uno o varios átomos, el caso particular del Argón su composición es de un átomo, por otra parte el CO₂ es un gas de estructura molecular dos átomos de oxígeno y un átomo de carbono. La importancia de esta propiedad se presenta en la formación del arco, al momento que se calienta el gas en el arco se genera la ruptura de las moléculas, los átomos se disocian para ionizarse produciendo electrones libres. Los mismos que buscan el equilibrio para alcanzarlo se proyectan hacia una zona más fría, esta es la zona de trabajo allí se combinan nuevamente aportando calor a zona de trabajo.

2.4.1.1.3. REACTIVIDAD

La reactividad es una propiedad inherente de cada gas, que se presenta como la habilidad de reaccionar con el metal fundido, modificando o no la composición química del metal depositado. Según la reactividad se clasifican en gases reactivos e inertes, los mismos que se encuentran detallados en la tabla No. 4

Tabla 4

Reactividad de los gases de protección

Gas	Símbolo	Reactividad	Naturaleza	Efecto
Argón	Ar	Inerte	No reacciona	Ninguno
Helio	He	Inerte	No reacciona	Ninguno
Nitrógeno	N ₂	Generalmente inerte	Puede reaccionar	Solo a elevadas temperaturas
Oxígeno	O ₂	Reactivo	Oxidante	Formación de óxidos
Dióxido de Carbono	CO ₂	Reactivo	Oxidante	Formación de óxidos

(Horwitz , 1967)

2.4.1.1.4. TENSIÓN SUPERFICIAL

La tensión superficial afecta de manera directa a la transferencia del material depositado, debido a que la forma del cordón depende de la fluidez, y determinados gases determinan una mayor fluidez en el baño de fusión. La interacción que se manifiesta entre el metal base y la tensión superficial es controlada por la Atmosfera de protección.

2.4.2. PRINCIPALES GASES DE PROTECCIÓN

2.4.2.1. ARGÓN

El argón proporciona una gran estabilidad en el arco de soldadura, su modo de empleo es generalmente combinado con otros gases como Helio y preferentemente CO₂, es utilizado para soldar metales no ferrosos, aleaciones base como: cobre, níquel, aluminio, magnesio, además aceros de baja aleación e inoxidables.

Su bajo potencial de ionización le permite brindar excelentes condiciones para la formación y estabilización del arco

2.4.2.2. DIÓXIDO DE CARBONO

El Dióxido de Carbono o comúnmente llamado CO₂ es el gas más empleado en la industria, debido a su bajo costo y su versatilidad de aplicación en aceros al carbono y de baja aleación. De los gases reactivos puede ser utilizado puro, siendo sus principales características: mayor velocidad de soldeo y mayor penetración.

Su aplicación se limita por el tipo de transferencia, se puede emplear en transferencia globular y corto circuito

2.4.2.3. MEZCLA ARGÓN – CO₂

El uso de mezclas Argón - CO₂ es característico en aceros al carbono y de baja aleación, al utilizar esta mezcla se requiere el incremento de la corriente. La adición de CO₂ al Argón se encuentra restringida con un valor máximo del 20 %, superado este límite provoca un arco inestable afectando directamente a la eficiencia.

El porcentaje idóneo de CO₂ está determinado en un 10 % en esta combinación su aplicación puede ser en transferencia por corto circuito o globular, en esta concentración el rango de aplicación en cuanto a espesores se refiere es amplia, la mezcla proporciona un arco estable y un baño de soldadura más fluido y ancho.

Esta zona se encuentra a continuación de la zona de grano grueso, no presenta crecimiento debido a que no alcanza la temperatura para el crecimiento de los granos.

Zona intercrítica

Esta zona se caracteriza por la disgregación de la perlita en granos más finos

En la figura 5 se aprecia un esquema de la conformación del grano presente en un acero de bajo contenido de carbono, el tamaño de grano se presenta en diferentes tamaños en función de la cercanía a la línea de fusión. En la zona adyacente a la línea de fusión el tamaño de grano presenta el mayor crecimiento, en la siguiente zona el grano sufre una recristalización por lo cual el tamaño del grano es más fino que el presente en el material base. La zona presente entre el grano fino y el material base sufre una transformación parcial, la temperatura presente en el área adyacente a cordón de soldadura determina el tipo de tratamiento térmico aplicado al material.

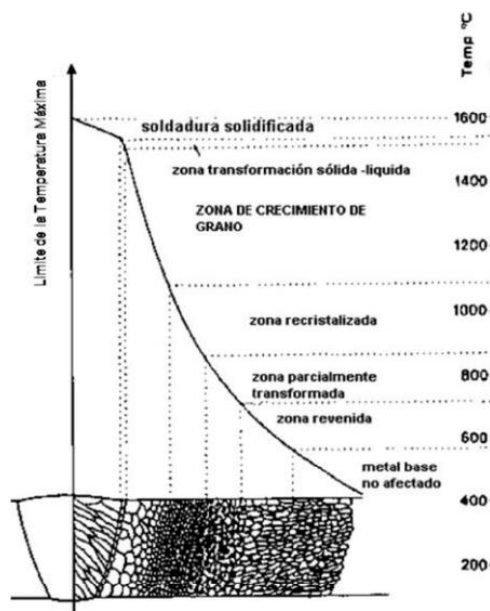


Figura 5 Esquema Tamaño de grano de un acero de bajo contenido carbono

(S. Kou John Willey, 2003)

2.6. DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA

2.6.1. ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

El WPS⁷ es un documento escrito, el mismo que es elaborado y se requiere su aprobación por medio de la calificación del mismo, se utiliza para proporcionar las pautas necesarias para elaborar una soldadura y su posterior inspección

2.6.1.1. CONTENIDO DEL WPS

En el WPS es necesario que conste expresamente todas las variables que intervienen en cada uno de los procesos de soldadura tales como: SMAW, GMAW, FCAW, SAW, etc. Estas variables se clasifican en:

- Variables esenciales:

Son las variables que al presentar una modificación afectan en forma directa a las propiedades de la junta soldada

- Variables no esenciales

Son las variables que al presentar una modificación no afectan de ninguna manera a las propiedades de la junta soldada.

2.6.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los ensayos destructivos son pruebas en las cuales, los especímenes de prueba son sometidos a diferentes condiciones, en las mismas que se obtienen valores numéricos de sus propiedades en función de la deformación total o parcial del espécimen.

⁷ WPS denominado así por sus siglas en inglés "Welding Procedure Specification", la traducción de este acrónimo es "Especificación de Procedimiento de Soldadura"

Según la especificación AWS B4.0 se usan cinco tipos de ensayos que son empleados de acuerdo a cada caso específico.

- Ensayo de Tensión
- Ensayo de Corte
- Ensayo de flexión
- Ensayo de resistencia a la fractura
- Ensayo de dureza

Para garantizar el correcto funcionamiento de la junta soldada se realizan otros ensayos tales como:

- Metalografías

2.6.2.1. ENSAYO DE TENSIÓN

El ensayo de tensión o también conocido como ensayo a tracción, consiste en la aplicación de una carga a través del eje axial del espécimen. De esta manera se puede determinar su deformación máxima y esfuerzo en la rotura. Las dimensiones y geometría para este ensayo depende de la forma del material base y pueden ser:

- Tipo lamina de sección reducida
- Tipo tubería de sección reducida
- Tipo sección completa de tubería

Límite de rotura

Es el valor máximo que puede alcanzar el esfuerzo antes de empezar la reducción de área

2.6.2.1.1. DIMENSIONES ESPECÍMENES DE TENSIÓN

Las dimensiones para el espécimen del ensayo de tensión se encuentran establecidas en la norma AWS D1.1, En la figura 6. Se puede observar el esquema del espécimen de sección reducida para el ensayo de tensión, donde t es el espesor de la placa, w es el ancho de la sección reducida, C es el ancho de la sección de agarre, y r es el radio de filete.

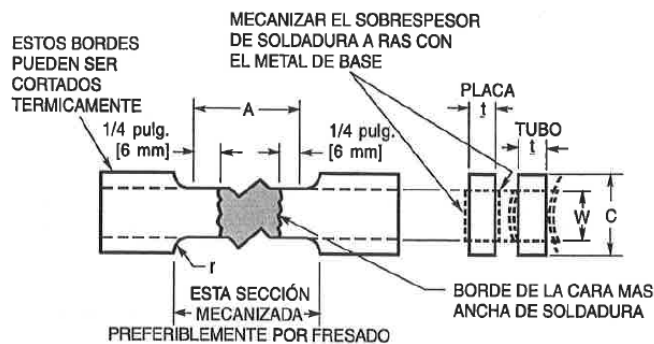


Figura 6 Muestra de la tracción de la sección reducida (Society(AWS), 2010)

2.6.2.2. ENSAYO DE DOBLEZ GUIADO

El ensayo de doblez guiado es utilizado para realizar un control de calidad en la junta soldada, permite determinar la ductilidad presente en la junta. El ensayo consiste en la aplicación de una carga en la parte central de la soldadura, simultáneamente apoyado en los dos extremos lo cual permite que el material adopte una curvatura de 180°. Los tipos de especímenes empleados en el doblado depende de la configuración geométrica del material base, así se obtiene los siguientes tipos de doblado

- Doblez transversal
 - De lado

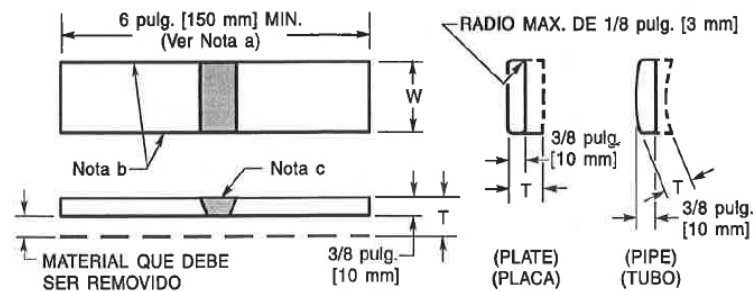


Figura 8 Muestra para el ensayo de doblado de cara

(Society(AWS), 2010)

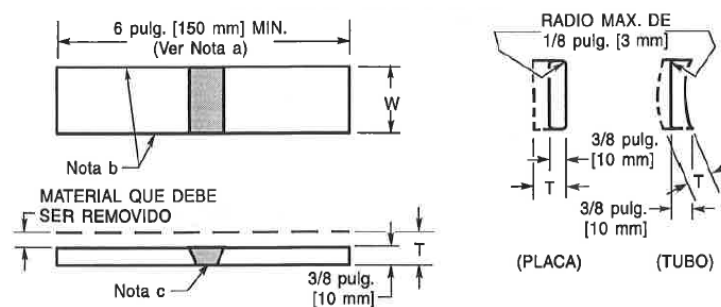


Figura 9 Muestra para el ensayo de doblado de raíz

(Society(AWS), 2010)

2.6.2.3. ENSAYO DE TENACIDAD

El ensayo de tenacidad se realiza cuando el código que se esté utilizando lo indique, sin embargo ASME refiere dos ensayos de tenacidad los cuales son:

- Ensayo Charpy
- Caída de peso (Drop Weigth)

2.6.2.3.1. ENSAYO CHARPY (NOTCH-V)

El ensayo Charpy es empleado para medir la tenacidad que posee un material, en función de la cantidad de energía que el mismo puede absorber antes de su rotura, la norma que rige este ensayo es la ASTM A-370.

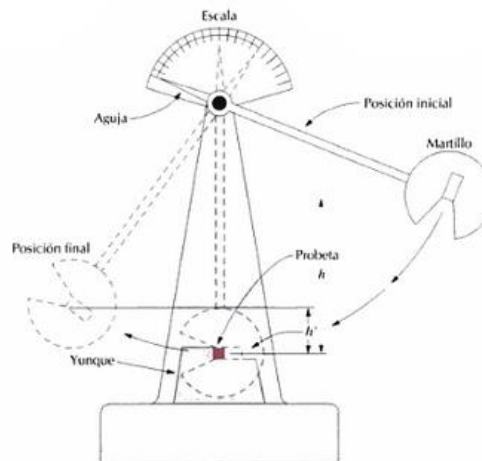


Figura 10 Esquema del funcionamiento de un péndulo Charpy

(Callister, 2007)

El péndulo Charpy es necesario en este ensayo, su procedimiento se basa en dejarlo caer de una altura conocida, choca contra el espécimen de prueba y sigue si camino. A mayor tenacidad que presente el material la longitud de arco recorrida por el péndulo será más corta.

2.6.2.3.2. CAÍDA DE PESO (DROP – WEIGHT)

La teoría es la misma aplicada en el ensayo Charpy, mediante la caída del peso se puede evaluar la tenacidad que presenta el material. Con la característica que se puede determinar la temperatura en la cual el material empieza a comportarse de una manera frágil denominada temperatura NDT⁸. La norma que rige la aplicación de este ensayo es la ASTM E208.

⁸ NDT del acrónimo en sus siglas en inglés Nil Ductility Temperature que en español se refiere a la Temperatura de transición a ductilidad nula



Figura 11 Máquina para realizar ensayo de impacto por caída de peso (Vaidya, 2002).

El equipo está conformado por dos elementos, un móvil que se desplaza verticalmente a lo largo de unas guías, es el cabezal que tiene el peso que se deja caer libremente para impactar a la probeta que se encuentra en la base fija

2.6.2.3.3. DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DE IMPACTO

Las dimensiones de las probetas de impacto se encuentran establecidas en la norma ASTM A 370, en la misma se encuentran los lineamientos del procedimiento y sus detalles como el que se muestra en la figura 12.

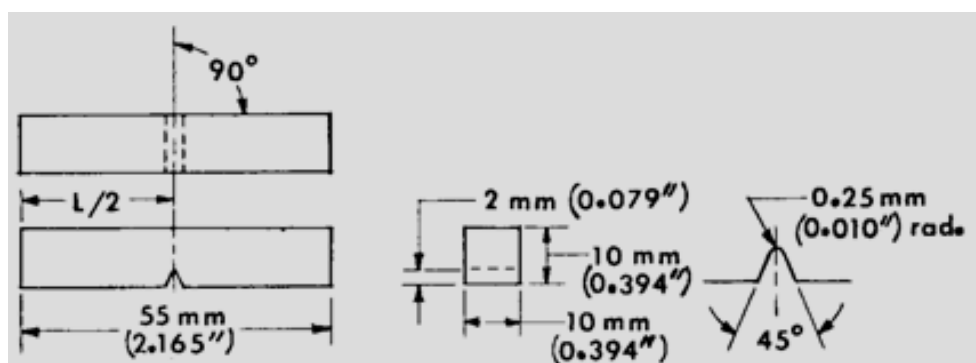


Figura 12 Muestra para ensayo de Impacto (American Society for Testing and Materials, 2009)

Las dimensiones del espécimen de impacto pueden ser modificadas a 10 x 7.5 como se establece en la norma. La confiabilidad de este ensayo radica del lugar en cupón de prueba de donde se extrajo el espécimen, debido a que lo ideal es que la muesca que se encuentra en la parte media del espécimen sea

de la porción afectada térmica o también conocida como la zona ZAT⁹. La correcta extracción del espécimen de impacto se muestra en la figura 13 .

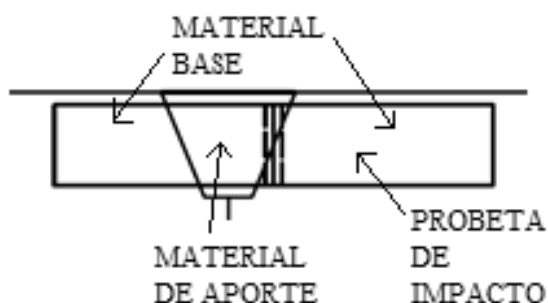


Figura 13 Ubicación del espécimen de impacto en el cupón de prueba (American Society for Testing and Materials, 2009)

2.6.2.4. ENSAYO DE DUREZA

La dureza de los materiales es muy diversa en función de su configuración estructural y atómica. Para determinar la dureza existen diferentes métodos para calcular durezas y microdurezas, cada una con su respectivo procedimiento, indentador y carga de aplicación, tal como se presenta en la tabla 5.

Tabla 5

Tipos de ensayos de dureza y microdurezas

ENSAYO	IDENTADOR	CARGA
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg
Knoop	Pirámide de diamante	500 kg

(Callister, 2007)

⁹ ZAT del acrónimo de sus siglas Zona Afectada Térmicamente

2.6.2.4.1. DUREZA ROCKWELL

La dureza Rockwell se basa en dejar una huella en la superficie del material, la cual permite determinar la dureza. La huella que se realiza en la superficie en mediante la aplicación de una carga, con un indentador que para esta dureza puede ser: cónico esferoidal o una bola de acero endurecido, el indentador se selecciona en función de la escala en la cual se esté trabajando.

La dureza Rockwell no se basa en los esfuerzos de contacto entre el indentador y la superficie, para determinar la dureza se analiza la relación inversa existente entre la penetración alcanzada por el indentador en la superficie, para determinar su relación se tiene las ecuaciones:

Para cónico esferoidal

$$HR = 100 - \frac{h}{0.002}$$

Para bola de acero

$$HR = 130 - \frac{h}{0.002}$$

Donde

HR= Dureza Rockwell

h= Profundidad de la indentación

2.6.2.4.2. DIMENSIONES ESPECÍMENES DE DUREZA Y METALOGRAFÍA

Los especímenes que se emplearan en los ensayos de dureza y metalografías tendrán las mismas dimensiones. La dureza será analizada en la región ZAT, por lo que especímenes necesariamente deben estar comprendidos entre esta zona y el material base con las dimensiones que se presentan en la figura 14.

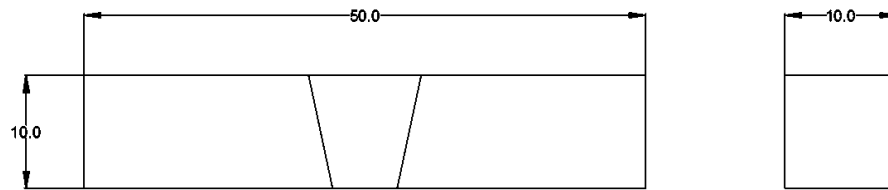


Figura 14 Dimensiones de la muestra para ensayos de dureza y metalografías

2.6.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos son pruebas, mediante las cuales se puede observar fallas o discontinuidades, mediante la aplicación de procedimientos que no alteran las dimensiones ni las propiedades del material analizado. Entre los principales ensayos no destructivos tenemos:

- Inspección Visual
- Tintas penetrantes
- Rayos X
- Ultrasonido

2.6.3.1. INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual es un método mediante el cual un inspector, realiza el control de inspección de la junta soldada antes durante y después de la soldadura. Procediendo a realizar una inspección final en la cual mediante los distintos ensayos no destructivos, y de acuerdo a los criterios de aceptación de código de fabricación se garantiza la calidad de junta soldada. Analizando los pre requisitos y las recomendaciones generales de iluminación, instrumentos utilizados, y número de inspecciones

2.7. CUPÓN DE PRUEBA Y ESPECÍMENES DE PRUEBAS

Para realizar los cupones de prueba, de los mismos que posteriormente serán maquinados los especímenes de prueba es necesario realizar el

dimensionamiento en función del espesor y tipo de material a continuación se muestra el esquema de los especímenes en el cupón de prueba.



Figura 15 Cupón de prueba para espesores menores o iguales a 10 mm (Society(AWS), 2010)

2.8. PRODUCTIVIDAD

La productividad en su forma más básica es la relación o vínculo existente entre dos factores, uno de entrada y otro de salida los cuales deben guardar una relación. La productividad es de vital importancia para el progreso de una empresa o negocio basado en aumentar la rentabilidad de la misma, la productividad esencialmente es evaluada en los tres principales aspectos que son:

- Mano de Obra

- Materia Prima
- Maquinaria, Equipos

En el presente proyecto de investigación la productividad será evaluada en función de la materia prima utilizada en la soldadura y la mano de obra empleada en la misma.

2.9. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos DOE¹⁰, es una herramienta estadística mediante la cual se puede predecir el comportamiento de un determinado proceso o producto, que se ve afectado de una manera directa por una o más variables. Las mismas que deben ser discriminadas para establecer condiciones ideales para optimizar el proceso.

Por medio de la realización de una o más pruebas, en las cuales intervienen las variables a la entrada del proceso, permite identificar el efecto producido en la variable de salida.

2.9.1. DISEÑO DE CUADRADOS LATINOS

El cuadrado latino es un diseño de bloques aleatorios, el cual presenta la influencia de dos variables de bloque, a diferentes tratamientos o procesos a la vez. En general, para K niveles existentes el número de unidades experimentales es K^2 , para un cuadrado latino de $K = 3$ se necesita $3^2 = 9$ observaciones experimentales

2.9.1.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Los cuadrados latinos son idóneos en procesos que se quiere analizar la correlación que presentan dos variables simultáneamente, para ello el número

¹⁰ DOE del acrónimo de sus siglas en ingles "DESIGN OF EXPERIMENTS"

de niveles del factor principal debe coincidir con el número de niveles de las variables de bloque.

Se considera a una tabla de doble entrada donde las filas y columnas representan los factores o variables de bloque, e internamente en cada celda los niveles del factor principal con la condición que el factor principal aparezca una sola vez en cada fila y columna.

El cuadrado latino de 3 X 3 es el adecuado para el presente experimento porque el nivel K es 3, al emplear 3 gases de protección Argón, CO₂, mezcla Argón - CO₂.

Con las condiciones de que el factor principal aparece una sola vez por fila y columna para un cuadrado latino nivel 3 se tiene las principales combinaciones:

F1	A	C	B
F2	B	A	C
F3	C	B	A

F1	B	A	C
F2	C	B	A
F3	A	C	B

F1	C	A	B
F2	B	C	A
F3	A	B	C

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LA SOLDADURA Y EXPERIMENTO

3.1. DISEÑO DEL CUPÓN DE PRUEBA

Para el diseño del cupón de soldadura que será empleado en la investigación, el mismo contempla los siguientes factores

- Tipo de junta
- Tipo de soldadura
- Dimensión de la junta
- Dimensión de los especímenes

3.2. FORMA Y TAMAÑO DE LAS JUNTA

3.2.1. TIPO DE JUNTA

El tipo de junta soldada son las distintas formas en la que los materiales base se unen, las principales juntas empleadas en soldadura se visualizan en la Figura No. 16

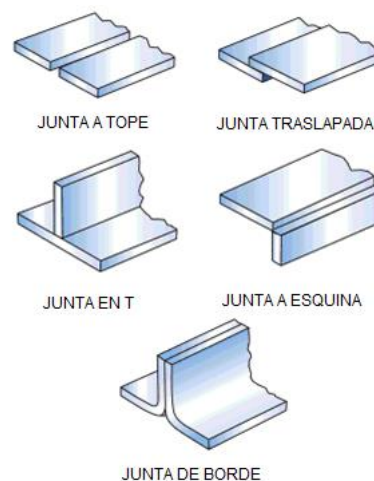


Figura 16 Tipos de Juntas

(Jeffus, 2009)

3.2.1.1. JUNTA A TOPE

La junta a tope es la junta de mayor utilización, debido a que es la más simple en cuanto a su elaboración. Consiste en la ubicación de los dos materiales base en un mismo plano de unión.

3.2.1.2. JUNTA A ESQUINA

La junta a esquina representa la unión de dos materiales en un ángulo de 90 grados, y la unión se establece a través de sus bordes.

3.2.1.3. JUNTA TRASLAPADA

La junta a traslape también denominada solapadas, el material base se superpone sobre el otro material base, y la soldadura se realiza en cada uno de los bordes de manera separada.

3.2.1.4. JUNTA DE BORDE

La junta de borde permite la unión de dos materiales, de manera que existe un contacto superficial entre las caras adyacentes de los dos materiales, realizando una soldadura de los dos bordes simultáneamente.

3.2.1.5. JUNTA EN T

La junta en T permite realizar una junta en la cual, los materiales base forman una T generando dos ángulos de 90 grados respecto al otro material base.

3.2.1.6. JUNTA DE PENETRACIÓN COMPLETA

La junta de penetración completa es la soldadura que penetra todo el espesor de los materiales, la garganta de la soldadura está determinada por el espesor del material base.

Al unir dos materiales base que presenten un espesor diferente, la garganta de la soldadura está determinada por el material base que presenta un menor espesor.

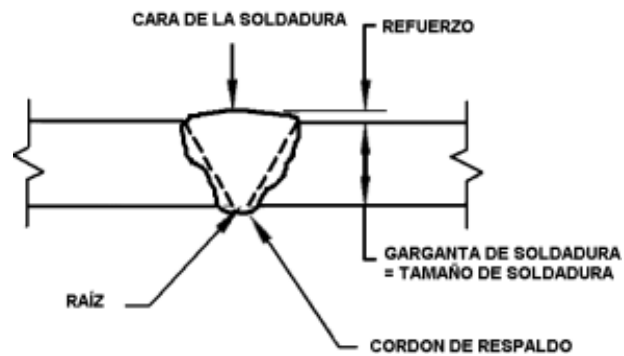


Figura 17 Junta de penetración completa
(R. Rowel, 2009)

3.2.1.7. JUNTA DE PENETRACIÓN PARCIAL

La junta de penetración parcial es aquella soldadura que no penetra todo el espesor, de esta manera la garganta efectiva está determinada por el espesor del cordón de soldadura en el interior del metal base, como se observa en la Figura 18.

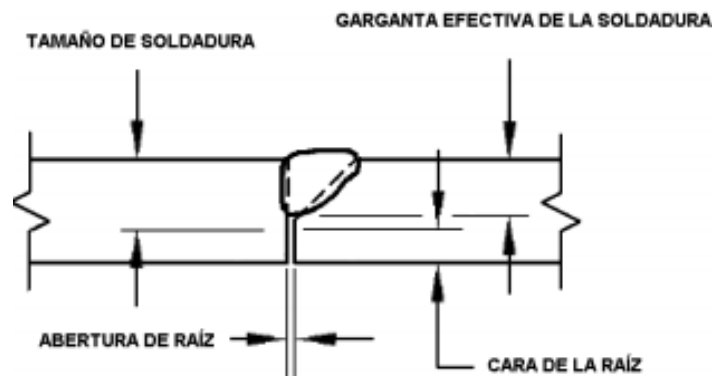


Figura 18 Junta de penetración parcial
(R. Rowel, 2009)

3.2.2. TIPO DE SOLDADURA

El tipo de soldadura que se emplea depende del tipo de trabajo que se desee obtener, teniendo así los dos principales tipos son:

- Soldadura de filete
- Soldadura de ranura

3.2.2.1. SOLDADURA DE FILETE

La soldadura de filete se emplea cuando las piezas a unir, deben formar un ángulo determinado, siendo los más comunes 90 grados.

3.2.2.2. SOLDADURA DE RANURA

La soldadura de ranura es empleada para unir dos piezas, que se encuentran en un mismo plano. Para facilitar la penetración se puede realizar o no un bisel, para garantizar una penetración completa. Los biseles de acuerdo a sus formas se observan en la Figura 19.

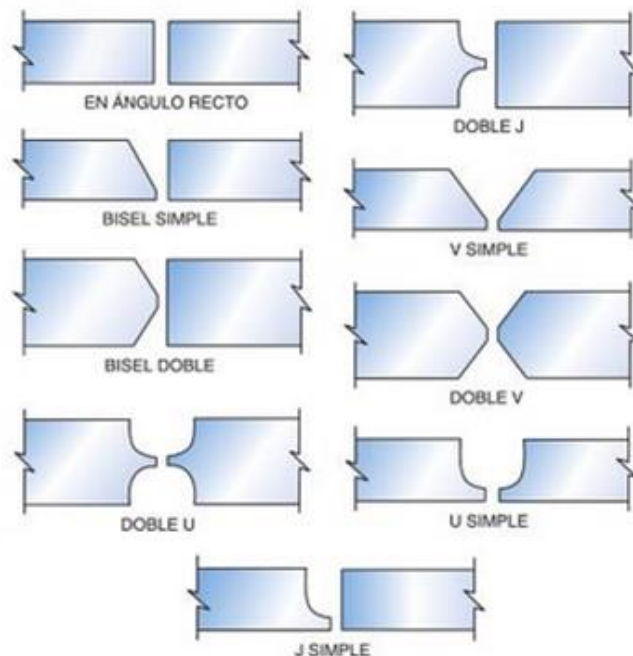


Figura 19 Tipos de biseles

(R. Rowel, 2009)

3.2.3. DIMENSIONES DE LA JUNTA

Para el diseño de la junta a ser utilizada es necesario, comprender cuales son los elementos constituyentes de una junta. Los mismos que se detallan en la figura 20.

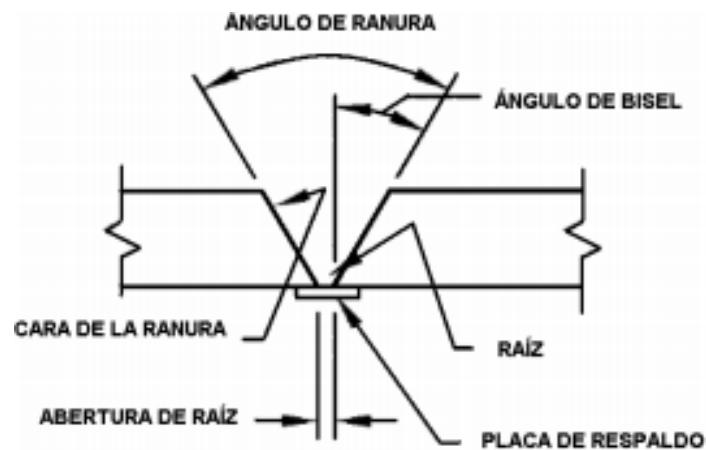


Figura 20 Elementos de una junta

(R. Rowel, 2009)

Las dimensiones de la junta CJP para la elaboración de los cupones de prueba para la presente investigación quedan definidas en la figura 21.

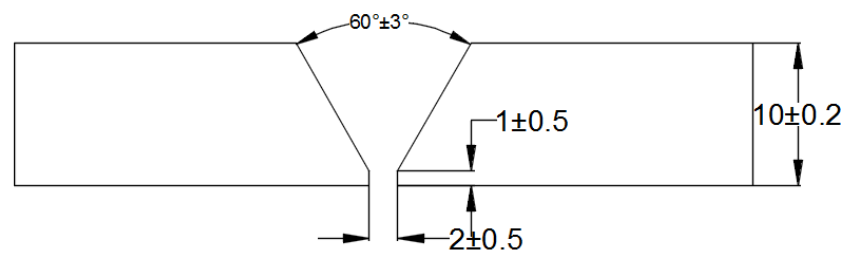


Figura 21 Geometría de la junta CJP

Para realizar el correspondiente análisis de la configuración geométrica de los cordones de soldadura depositados, las dimensiones de la junta PJP se encuentran definidas en la figura 22.

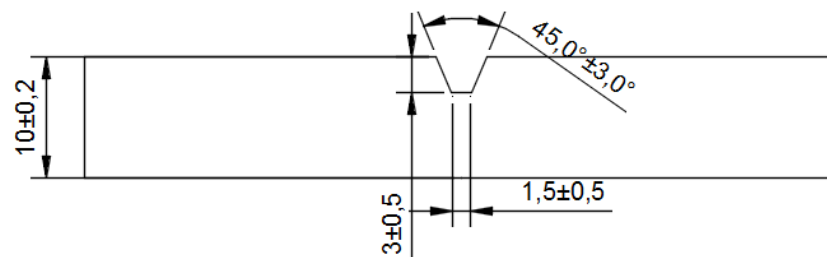


Figura 22 Geometría de la junta PJP

3.3. DIMENSIONES DEL CUPÓN DE PRUEBA

Las dimensiones finales del cupón de soldadura están definidas en función del número de ensayos que se van a realizar, según AWS D1.1 tabla 4.2 para espesores entre 3 y 10 mm se requiere 2 especímenes de doblado de cara, 2 especímenes de doblado de raíz, 2 especímenes de tracción de sección reducida, como se va analizar impacto, dureza y metalografías. El número total de probetas por cupón de soldadura viene definido en la tabla 6.

Las dimensiones finales del cupón de prueba en base a la figura 15 queda definido por 525 X 360 X 10 mm

Tabla 6

Número de probetas por cupón de soldadura

Ensayo	Numero de probetas
Tracción	2
Doblado cara	2
Doblado de raíz	2
Impacto	3
Dureza y metalografías	2

3.4. VARIABLES DEL PROCESO

Las variables del proceso GMAW, se relacionan de manera directa con los componentes principales del equipo como son: fuente de poder, pistola, sistema de suministro de gas de protección, sistema de alimentación de alambre.

3.4.1. VARIABLES ESENCIALES

Las variables esenciales son variables, que al presentar una modificación. Afectan de una manera directa a las propiedades de la junta soldada y deben estar especificadas en el WPS, según AWS D1.1 sección 4 tenemos las siguientes

- Material Base

- Metal de Aporte
 - Diámetro del alambre
- Posición
- Temperatura de Pre calentamiento
- Tratamientos térmicos post soldadura
- Características Eléctricas
 - Polaridad
 - Voltaje
 - Corriente
- Gas de protección
- Velocidad de alimentación del alambre
- Velocidad de Soldadura

3.5. MATERIAL BASE

El material base para el presente proyecto se encuentra definido en el alcance del proyecto motivo por el cual no se procede a la selección del mismo, siendo el material base el acero ASTM A36 con un espesor de a 10mm su caracterización y propiedades se encuentran detalladas la sección 2.2

3.6. MATERIAL DE APORTE

El material de aporte fue proporcionado por la empresa auspiciante, quedando definido como material de aporte el alambre ER70S-6 en 1.2 mm de diámetro

En función de la clasificación AWS 5.18 el alambre proporcionado para el presente trabajo de investigación es el ER70S-6, es un alambre continuo cobrizado de acero cuya composición química se muestra en la tabla 7

Tabla 7

Composición química alambre ER70S-6

C	0.1%
Si	0.90%
Mn	1.5%

(Catálogo AGA)

Las propiedades mecánicas del material depositado por el alambre ER70S6 se presentan en la tabla 8.

Tabla 8

Propiedades mecánicas del material depositado

Resistencia a la tracción [psi]	80000
Elongación	27.3 %

(Catálogo AGA)

3.7. DISEÑO DE LOS WPS

Para obtener los valores finales de las variables del proceso de soldadura se realizó, un número determinado de pruebas previas para obtener valores confiables para la experimentación.

Los parámetros del WPS para el gas Argón se encuentran establecidos en la tabla 9.

Tabla 9

Parámetros de soldadura para el gas Argón

Parámetros de soldadura	Procedimientos de Soldadura		
	C1	C2	C3
Amperaje	120 A	120 A	120 A
Voltaje	22	22	22
Alambre	ER70S-6	ER70S-6	ER70S-6

Diámetro de alambre	1.2 mm	1.2 mm	1.2 mm
Polaridad	DCEP	DCEP	DCEP
Tipo de gas	ARGÓN	ARGÓN	ARGÓN
Flujo	8 lt/min	12 lt/min	16 lt/min
Velocidad de Avance	7.3 cm/min	7.3 cm/min	7.3cm/min
Velocidad de alimentación alambre	540 cm/min	540 cm/min	540 cm/min

Los parámetros del WPS para la mezcla Argón – CO₂ se encuentran establecidos en la tabla 10.

Tabla 10

Parámetros de soldadura para la mezcla Argón - CO₂

Parámetros de soldadura	Procedimientos de Soldadura		
	B1	B2	B3
Amperaje	120 A	120 A	120A
Voltaje	22	22	22
Alambre	ER70S-6	ER70S-6	ER70S-6
Diámetro de alambre	1.2 mm	1.2 mm	1.2 mm
Polaridad	DCEP	DCEP	DCEP
Tipo de gas	Mezcla Ar- CO ₂	Mezcla Ar- CO ₂	Mezcla Ar- CO ₂
Flujo	8 lt/min	12 lt/min	16 lt/min
Velocidad de Avance	7.3 cm/min	7.3 cm/min	7.3cm/min
Velocidad de alimentación alambre	540 cm/min	540 cm/min	540 cm/min

Los parámetros del WPS para el gas CO₂ se encuentran establecidos en la tabla 11.

Tabla 11

Parámetros de soldadura para el gas CO₂

Parámetros de soldadura	Procedimientos de Soldadura		
	A1	A2	A3
Amperaje	120A	120 A	120 A
Voltaje	22	22	22

Alambre	ER70S-6	ER70S-6	ER70S-6
Diámetro de alambre	1.2 mm	1.2 mm	1.2 mm
Polaridad	DCEP	DCEP	DCEP
Tipo de gas	CO ₂	CO ₂	CO ₂
Flujo	8 lt/min	12 lt/min	16 lt/min
Velocidad de Avance	7.3 cm/min	7.3 cm/min	7.3cm/min
Velocidad de alimentación alambre	540 cm/min	540 cm/min	540 cm/min

3.8. IDENTIFICACIÓN DE LOS WPS

Los WPS serán diseñados bajo los mismos parámetros físicos y eléctricos la variación que presenta cada uno, es en el gas de protección. Siendo así la siguiente nomenclatura para cada uno

WPS sometidos a soldadura con CO₂

- A1
- A2
- A3

WPS sometidos a soldadura con mezcla CO₂-Argon (80% Argón – 20% CO₂)

- B1
- B2
- B3

WPS sometidos a soldadura con Argón

- C1
- C2
- C3

3.9. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

3.9.1. VARIABLES DE EXPERIMENTACIÓN

Las variables de experimentación que se contemplan para el diseño del experimento son las variables esenciales del proceso:

- Material Base
- Metal de Aporte
 - Diámetro del alambre

- Posición
- Temperatura de Pre calentamiento
- Tratamientos térmicos post soldadura
- Características Eléctricas
 - Polaridad
 - Voltaje
 - Corriente
- Gas de protección
- Velocidad de alimentación del alambre
- Velocidad de Soldadura

3.9.1.1. VARIABLES PRINCIPALES DEL EXPERIMENTO

Las variables principales del experimento son las variables que se involucran de una manera directa en cada uno de los experimentos del cuadrado latino:

- Gas de protección
- Flujo de gas

El flujo de gas se convierte en variable principal del experimento debido a que es la única variación que puede presentar el gas de protección.

3.9.1.2. VARIABLES DE RUIDO

Se denominan variables de ruido las variables del proceso que no intervienen de forma directa en el presente experimento:

- Amperaje
- Voltaje
- Polaridad
- Stick Out
- Velocidad de alimentación
- Diámetro del electrodo
- Velocidad de soldadura

Las variables anteriormente descritas fueron calificadas como variables de ruido debido a que su valor es constante en cada uno de los experimentos del cuadrado latino

3.9.2. FACTORES DEL EXPERIMENTO

Para establecer los factores del experimento partimos de las variables principales del experimento

- Gas de protección
- Flujo de gas

3.9.2.1. FACTOR PRINCIPAL DE BLOQUE

El factor principal de bloque es aquel sobre el cual se realizan las variaciones en los distintos experimentos y se encuentra dentro de la matriz del cuadrado latino y este factor es: Gas de protección en cada uno de sus tres niveles

- Gas de protección
 - Argón
 - Mezcla Argón- CO₂ (80% - 20%)
 - CO₂

3.9.2.2. FACTORES DE VARIABLE

El factor de variable es aquel que se involucra de manera directa con el factor de bloque, son las entradas horizontales del cuadrado latino. Es necesario que los niveles del factor de variable esté en el mismo número que los niveles del factor de bloque, el factor de variable y sus niveles son:

Factor de variable 1 : FV1¹¹

- Flujo de gas de protección
 - FV1.1: 8 lt/min

¹¹ FV1 : Factor de variable 1, Flujo gas de protección

- FV1.2: 12 lt/min
- FV1.3: 16 lt/min

Los valores de 8,12, y 16 lt/min fueron seleccionados en base a las recomendaciones presentes en los catálogos de soldadura que especifican un flujo de trabajo comprendido entre 10 -15 lt/min.

3.9.3. ESTRUCTURA DEL CUADRADO LATINO GENERADO

El cuadrado latino generado es:

FV1	FV1.1	A1	C1	B1
	FV1.2	B2	A2	C2
	FV1.3	C3	B3	A3

Donde:

A1, A2, A3: Procesos soldadura con CO₂

B1, B2, B3: Procesos soldadura con mezcla Argón – CO₂

C1, C2, C3: Procesos soldadura con Argón

FV1: Factor de variable 1, flujo de gas de protección

Con este cuadrado latino obtenemos nueve cupones de prueba para realizar los ensayos descritos previamente en el alcance del proyecto.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DE LA SOLDADURA Y ENSAYOS

4.1. CONTROLES ANTES DE LA SOLDADURA

Antes de realizar la soldadura es necesario realizar una inspección del material, instrumentos y equipos utilizados en el presente proyecto, seguida de una posterior calibración de los equipos que se involucran en el proceso tales como:

- Soldadora
- Equipo soldador BUG- O GO FER III- WD
- Instrumentos de medición
 - Galga de ángulos
 - Calibrador pie de rey
 - Pinza amperimétrica

4.1.1. SOLDADORA

Es preciso conocer las especificaciones técnicas de la maquina soldadora que va a ser empleada en el proceso, para conocer sus limitaciones y rangos de trabajo. Para posteriormente calibrar la maquina con los parámetros requeridos.

4.1.1.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA SOLDADORA

La máquina soldadora en el presente proyecto es la Millermatic 300 la misma se muestra en la Figura 23, las características técnicas fueron tomadas del manual de operación y se encuentran resumidas en la tabla 12.



Figura 23 Máquina de soldar MILLERMATIC 300

Tabla 12

Especificaciones técnicas de la soldadora MILLERMATIC 300

Marca	MILLER
Modelo	MILLERMATIC 300
Serie	LE170980
Potencia	13 KW
Fases	3
Hertz	60
Voltaje	12-32
Amperaje	25-300

4.1.1.2. AJUSTE DE PARÁMETROS INICIALES EN LA SOLDADORA

La máquina soldadora millermatic 300 para el presente proyecto fue calibrada con los parámetros que se presentan en la figura 24.



Figura 24 Parámetros eléctricos de soldadura calibrados.

4.1.2. ENSAMBLE Y CALIBRACIÓN EQUIPO SOLDADOR

Para la ejecución de la soldadura en los respectivos cupones, de forma automática se realizó el ensamble entre la maquina soldadora millermatic 300 y el equipo soldador BUG- O GO FER III- WD. Como se aprecia en la Figura 25



Figura 25 Equipo de soldadura ensamblado

4.1.3. ELABORACIÓN DE LOS CUPONES

Los cupones deben ser elaborados bajo norma AWS D1.1 sus dimensiones son de 180x525 mm , la geometría de la junta se encuentra detallada en la Figura 21. En las figuras 26 y 27 se muestra el proceso de corte y biselado respectivamente



Figura 26 proceso de corte



Figura 27 proceso de biselado

4.1.4. CONTROL METROLÓGICO DE LOS CUPONES

El control metrológico de los cupones se rige a las dimensiones presentes en la Fig. 4.11 de la AWS D1.1, además se controla las dimensiones de la junta como se muestra en la figura 28



Figura 28 Control metrológico de la junta

4.1.5. IDENTIFICACIÓN DE LOS CUPONES DE SOLDADURA

Es necesario identificar los cupones de prueba antes de proceder con la aplicación de la soldadura, con el fin de evitar la confusión al momento de realizar las probetas para los distintos ensayos, los cupones deben ser identificados acorde a la denominación de los WPS. Para los cupones

sometidos a soldadura con el gas de protección Argón, su identificación se muestra en la figura 29



Figura 29 Identificación de cupones sometidos a soldadura con argón

Los cupones sometidos a soldadura con el gas de protección mezcla argón – CO₂, su identificación se muestra en la figura 30



Figura 30 Identificación de cupones sometidos a soldadura con mezcla Argón – CO₂

Para los cupones sometidos a soldadura con el gas de protección mezcla CO₂, su identificación se muestra en la figura 31



Figura 31 Identificación de cupones sometidos a soldadura con CO₂

4.1.6. CONTROL DE MASA

En cada uno de los cupones antes de ejecutar la soldadura se debe realizar la medición del valor inicial de su masa, como se muestra en la figura 32.



Figura 32 Control de masa inicial en los cupones

Para el respectivo control de masa se utilizó la balanza que se muestra en la figura 33, cuyas especificaciones se detallan en la tabla 13.



Figura 33 Balanza TRANSCCELL

Tabla 13

Especificaciones técnicas de la balanza

Marca	TRANSCCELL
Modelo	PB5L
Serie	7D53053
Capacidad	30 Kg
Apreciación	1 g
Voltaje	110 V

4.2. CONTROLES DURANTE LA SOLDADURA

4.2.1. VELOCIDAD DE AVANCE

La velocidad de avance en el proceso de soldadura está controlada por el equipo soldador, el mismo que fue revisado antes de ejecutar la soldadura y

presenta un alto grado de repetibilidad en sus valores, convirtiéndose en un equipo preciso pero no exacto debido a que sus desplazamientos no coinciden con lo que se regula en el selector, con una selección de 100 mm/min el equipo presento los desplazamientos que se muestran en la tabla 14. El equipo empleado se muestra en la figura 34

Tabla 14

Desplazamientos del equipo soldador BUG- O GO FER III- WD

	(mm/min)
1	72.8
2	73,2
3	73
4	73,1
5	72,9
6	73,1
7	73,3
8	72,8
9	73
10	73
Prom	73



Figura 34 Equipo de avance automático

4.2.2. VOLTAJE

El voltaje es configurado en la maquina soldadora, al iniciar la ejecución de la soldadura, el voltaje sufre una variación de 3 voltios y trata de mantenerse estable con una variación de ± 2 décimas de voltio, en función de las necesidades de la máquina para lograr un arco estable.

4.2.3. VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN DEL ALAMBRE

Para garantizar la confiabilidad de los datos empleados en el presente proyecto se efectuó la medición de 10 datos, al utilizar como parámetro de velocidad de alimentación de alambre 250 IPM. Obteniéndose como resultado los valores de la tabla 15

Tabla 15

Longitud de alambre suministrado en 1 minuto

	(mm)	(IPM)
1	5405	212,8
2	5395	212,4
3	5400	212,6
4	5390	212,2
5	5395	212,4
6	5415	213,2
7	5410	213,0
8	5410	213,0
9	5400	212,6
10	5390	212,2
Prom	5400	212,6

4.2.4. AMPERAJE

El control del amperaje durante el proceso de soldadura se realizó con la pinza amperimétrica de la figura 35. El valor obtenido en promedio es de 120 A. Con una variación de ± 2 A.



Figura 35 Pinza amperimétrica FLUKE 337

Tabla 16

Especificaciones técnicas de la pinza amperimétrica

Marca	FLUKE
Modelo	337
Corriente ac	999.9 A
Voltaje ac	600.0 V
Continuidad	$\leq 30 \Omega$
Corriente dc	999.9 A
Voltaje dc	600.0 V
Resistencia	600.0 Ω
Diámetro conductor	30.5 mm max
Temperatura de operación	-14 – 122 °F 10 – 50 °C
IP rating	IP 40
Fuente	(2) AA 1.5 V. Batería Alcalina, 150 horas uso

4.2.5. FLUJO DE GAS

El flujo de gas para cada proceso de soldadura es calibrado al inicio del mismo, presentando una variación de 8,12, 16 lt/min como se aprecia en la figura 36.



Figura 36 Ajuste del flujo de gas con cada uno de los gases aplicados

El Flujiómetro empleado en el presente trabajo de investigación es el LINDE FM 300A BEI, las especificaciones se encuentran detalladas en la tabla 17

Tabla 17

Especificaciones técnicas del flujómetro

Marca	LINDE
Modelo	FM 300A
Serie	L11136293BEI
Gas usado	Argón Argón- CO ₂ CO ₂ Helio
Rango Flujo	0-24 Lpm.
Presión de entrega	30 PSIG 2 Bar
Conexión de entrada	1/4 " NPT Macho
Conexión de salida	5/8 " RH Interna

4.2.6. TIEMPO DE SOLDADURA

Para determinar el tiempo empleado en cada uno de los cupones de prueba en una longitud de soldadura de 525 mm se utilizó un cronometro. Figura 37. El cual arranca con el inicio del equipo soldador y finaliza cuando la soldadura

tiene contacto con el material de sujeción que se encuentra en la parte final del cupón de prueba.



Figura 37 Cronometro utilizado

4.3. CONTROLES DESPUÉS DE LA SOLDADURA

4.3.1. LIMPIEZA DE LOS CORDONES

Es necesario realizar una correcta limpieza a cada uno de los cordones de soldadura, para su posterior uso en los diferentes ensayos, la limpieza de los cordones se muestra en la figura 38.

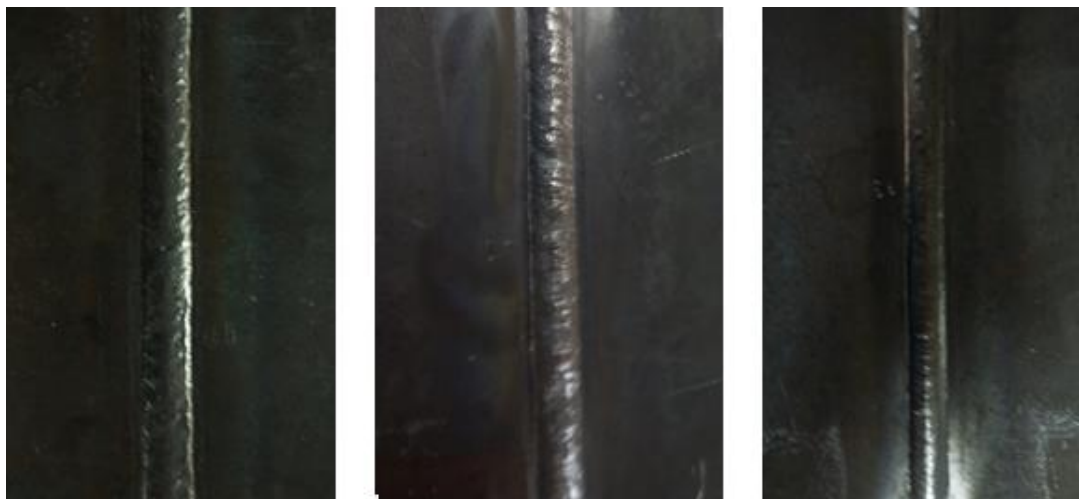


Figura 38 Limpieza de los cordones luego de la soldadura

4.3.2. CONTROL DE MASA FINAL

Para analizar el incremento de masa por adición de material de aporte, se debe realizar el control de masa después aplicar la soldadura a cada uno de los cupones de prueba, el control de masa final se encuentra mostrado en la figura 39.



Figura 39 Medición masa final de los cupones

4.4. ENSAYOS

4.4.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

4.4.1.1. GEOMETRÍA DE LOS CORDONES

La medición de la geometría de cada uno de los cordones se realizó con la ayuda del microscopio de herramientas del laboratorio de Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE , las dimensiones a considerar fueron las detalladas en la figura 40.

- a: Valor de la sobremonta
- b: valor del ancho del cordón
- p: Valor de la penetración

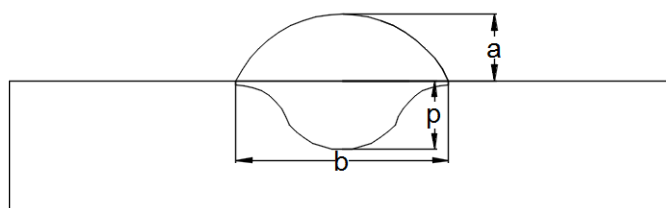


Figura 40 Dimensiones de los cordones de soldadura

4.4.1.2. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

4.4.1.2.1. METALOGRAFÍA

La metalografía de un material permite conocer su estructura interna debido a que la estructura guarda una estrecha relación con las propiedades que presenta el material, el tipo y la forma y estado de los constituyentes metalográficos dependen las propiedades físicas. Al realizar una macrografía en la junta soldada no permite observar las distintas regiones afectadas y la extensión de las mismas.

El análisis metalográfico de los cordones se realizó en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Universidad De Las Fuerzas Armadas – ESPE.

Para el análisis de un espécimen mediante macro ataque se basa a la norma ASTM E 307.

4.4.1.2.2. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

El primer paso es la extracción de las probetas de ensayo, el lugar y proporción de material de estudio es indispensable para la obtención de los resultados finales. Para el presente caso de estudio las probetas son extraídas de la parte central del cordón de soldadura.

El segundo paso es generar una cara plana para poder realizar el pulido grueso, el pulido se realizó en el equipo STRIP GRINDER mostrado en la figura 41.



Figura 41 Equipo STRIP GRINDER

El procedimiento para desbastar el material por medio de un pulido mecánico, es necesario que las probetas pasen gradualmente por una lija de mayor número. En el ensayo se utilizó lijas 150, 240, 320, 500, 600, 1200 y 1500. Antes de cambiar de un número menor a mayor es necesario girar 90 grados la orientación de la lija para eliminar totalmente el pulido previo.

Antes de atacar químicamente la probeta se necesita obtener un acabado tipo espejo, para lo cual mediante el equipo POLISHER mostrado en la figura 42, se adiciona alúmina sobre un paño y mediante fricción se procede al pulido final.



Figura 42 Equipo de pulido POLISHER

Una vez concluido el pulido fino y la probeta se encuentra con un acabado tipo espejo procedemos a realizar el ataque químico con NITAL al 3%, el mismo que es una solución de alcohol y ácido nítrico en una concentración del 3 %. Para poder revelar las distintas zonas presentes en la probeta.

Para determinar la microestructura es necesario que las probetas sean colocadas en el microscopio electrónico mostrado en la figura 43.



Figura 43 Microscopio Electrónico

Tabla 18

Especificaciones microscopio electrónico

Marca	MEIJI TECHNO
Modelo	IM7200
Serie	1975
Voltaje	110 V
Objetivos	5X, 10X, 20X, 50X, 100X.
Oculares	10X, 20X.
Cámara	Pax iT
Software	Pax iT

4.4.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS**4.4.2.1. ENSAYO DE TENSIÓN**

El ensayo de tensión se basa en la aplicación de una carga en el eje axial de la probeta, con esto se obtiene una deformación elástica seguida de una deformación plástica llegando a su esfuerzo de rotura, las dimensiones de la probeta de tensión se especifica en la norma AWS D1.1 Figura 4.14. El procedimiento y criterio de aceptación esta normado en la norma AWS B4

4.4.2.1.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO

En AWS B4.0 se muestra el procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo, La probeta debe ser llevada hasta su rotura, y la resistencia está determinada mediante la división de la carga total aplicada para el área transversal de la sección reducida, que debe ser medida antes de realizar el ensayo.

Este ensayo será efectuado en la máquina de ensayos universales del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

4.4.2.1.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para realizar el ensayo de tensión se utilizó la máquina de ensayos universales cuyas especificaciones se encuentran en la tabla 19.

Tabla 19

Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033

EQUIPO: Máquina de ensayos universales	
CÓDIGO: MM-29	MARCA: AMSLER
MANUAL: MMM-29	MODELO: FM-1033
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
VOLTAJE: 220 V	REFRIGERANTE: N/A
FASES: 3	TIPO DE MOTOR: P-8
CICLOS: 60 Hz	POTENCIA MOTOR: 2 HP
PESO: 500 kg	VELOCIDAD MÁX MOTOR: 1700 rpm
CAPACIDAD MÁXIMA: 10 ton	COMBUSTIBLE: N/A



Figura 44 Máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033.

4.4.2.1.3. CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PROBETAS

Para realizar el cálculo de la resistencia de las probetas en el ensayo de tensión es necesario determinar el área transversal de la sección reducida, resumidas en la tabla 20

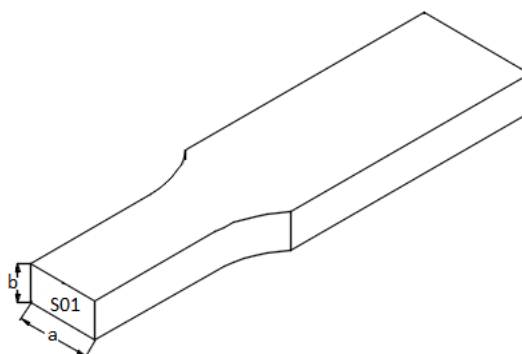


Figura 45 Esquema dimensiones consideradas en la probeta de tensión

Tabla 20

Dimensiones de probetas de tensión y secciones transversales

		a	b	S01	a1	b1	S02
		mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²
CO₂	A1	20	10.09	201.8	19.98	10.11	202.0
	A2	20.02	10.2	204.2	20.01	10.07	201.5
	A3	19.98	10.06	201.0	20.02	10.15	203.2
Argón - CO₂	B1	20.01	10.03	200.7	20.1	10.04	201.8
	B2	19.97	10.01	199.9	20	10.03	200.6
	B3	20.03	10.13	202.9	19.99	10.17	203.3
Argón	C1	19.95	10.21	203.7	20.04	9.99	200.2
	C2	20.05	10.15	203.5	20.01	10.1	202.1
	C3	19.97	10.03	200.3	20.15	10.12	203.9

4.4.2.2. ENSAYO DE TENACIDAD

El ensayo de tenacidad charpy NOTCH-V es empleado para determinar la tenacidad que presentan los materiales, debido al concepto de tenacidad este ensayo bajo un concepto estricto mide la capacidad de absorción de energía

de un material, su procedimiento se encuentra normado en la norma ASTM A-370

4.4.2.2.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO

En AWS B4.0 se muestra el procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo, La probeta debe ser llevada hasta su rotura por medio del equipo de péndulo charpy, la resistencia de la probeta está determinada mediante la cantidad de energía que puede absorber antes de llegar a la rotura

Este ensayo se efectuó en la máquina de ensayos universales del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

4.4.2.2.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para realizar el ensayo de tenacidad se utilizó el péndulo de impacto cuyas especificaciones se encuentran en la tabla 21.

Tabla 21

Especificaciones técnicas del péndulo de impacto AMSLER 30 HP

EQUIPO: Péndulo de Impacto	
CÓDIGO: MM-23	MARCA: AMSLER
MANUAL: MMM-23	MODELO: 30HP 130
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
VOLTAJE: N/A	REFRIGERANTE: N/A
FASES: N/A	TIPO DE MOTOR N/A
CICLOS: N/A	POTENCIA MOTOR: N/A
PESO: 600 kg	VELOCIDAD MÁX MOTOR: N/A
CAPACIDAD MÁXIMA: 30 [kpm]	COMBUSTIBLE: N/A



Figura 46 Péndulo de impacto AMSLER 30 HP 130.

4.4.2.2.3. CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS PROBETAS

El área transversal de las probetas sometidas a impacto se muestran en la tabla 22

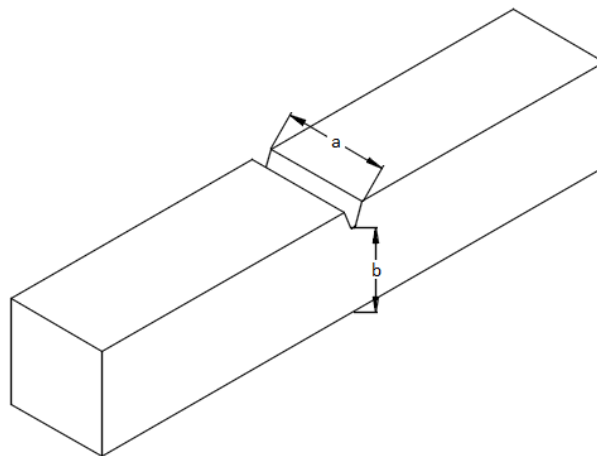


Figura 47 Esquema dimensiones consideradas en la probeta de tensión

Tabla 22

Dimensiones de probetas de tensión y secciones transversales

1			2			3		
a_1	b_1	S_{01}	a_2	b_2	S_{02}	a_3	b_3	S_{03}
(mm)	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm ²)

CO₂	A1	10.01	8.1	81.1	10.1	8	80.8	9.94	8.07	80.2
	A2	9.96	8.03	80.0	10.04	8.08	81.1	10.1	8	80.8
	A3	10.15	8.1	82.2	10	8	80.0	10.04	8.05	80.8
Argón - CO₂	B1	9.99	8.03	80.2	10.03	8.1	81.2	10.03	7.97	79.9
	B2	9.98	8.02	80.0	10.02	7.99	80.1	10.06	8.02	80.7
	B3	10.05	8.1	81.4	10.15	8.08	82.0	9.83	8.01	78.7
Argón	C1	10.1	8.01	80.9	10.2	7.95	81.1	10.01	8.1	81.1
	C2	10.05	8.1	81.4	10.02	8.05	80.7	9.92	8.01	79.5
	C3	10.12	8.1	82.0	9.95	8	79.6	10	8.05	80.5

4.4.2.3. ENSAYO DE DOBLADO GUIADO

El ensayo de doblez guiado permite realizar un control a la soldadura, al realizar el doblez se observa la ductilidad que presenta la junta soldada y la eficacia del procedimiento de soldadura aplicado, como el espesor de la placa base es 10 mm se sustituye el dobles de lado por el doblez de cara y de raíz como se sugiere en la norma AWS D1.1 sección 4.

4.4.2.3.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO

Para la realización de este ensayo se remite a la norma AWS D1.1, la misma que en la sección 4 hace alusión al dispositivo que se debe emplear en el ensayo de doblez guiado. La carga aplicada debe ser desde la parte superior mediante un embolo, obligando a la probeta a adoptar la curvatura por medio de los rodillos presentes en los dos extremos.

Este ensayo será efectuado en la máquina de ensayos universales del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

4.4.2.3.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para realizar el ensayo de doblez guiado se utilizó la máquina de ensayos universales, en la misma que se debe calibrar la distancia para un material base de 10 mm es necesaria una distancia de 62 mm entre apoyos. Las especificaciones técnicas del equipo utilizado se encuentran en la tabla 23.

Tabla 23

Especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033

EQUIPO: Máquina de ensayos universales	
CÓDIGO: MM-29	MARCA: AMSLER
MANUAL: MMM-29	MODELO: FM-1033
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
VOLTAJE: 220 V	REFRIGERANTE: N/A
FASES: 3	TIPO DE MOTOR: P-8
CICLOS: 60 Hz	POTENCIA MOTOR: 2 HP
PESO: 500 kg	VELOCIDAD MÁX MOTOR: 1700 rpm
CAPACIDAD MÁXIMA: 10 ton	COMBUSTIBLE: N/A



Figura 48 Máquina de ensayos universales AMSLER FM-1033.

4.4.2.4. ENSAYO DE DUREZA

4.4.2.4.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO

Para realizar el ensayo de dureza es necesario como primer paso obtener superficies planas paralelas, para posteriormente colocar en el porta probetas en el durómetro. Se selecciona el tiempo de indentación y la carga aplicada.

La dureza es medida a lo largo de la porción más ancha del cordón de soldadura como se muestra en la figura 49

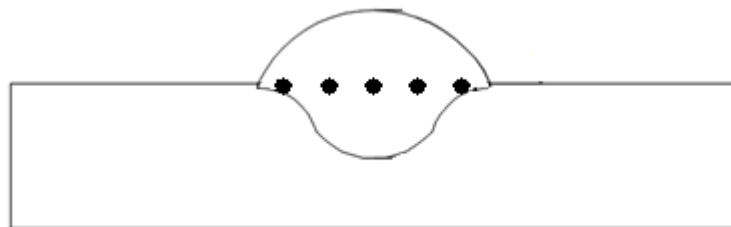


Figura 49 Indentaciones realizadas para determinar la dureza

El microscopio automáticamente realiza la lectura de las diagonales que se muestra en la figura 50

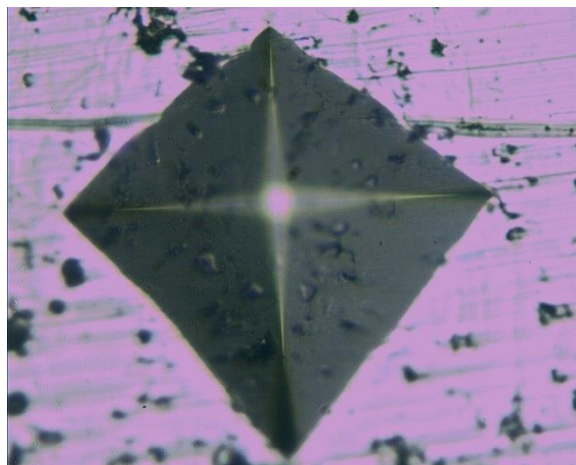


Figura 50 Indentación Vickers con sus respectivas diagonales

El durómetro no muestra el valor Vickers, con su respectiva conversión a dureza brinell como se muestra en la figura 51



Figura 51 lectura obtenida del durómetro

Este ensayo se efectuó en el laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

4.4.2.4.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Para realizar el ensayo de dureza el equipo empleado es un durómetro digital perteneciente al laboratorio de Ciencia de los Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, las especificaciones técnicas del equipo utilizado se detallan en la tabla 24

Tabla 24

Especificaciones técnicas del durómetro

EQUIPO: Durómetro Digital	
CÓDIGO: -----	MARCA: METKON
MANUAL: -----	MODELO: DUROLINE-X
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
VOLTAJE: 110 V	REFRIGERANTE: N/A
FASES: 1	TIPO DE MOTOR: N/A
CICLOS: 60 Hz	ZOOM: 10X, 40X
PESO: 15 kg	FABRICACION: 2014
	COMBUSTIBLE: N/A



Figura 52 Durómetro METKON

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.1. TIEMPO DE SOLDADURA

El tiempo empleado en cada uno de los cupones de prueba en la longitud de 525 mm se encuentra detallado en la tabla 25, los mismos que son base fundamental para el análisis de la productividad.

Tabla 25

Tiempo empleado en la realización de la soldadura

	Procedimientos de Soldadura								
	CO ₂			Argón – CO ₂			Argón		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Tiempo (min)	7,13	7,10	7,18	7,20	6,97	7	7,08	7,02	7,13

Los valores de tiempo presentes en la tabla corresponden al tiempo efectivo de soldadura.

5.1.2. MATERIAL DEPOSITADO EN LOS DIFERENTES CUPONES

Para determinar el material depositado se realizó la medición de masa inicial y final procedimientos documentados en este capítulo en los numerales 4.1.6 y 4.3.2 respectivamente.

Como resultado se obtiene los valores presentes en la tabla 26.

Tabla 26

Tabla del material depositado

		Peso Inicial	Peso Final	Material Depositado
		g	g	g
CO ₂	A1	14.943	15.252	309
	A2	14.991	15.357	366
	A3	14.629	15.015	386
Ar- CO ₂	B1	14.722	15.056	334
	B2	15.019	15.392	373
	B3	14.942	15.343	401
Argón	C1	14.856	15.202	346
	C2	14.732	15.092	360
	C3	15.201	15.596	395

5.1.3. INSPECCIÓN VISUAL**5.1.3.1. DEFECTOS DE SOLDADURA**

La inspección visual es un método mediante el cual, permite determinar la calidad de la soldadura después de realizar la inspección de la junta soldada. Analizando el prerrequisitos y las recomendaciones generales se presenta como resultado de la inspección.

Tabla 27

Resumen de los defectos encontrados en los diferentes cupones

	Identificación	Longitud Evaluada	Posición	Dimensión	Evaluación según AWS D1.1	Observación
		mm	mm	mm		
CO ₂	A1	300	0-300		aceptable	salpicadura
	A2	300	0-300	5.8	aceptable inaceptable	salpicadura overlap
	A3	300	0-300	5.9	inaceptable	overlap
Argón- CO ₂	B1	300	83 , 215	1	aceptable	socavación
	B2	300			aceptable	No registra defectos
	B3	300			aceptable	No registra defectos

Argón	C1	300	0- 300	1.5	inaceptable	Porosidad
	C2	300	78 , 165	0.75, 1	aceptable	mordedura
	C3	300	110	1	aceptable	socavación

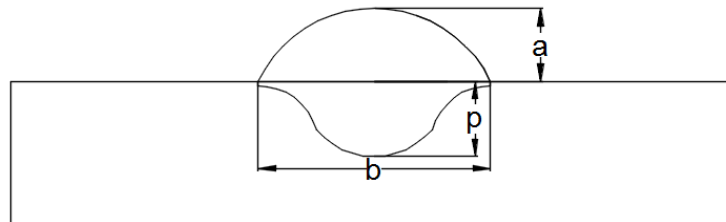
La porosidad presente en el cupón C1 se extiende a la zona interna del cordón como se muestra en la figura 53



Figura 53 Porosidad presente en el cordón de soldadura

5.1.4. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

5.1.4.1. DIMENSIONES



- a: Valor de la sobremonta
- b: valor del ancho del cordón
- p: Valor de la penetración

Los valores de las dimensiones de los cordones de soldadura se encuentran resumidos en la tabla 28.

Tabla 28

Dimensiones de los cordones de soldadura

		a mm				b mm				P mm			
		C1	C2	C3	prom	C1	C2	C3	prom	C1	C2	C3	prom
CO ₂	A1	5,4	5,4	5,4	5,4	16,4	16,4	16,4	16,4	5,3	5,2	5,1	5,2
	A2	5,8	5,8	5,8	5,8	16,0	16,0	16,1	16,0	5,2	5,1	5,1	5,1
	A3	6,0	5,9	5,9	5,9	16,2	16,3	16,3	16,3	5,3	5,2	5,2	5,2
Ar- CO ₂	B1	4,9	4,9	4,9	4,9	18,7	18,8	18,7	18,7	3,9	4,0	4,0	4,0
	B2	5,3	5,3	5,3	5,3	19,4	19,4	19,4	19,4	3,8	3,8	3,8	3,8
	B3	5,4	5,5	5,5	5,5	21,0	21,0	21,0	21,0	3,8	3,8	3,8	3,8
Argón	C1	5,2	5,2	5,2	5,2	20,1	20,1	20,1	20,1	3,2	3,2	3,2	3,2
	C2	5,2	5,2	5,2	5,2	20,8	20,8	20,7	20,8	3,1	3,0	3,0	3,0
	C3	5,3	5,3	5,3	5,3	20,9	20,9	21,0	20,9	3,1	3,2	3,2	3,2

Gas de protección CO₂

Con el aumento del flujo de gas los valores de ancho y penetración no se afectan, el valor de la sobremonta sufre un incremento y la formación de un excesivo overlap.

Gas de protección Argón - CO₂

Con el aumento del flujo de gas los valores de ancho y sobremonta incrementan su valor, el valor de la penetración no se afecta con el aumento del flujo de gas de protección.

Gas de protección Argón

Con el aumento del flujo de gas los valores de penetración y sobremonta no sufren cambios significativos, el ancho del cordón de soldadura aumenta su valor en presencia de mayor flujo de protección.

La penetración que presenta cada uno de los cupones de prueba en un mismo gas de protección no presenta una variación representativa en función

del flujo de gas de protección, pero el perfil de penetración depende del tipo de gas utilizado como se observa en la figura en la figura 54

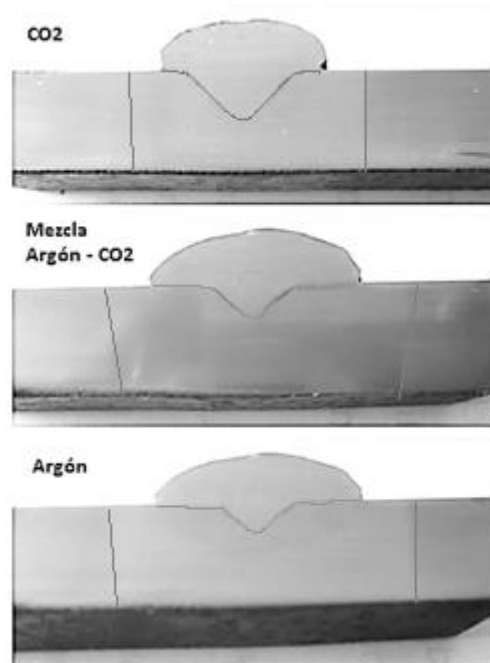


Figura 54 Perfiles de penetración con los diferentes tipos de gas empleados

Los perfiles de soldadura presentes en la figura 54 corresponden a los cupones elaborados con un flujo de gas de 12 lt/min

La máxima penetración se obtiene con el gas de protección CO_2 con un valor máximo de 5,2 mm al realizar la soldadura con un flujo de 16 lt/min

5.1.5. ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE

5.1.5.1. RESULTADOS

El área afecta térmicamente en los distintos cupones de prueba se muestra en la tabla 29

Tabla 29

Área afectada térmicamente

		area	Prom
		(mm ²)	
CO ₂	A1	195	218,33
	A2	225	
	A3	235	
Ar- CO ₂	B1	260	288,33
	B2	280	
	B3	325	
Argón	C1	260	307,67
	C2	323	
	C3	340	

El área de la zat fue determinada en el Laboratorio de metrología con el microscopio de herramientas, tomando las lecturas de las dimensiones del trapecio generado, restando el valor del área del cordón de soldadura.

ANOVA de dos factores: ZAT vs. GAS. Flujo

Fuente	GL	SC	MC	F	P
GAS	2	13254,2	6627,11	31,62	0,004
Flujo	2	5797,6	2898,78	13,83	0,016
Error	4	838,4	209,61		
Total	8	19890,2			

S = 14,48 R-cuad. = 95,78% R-cuad.(ajustado) = 91,57%

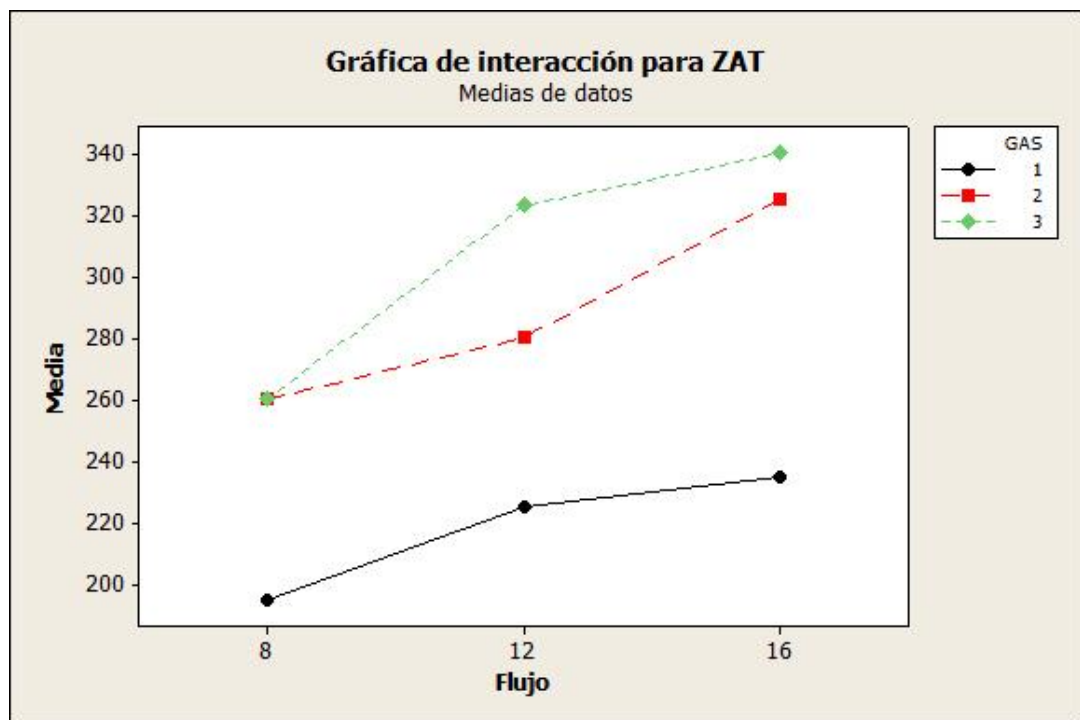


Figura 55 Gráfica de valores medios del área de la ZAT para los distintos gases de protección vs Flujo

El área de la ZAT presenta una correlación fuerte en función del porcentaje de flujo de gas aplicado, en los tres casos independientemente del tipo de gas a mayor flujo de gas mayor área afectada térmicamente

5.1.5.2. ANÁLISIS

La zona afectada térmica en todos los casos al aumentar el flujo de gas aumenta la zona afectada térmicamente para el caso particular del CO₂ el aumento de la ZAT es del 20,51%, para el gas de protección argón el incremento es del 30,77%. Estos incrementos del área afectada se presentan por el aumento del 100 % de gas empleado respecto a la primera aplicación correspondiente a 8 lt/min.

El gas de protección CO₂ genera una menor zona de afectación con un promedio de 218,33 mm², caso contrario sucede con el argón que presenta una mayor afectación térmica al material base que tiene un promedio de 306,67 mm², la mezcla Argon-CO₂ al tener en su composición un 80% argón su comportamiento es similar al argón puro.

5.1.6. MICROESTRUCTURA

5.1.6.1. RESULTADOS

Después de aplicar el ataque químico revela las tres zonas presentes en las probetas, las mismas que son:

- Material base
- Zona afectada térmicamente
- Soldadura

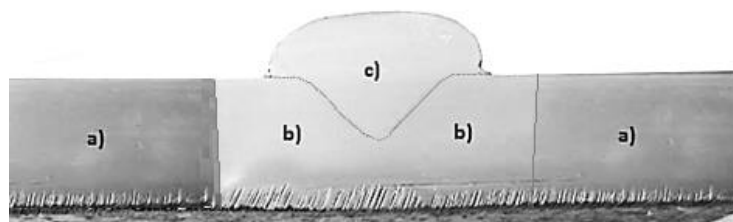
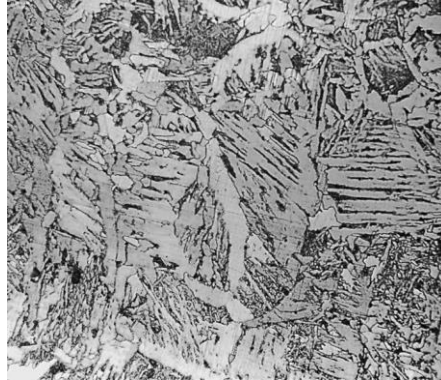


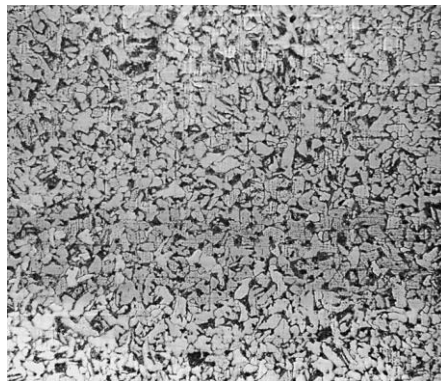
Figura 56 Zonas presentes en la soldadura a) material base b) Zona afectada térmicamente c) material de aporte

La figura 56 muestra las zonas presentes de una probeta extraída del cupón sometido a soldadura con gas de protección CO₂ con un flujo de 12 lt/min.

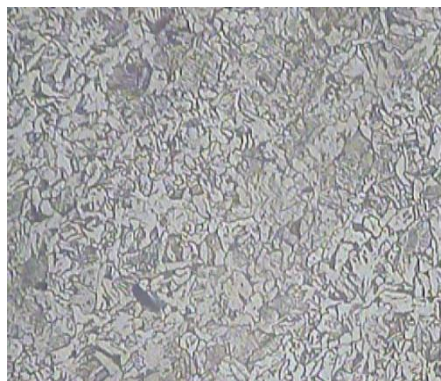
La microestructura con una amplificación de 200x a las probetas sometidas a soldadura con gas de protección CO₂ se muestra en la figura 57.



a)



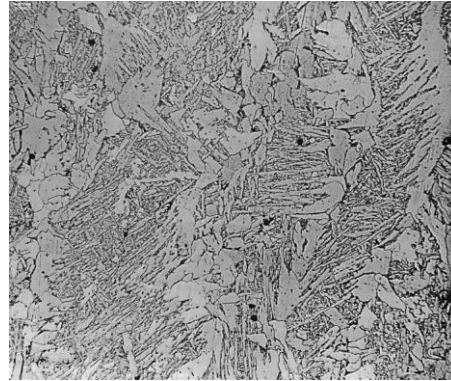
b)



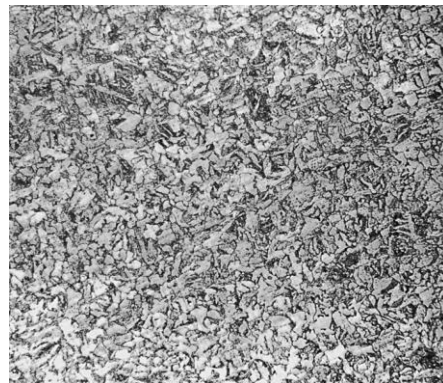
c)

Figura 57 Microestructura CO₂ a) Soldadura b) Zona afectada térmicamente c) material base

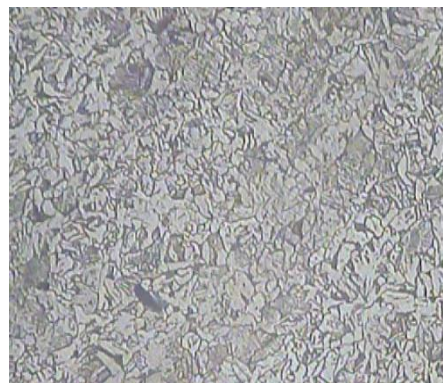
La microestructura con una amplificación de 200x a las probetas sometidas a soldadura con gas de protección mezcla CO_2 - Argón se muestra en la figura 58



a)



b)



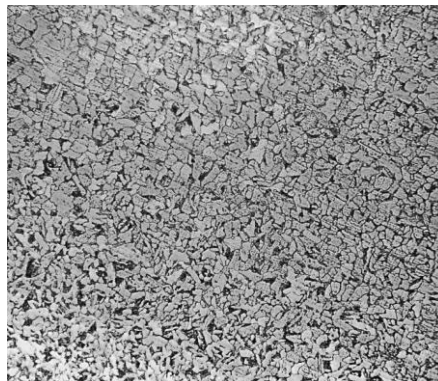
c)

Figura 58 Microestructura mezcla Argón – CO_2 a) Soldadura b) Zona afectada térmicamente c) material base

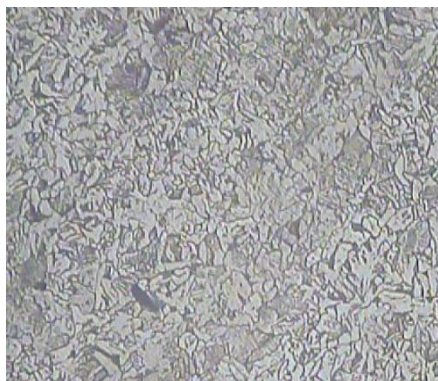
La microestructura con una amplificación de 200x a las probetas sometidas a soldadura con gas de protección Argón se muestra en la figura 59



a)



b)



c)

Figura 59 Microestructura Argón a) Soldadura b) Zona afectada térmicamente c) material base

La microestructura presente en el cordón de soldadura de los tres tipos gases empleados presenta la misma configuración de la figura 60

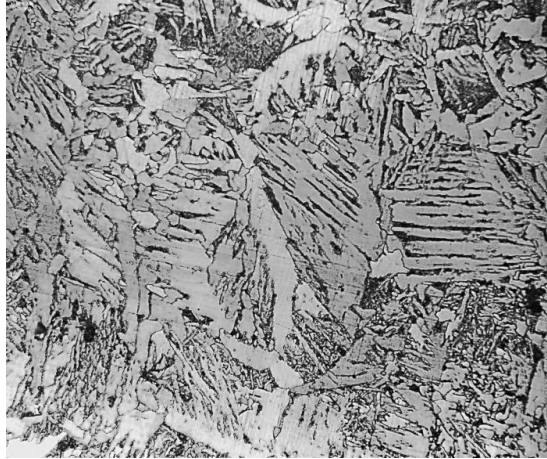


Figura 60 Microestructura de la soldadura

La microestructura presente en la zona de la soldadura evidencia la presencia de ferrita en forma de bandas y perlita

El tamaño de grano determinado en base a la norma ASTM E112, existe un crecimiento del tamaño de grano en la ZAT con respecto al material base el mismo que esta detallado para cada uno de los cupones en la tabla 30

Tabla 30

Crecimiento del tamaño de grano en la ZAT

		G	G
		m.b.	ZAT
CO₂	A1	6	5
	A2	6	4.5
	A3	6	4
Ar- CO₂	B1	6	4.5
	B2	6	4
	B3	6	4
Argón	C1	6	4
	C2	6	3.5
	C3	6	3.5

5.1.7. PROPIEDADES MECÁNICAS

5.1.7.1. DUREZA

5.1.7.1.1. RESULTADOS

Los valores de dureza de los cupones sometidos a soldadura con gas de protección CO₂ se muestran en la tabla 31

Tabla 31

Valores de dureza obtenidos con gas de protección CO₂

Nº	CO ₂					
	A1		A2		A3	
	HV	HB	HV	HB	HV	HB
1	199.8	200	190	190	158.7	159
2	213.7	204	185.6	186	163.4	163
3	192.1	192	191.2	191	153.4	153
4	199.1	199	179.1	179	155.8	156
5	189.6	190	184.5	185	153.4	153
Prom.	198.9	197	186.1	186	156.9	157

Los valores de dureza de los cupones sometidos a soldadura con gas de protección mezcla argón - CO₂ se muestran resumidos en la tabla 32

Tabla 32

Valores de dureza obtenidos con gas de protección mezcla argón – CO₂

Nº	Argon – CO ₂					
	B1		B2		B3	
	HV	HB	HV	HB	HV	HB
1	184.7	185	186.1	186	143.7	144
2	187.3	187	166	166	155.9	156
3	184.3	184	172.6	173	149.7	150
4	191.9	192	177.6	178	153.8	154
5	184.3	184	178.8	179	150.4	150
Prom.	186.5	187	176.2	176	150.7	151

Los valores de dureza de los cupones sometidos a soldadura con gas de protección argón se muestran resumidos en la tabla 33.

Tabla 33

Valores de dureza obtenidos con gas de protección argón

Nº	Argón					
	C1		C2		C3	
	HV	HB	HV	HB	HV	HB
1	177.4	177	174.6	175	158.1	158
2	173.8	174	173.5	174	162.6	163
3	177	177	175.5	176	158	158
4	173.1	173	176.3	176	165.5	166
5	179	179	167.4	167	156.1	156
Prom.	176.06	176	173.46	173	160.06	160

El resumen de los valores de dureza obtenidos sobre la porción más ancha del cordón de soldadura se muestra en la tabla 34.

Tabla 34

Resumen de valores de dureza

		HV	HB	Prom.
CO ₂	A1	198.9	197	180
	A2	186.1	186	
	A3	156.9	157	
Ar- CO ₂	B1	186.5	187	171,3
	B2	176.2	176	
	B3	150.7	151	
Argón	C1	176.1	176	169,6
	C2	173.5	173	
	C3	160.1	160	

ANOVA de dos factores: Dureza vs. GAS y Flujo

Fuente	GL	SC	MC	F	P
GAS	2	192,89	96,444	2,09	0,239
Flujo	2	1482,89	741,444	16,08	0,012
Error	4	184,44	46,111		
Total	8	1860,22			

S = 6,791 R-cuad. = 90,08% R-cuad.(ajustado) = 80,17%

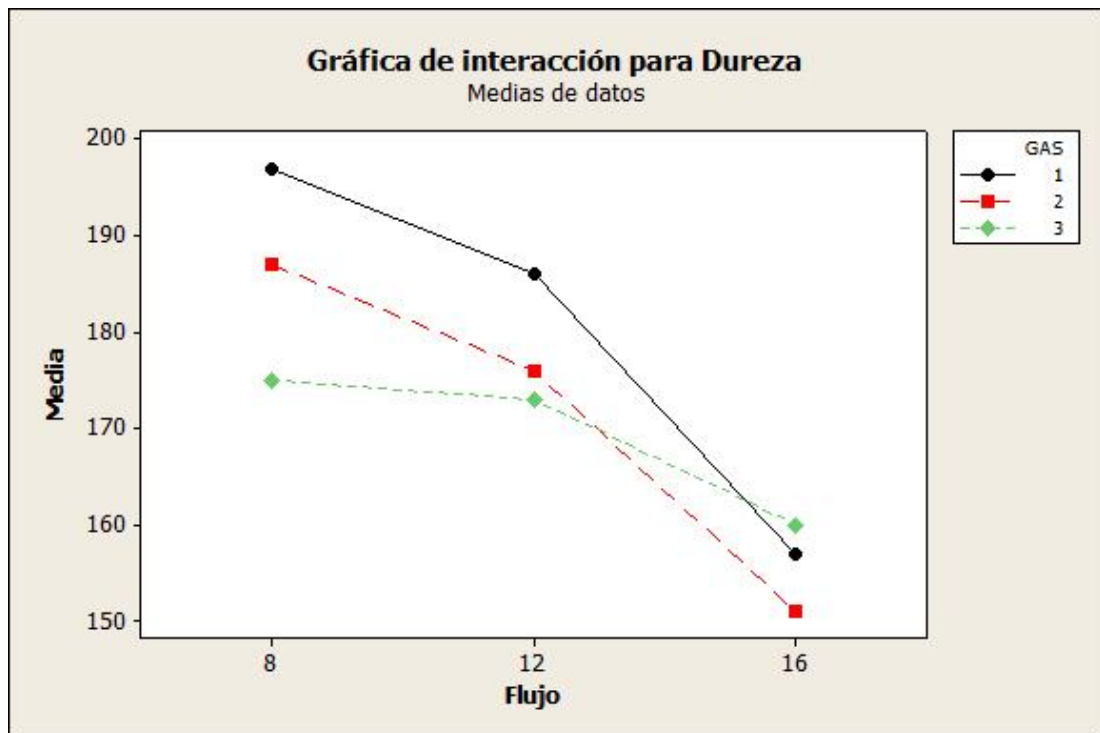


Figura 61 Gráfica de valores medios de dureza para los distintos gases de protección vs Flujo

La dureza presenta una correlación fuerte en función del porcentaje de flujo de gas aplicado, en los tres casos independientemente del tipo de gas a mayor flujo de gas menor valor de dureza

5.1.7.1.2. ANÁLISIS

Después de realizar las respectivas mediciones de la dureza en diferentes puntos sobre porción más ancha del cordón de soldadura, esquematizado en la figura 49. Los resultados determinan que en presencia de un mayor flujo de gas de protección en los tres experimentos, la dureza disminuye gradualmente como se observa en la tabla 34.

La mayor dureza se presenta en los cupones sometidos a soldadura con gas de protección CO₂ con valor máximo de 197 HB y un promedio de 180 HB, además presenta una disminución gradual máxima del 20% al aumentar el 100% de gas empleado respecto a la primera aplicación correspondiente a 8 lt/min.

5.1.7.2. TENSIÓN

5.1.7.2.1. RESULTADOS

Los resultados del ensayo de tensión obtenidos se encuentran en la tabla 35 donde la carga aplicada F_1 , F_2 , fueron divididas para cada una de las secciones transversales de la tabla 20 para obtener las resistencias R_1 , R_2 .

R_m es el promedio de las resistencias R_1 , R_2 debido a que son probetas pertenecientes al mismo cupón de soldadura, y extraídas bajo las mismas condiciones. R_m es el valor S_{ut} conocido como el valor de resistencia último a la tracción

Tabla 35

Resultados del ensayo de tensión

		F1 (N)	F1 (N)	R1 (Mpa)	R2 (Mpa)	Rm (Mpa)	Observación
CO ₂	A1	68450,77	65704,89	339	325	332	Rotura en el material de aporte
	A2	63743,55	65606,82	312	326	319	Rotura en el material de aporte
	A3	53936,85	56878,86	268	280	274	Rotura en el material de aporte
Ar-CO ₂	B1	67077,83	68352,70	334	339	336	Rotura en el material de aporte
	B2	56976,93	60507,34	285	302	293	Rotura en el material de aporte
	B3	46189,56	49229,63	228	242	235	Rotura en el material de aporte
Argón	C1	24909,02	31675,64	122	158	140	Rotura en el material de aporte
	C2	56192,39	62076,41	276	307	292	Rotura en el material de aporte
	C3	47366,36	49818,04	236	244	240	Rotura en el material de aporte

El valor de 140 Mpa del cupón C1 sometido a soldadura con gas de protección argón y flujo de 8 lt/min no presenta una correlación con la dureza. Su valor de resistencia es bajo debido a la cantidad de poros internos que presentó la probeta, ocasionados por una deficiente protección del gas

En la figura 63 se muestra las probetas después del ensayo de tensión



Figura 62 Probeta de tensión sometidas a ensayo

Tabla 36

Resumen de los valores de resistencia a la tensión

		R_m (Mpa)	Prom
CO₂	A1	332	308
	A2	319	
	A3	274	
Ar- CO₂	B1	336	288
	B2	293	
	B3	235	
Argón	C1	140	224
	C2	292	
	C3	240	

La norma ASTM A36 establece que el valor mínimo aceptable de resistencia a la rotura es de 400 Mpa, la rotura en los ensayos de tensión se produce en el material de aporte que presenta una resistencia a la tracción de

550 Mpa. Con los valores obtenidos experimentalmente ningún cupón cumple con la especificación ASTM A36.

ANOVA de dos factores: Resistencia vs. GAS y Flujo

Fuente	GL	SC	MC	F	P
GAS	2	11621,6	5810,78	1,57	0,315
Flujo	2	4080,2	2040,11	0,55	0,615
Error	4	14846,4	3711,61		
Total	8	30548,2			

S = 60,92 R-cuad. = 51,40% R-cuad.(ajustado) = 2,80%

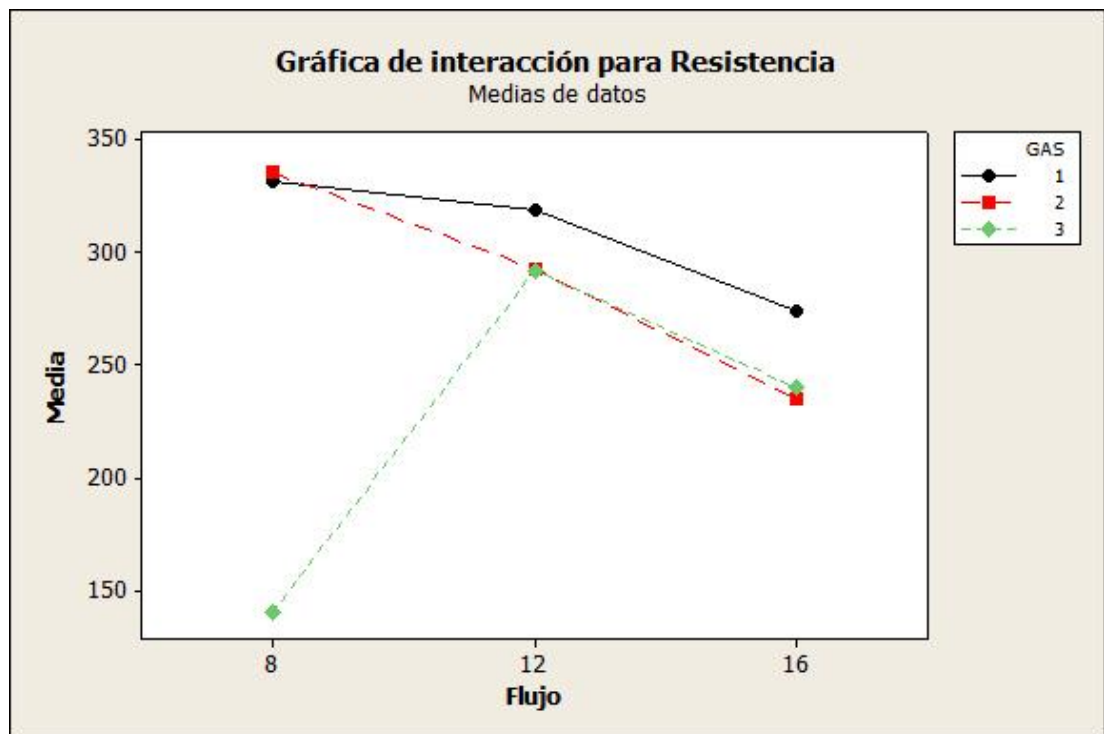


Figura 63 Gráfica de valores medios de resistencia para los distintos gases de protección vs Flujo

El valor de la resistencia a la rotura presenta una correlación fuerte en función del porcentaje de flujo de gas aplicado, en los tres casos independientemente del tipo de gas a mayor flujo de gas menor valor de resistencia a la rotura

5.1.7.2.2. ANÁLISIS

El tipo de gas empleado en los respectivos cupones presenta una variación significativa alcanzando su valor máximo de los especímenes de prueba sometidos a soldadura con gas de protección CO₂ con un valor promedio de 308 Mpa . El flujo de gas afecta de forma inversa a la resistencia a mayor flujo ofrece una menor resistencia. La reducción del valor de la resistencia para el caso particular del gas CO₂ es del 17%, la reducción es del 30% en la mezcla CO₂– argón en ambos casos la reducción se presenta por el aumento del 100 % de gas empleado respecto a la primera aplicación correspondiente a 8 lt/min.

En presente proyecto de investigación se exceptúa del análisis el cupón de soldadura C1 que presenta un valor de dureza alto contrarrestado con un bajo valor de resistencia ocasionado por la cantidad de poros presentes en el cupón.

Ningún cupón cumple con la especificación ASTM A36, su valor de resistencia a la rotura es inferior a 400 Mpa.

La resistencia a la tensión interactúa de la misma forma que la dureza a mayor flujo disminuyen sus valores

5.1.7.3. TENACIDAD

5.1.7.3.1. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los ensayos de tenacidad se encuentran resumidos en la tabla 37 que se presenta a continuación.

Tabla 37

Resultados del ensayo de tenacidad

		1		2		3		Promedio
		(Kg*m)	(J)	(Kg*m)	(J)	(Kg*m)	(J)	(J)
CO₂	A1	1.2	11.76	1.4	13.72	1.2	11.7	12.4
	A2	2	19.6	2.4	23.52	2.8	27.4	23.5
	A3	3.6	35.28	4.2	41.16	4	39.2	38.5
Ar- CO₂	B1	1.8	17.64	1.6	15.68	2	19.6	17.6
	B2	3	29.4	2.6	25.48	2.2	21.5	25.5
	B3	3.8	37.24	3.6	35.28	3.6	35.2	35.9
Argón	C1	0.6	5.88	0.6	5.88	0.4	3.92	5.2
	C2	1.2	11.7	1.4	13.7	1.2	11.76	12.4
	C3	2.4	23.52	2.6	25.48	3	29.4	26.1

Tabla 38

Resumen de los valores de energía absorbida

	(J)	Prom
A1	12.4	24.8
A2	23.5	
A3	38.5	
B1	17.6	26.3
B2	25.5	
B3	35.9	
C1	5.2	19.25
C2	12.4	
C3	26.1	

ANOVA de dos factores: tenacidad vs. GAS. Flujo

Fuente	GL	SC	MC	F	P
GAS	2	245,527	122,763	28,64	0,004
Flujo	2	719,927	359,963	83,97	0,001
Error	4	17,147	4,287		
Total	8	982,600			

S = 2,070 R-cuad. = 98,25% R-cuad.(ajustado) = 96,51%

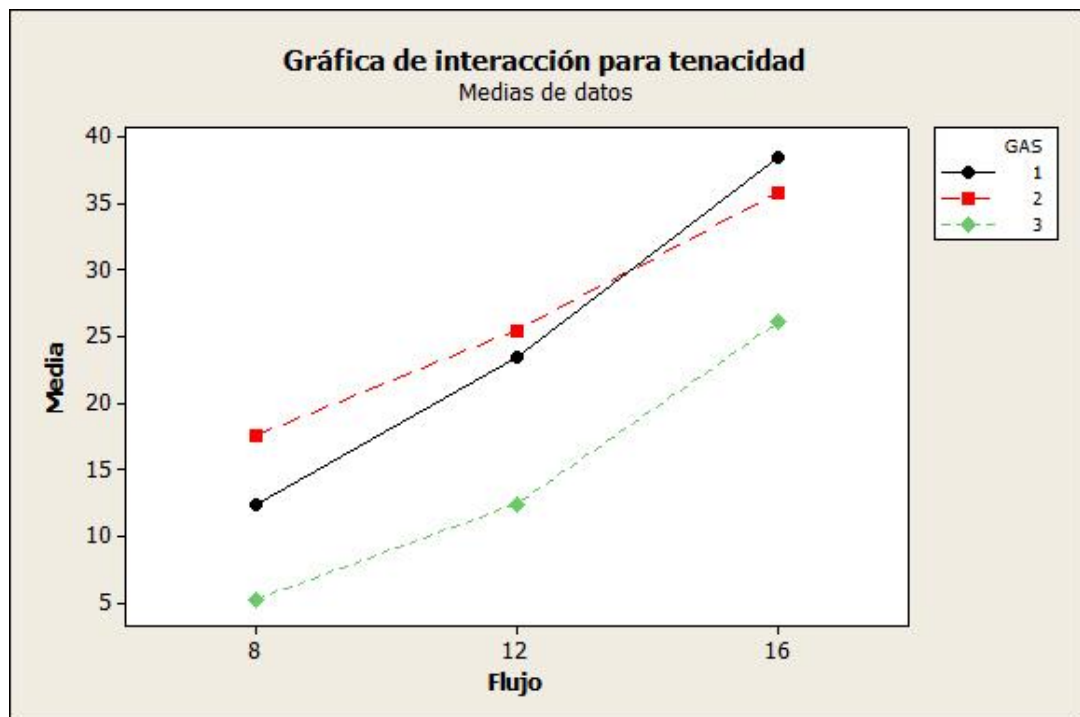


Figura 64 Gráfica de valores medios de dureza para los distintos gases de protección vs Flujo

La tenacidad presenta una correlación fuerte en función del porcentaje de flujo de gas aplicado, en los tres casos independientemente del tipo de gas a mayor flujo de gas mayor valor de tenacidad

5.1.7.3.2. ANÁLISIS

La tenacidad en el presente experimento presenta una considerable variación en función del flujo de gas de protección aumentando su valor en presencia de mayor flujo, el mayor incremento es del 67.79% en el caso particular del gas de protección CO₂, La mezcla argón CO₂ presenta el mismo comportamiento su aumento de tenacidad es del 49,02 %, los incrementos del valor de tenacidad se presentan por el aumento del 100 % de gas empleado respecto a la primera aplicación correspondiente a 8 lt/min.

El gas de protección que presenta una menor tenacidad es el gas argón con un valor máximo de 26 Joules.

La tenacidad relacionada con las otras propiedades no presenta la misma tendencia con respecto a la dureza, se caracteriza por presentar una mayor tenacidad con un bajo valor de dureza debido a que el material se vuelve dúctil, y por ende absorbe mayor cantidad de energía

5.1.7.4. DOBLADO

5.1.7.4.1. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

La región de la soldadura y la ZAT de la probeta de doblado deben estar situada en el medio de la porción doblada.

Los defectos abiertos en la ZAT no deben superar el 1/8 de pulgada medido en cualquier dirección sobre la dirección doblada.

Los defectos abiertos que se presenten en las esquinas deben ser descartados, a no ser que estos sean ocasionados por falta de fusión, inclusiones de escoria, poros, u otro defecto interno.

5.1.7.4.2. RESULTADOS

Las probetas sometidas a soldadura con gas de protección argón en el ensayo de doblado de cara y de raíz presentaron inconvenientes de falta de fusión como se aprecia en la figura 66

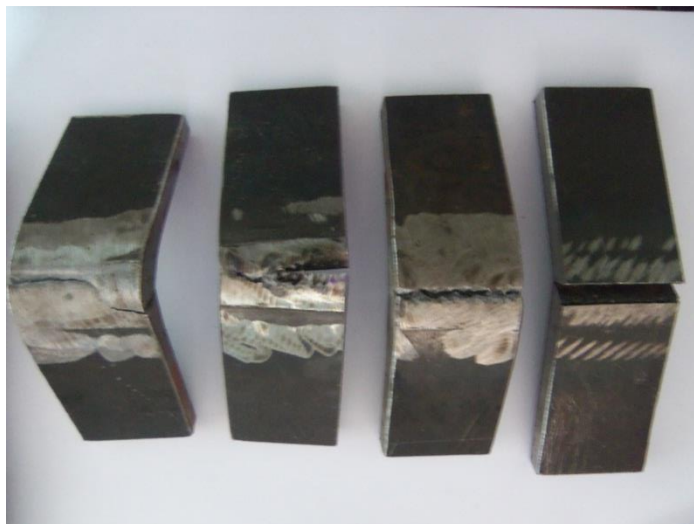


Figura 65 Defectos presentes en el ensayo de doblado en el cupón con gas de protección Argón con un flujo de 8 lt/min

La falta de fusión en las probetas sometidas a soldadura con gas de protección Argón se debe a la ineficaz protección del gas por su reducido flujo.

Las probetas sometidas a soldadura con gas de protección CO₂, y la mezcla Argón – CO₂ el doblado no presenta ninguna observación como se aprecia en la figura 67

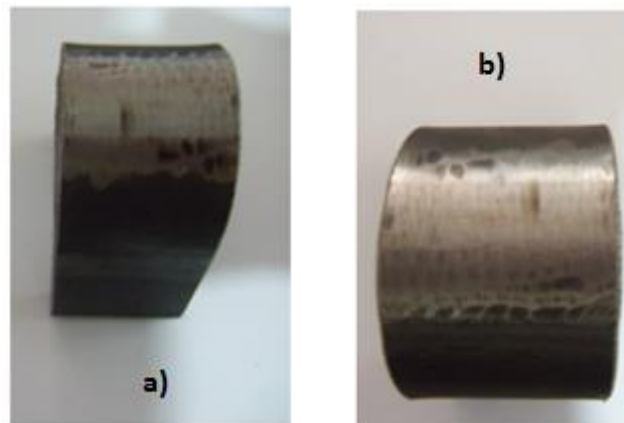


Figura 66 Resultados del ensayo de doblado a) cupón con gas de protección CO₂ a 12 lt/min b) cupón con gas de protección mezcla CO₂ – Argón a 12 lt/min

5.1.8. PRODUCTIVIDAD

Para el presente proyecto de investigación, como se encuentra expuesto en la sección 2.8, la productividad es evaluada en función de la materia prima utilizada y la mano de obra

Para poder analizar de una forma objetiva y real de la industria se establecen a continuación los costos unitarios de cada experimento para posteriormente ser aplicados a una longitud de 100 metros de soldadura.

Todos los costos se encuentran relacionados en función de los valores de tiempo de soldadura expuestos en la tabla 25.

En la tabla 39 se encuentran los costos unitarios en función de los precios de mercado obtenidos de los proveedores

Tabla 39

Costos unitarios directos

Item	Producto	Unidad	Precio
			USD
1	Alambre ER70S6	Kg	1.73
2	Gas CO ₂	m ³	6.10
3	Gas Mezcla CO ₂ - Argon	m ³	8.80
4	Gas Argon	m ³	13.25
5	Soldadora	hora	10
6	Material base	cupón	19,4
7	Mano de obra	hora	10

En la tabla 40 se encuentran los costos unitarios en función de del tiempo empleado por cada cupón

Tabla 40

Desglose costos unitarios directos

	CO ₂			Argón – CO ₂			Argón		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Tiempo (min)	7,13	7,1	7,18	7,2	6,97	7	7,08	7,02	7,13
Soldadora (\$)	1,19	1,18	1,20	1,20	1,16	1,17	1,18	1,17	1,19
Alambre (\$)	0,53	0,63	0,67	0,58	0,65	0,69	0,60	0,62	0,68
Material base (\$)	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
Mano de obra	1,21	1,21	1,22	1,22	1,18	1,19	1,20	1,19	1,21
gas de protección CO ₂ (\$)	0,35	0,52	0,70						
gas de protección mezcla (\$)				0,51	0,74	0,99			
gas de protección argón (\$)							0,75	1,12	1,51
Costo unitario directo en 525 mm	22,72	22,98	23,23	22,95	23,17	23,48	23,17	23,54	24,04

En la tabla 41 se muestra el valor al realizar 100 metros de soldadura

Tabla 41

Costo directo de soldadura en 100 metros

	CO ₂			Argón – CO ₂			Argón		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Costo por metro de soldadura	43,2	43,7	44,2	43,7	44,1	44,7	44,1	44,8	45,7
100 metros de soldadura	4328	4378	4424	4371	4413	4472	4414	4484	4578

Tabla 42

Costo indirecto de soldadura en 100 metros

	CO ₂			Argón – CO ₂			Argón		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Costo por metro de soldadura	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74
100 metros de soldadura	1274	1274	1274	1274	1274	1274	1274	1274	1274

Tabla 43

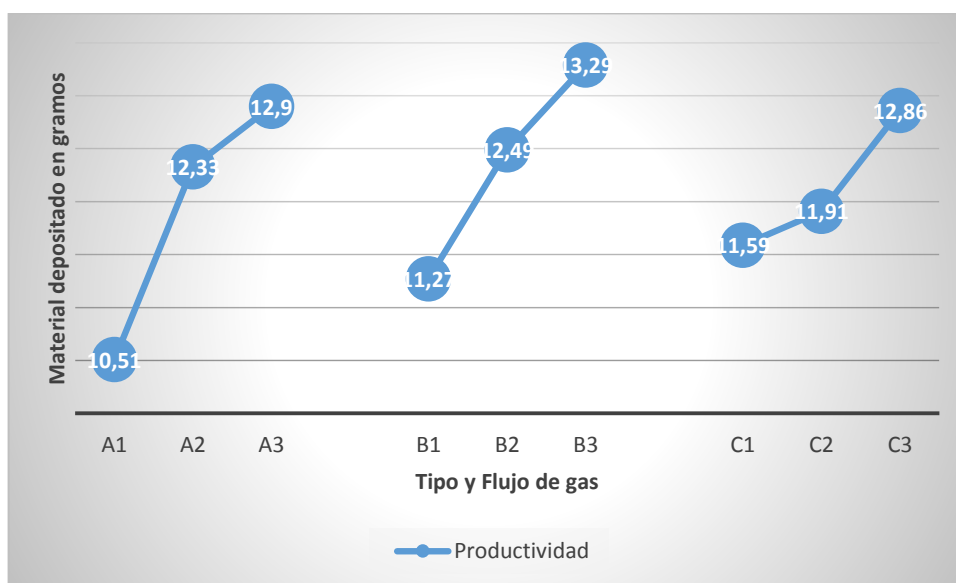
Costo total de soldadura en 100 metros

	CO ₂			Argón – CO ₂			Argón		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Costo Directo	4328	4378	4424	4371	4413	4472	4414	4484	4578
Costo Indirecto	1274	1274	1274	1274	1274	1274	1274	1274	1274
Costo total	5602	5652	5698	5645	5687	5746	5688	5758	5852

Tabla 44

Productividad en función del material depositado en 100 m

		Material depositado	Dinero	P	
		G	\$	g/\$	
CO₂	A1	58857,14	5602,18	10,51	11,91
	A2	69714,28	5651,76	12,33	
	A3	73523,81	5697,96	12,90	
Ar- CO₂	B1	63619,05	5645,18	11,27	12,35
	B2	71047,62	5686,93	12,49	
	B3	76380,95	5745,62	13,29	
Argón	C1	65904,76	5687,84	11,59	12,12
	C2	68571,43	5758,26	11,91	
	C3	75238,09	5852,16	12,86	

**Figura 67** Productividad vs gas de protección y Flujo

La productividad presenta una correlación fuerte en función del flujo, a mayor flujo de gas se deposita mayor cantidad de material, el gas que presenta la mayor productividad de los tres evaluados es la mezcla Argón – CO₂

El siguiente análisis tiene por objetivo determinar la relación que presenta producción y la productividad reflejada en el ahorro de los costos, basado en los datos obtenidos experimentalmente.

Para un valor de depósito de soldadura teórico de 30 kg el valor que deposita cada experimento por hora se encuentra en la tabla 46

Tabla 45

Material depositado por hora

		Material depositado	
		Kg/h	
CO₂	A1	2,60	2,97
	A2	3,09	
	A3	3,23	
Ar- CO₂	B1	2,78	3,14
	B2	3,21	
	B3	3,44	
Argón	C1	2,93	3,11
	C2	3,08	
	C3	3,32	

Con el valor teórico a depositar se obtiene un tiempo de soldadura detallado en la tabla 47

Tabla 46

Tiempo en depositar 30 Kg

		Tiempo	
		h	
CO₂	A1	11,54	10,18
	A2	9,70	
	A3	9,30	
Ar- CO₂	B1	10,78	9,62
	B2	9,34	
	B3	8,73	

Argón	C1	10,23	9,67
	C2	9,75	
	C3	9,03	

Con los valores de los costos de la tabla 40, generamos la tabla 48, para determinar los valores unitarios del costo por hora

Tabla 47

Costo hora de soldadura

		Tiempo	
		\$/h	
CO₂	A1	27,63	29,74
	A2	29,94	
	A3	31,64	
Ar- CO₂	B1	29,24	31,97
	B2	32,09	
	B3	34,59	
Argón	C1	31,63	35,12
	C2	35,06	
	C3	38,67	

El costo por depositar 30 Kg de material se resume en la tabla 49

Tabla 48

Costo al depositar 30 Kg de material

		Costo	Tiempo	Costo	
		\$/h	h	\$	
CO₂	A1	27,63	11,54	318,85	301,17
	A2	29,94	9,70	290,42	
	A3	31,64	9,30	294,25	
Ar- CO₂	B1	29,24	10,78	315,21	305,63
	B2	32,09	9,34	299,72	
	B3	34,59	8,73	301,97	

	C1	31,63	10,23	323,57	338,20
Argón	C2	35,06	9,75	341,84	
	C3	38,67	9,03	349,19	

El análisis realizado en los 30 kg teóricos de material depositado bajo los parámetros preestablecidos de los distintos cupones de prueba, determina que un aumento de la producción no implica necesariamente un aumento en la productividad. Los cupones sometidos a soldadura con gas de protección argón presentan la mayor tasa de producción, pero la productividad en función de los recursos utilizados se ve afectada por el alto costo de gas de protección.

Independientemente del tipo de gas empleado a mayor volumen de flujo de gas de protección se logra elevar la producción. En tema costos el proceso ideal son los cupones sometidos a soldadura con gas de protección mezcla argón – CO₂ con una concentración 80% - 20% respectivamente, se aumenta la producción y es económicamente viable.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS ECONÓMICO

Debido a la naturaleza del presente proyecto, su carácter de investigación lo convierten en un proyecto sin fines de lucro por consiguiente no presenta ingresos monetarios. Los resultados obtenidos a partir de la inversión de la empresa privada y la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se transforman en conocimiento a disponibilidad de la sociedad para un firme desarrollo de la industria Ecuatoriana.

6.1. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

Los resultados obtenidos a partir de la inversión de la empresa privada y la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se transforman en conocimiento a disponibilidad de la sociedad para un firme desarrollo de la industria Ecuatoriana. Los costos que se incurrieron en la elaboración del presente proyecto se encuentran resumidos en la tabla 50.

Tabla 49

Costo total del proyecto

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Valor		
Alambre ER70S-6	Kilo	45	1,73	77,85	834,55	Empresa privada
Cargas Dióxido de Carbono	m3	18	6,1	109,8		
Cargas Aga mix 20	m4	18	8,8	158,4		
Cargas Argón	m5	18	13,25	238,5		
Asesoría linde	hora	10	25	250		
Uso de Laboratorios ESPE	hora	50	20	1000	2000	ESPE
Asesoría ESPE	hora	40	25	1000		
Plancha acero ASTM A36	unidad	1	175	175	2175	Autor del proyecto
Mano de obra	hora	200	10	2000		
				50090		

6.2. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS JUNTAS

6.2.1. COSTOS DIRECTOS

Costos directos son aquellos costos que se encuentran involucrados directamente con el producto final, siendo estos insumos, mano de obra. Los costos directos se muestran en la tabla 40.

6.2.2. COSTOS INDIRECTOS

Se denomina costo indirecto a los bienes o servicios empleados en la elaboración del producto final pero que no están relacionados de una forma directa los mismos que se detallan en la tabla 51.

Tabla 50

Costos Indirectos

Grata	5
Discos de desbaste	14
Discos de corte	7
Boquilla y Tobera equipo plasma	30
gafas de protección	3
Guantes	1,25
Total	60,25
cada cupón de soldadura	6,69

6.2.3. COSTO DE CADA JUNTA ELABORADA

El costo total por cada junta elaborada se encuentra resumido en la tabla 52

Tabla 51

Costo Total de las juntas elaboradas

	CO ₂			Argón – CO ₂			Argón		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Costo Directo	22,72	22,98	23,23	22,95	23,17	23,48	23,17	23,54	24,04
Costo Indirecto	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69
Costo Total	29,41	29,67	29,92	29,64	29,86	30,17	29,86	30,23	30,73

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

Se realizó el análisis con los tres tipos de gases de protección: argón, mezcla argón - CO₂, y CO₂. El gas de protección presenta una influencia fuerte, afectando de forma directa a la configuración geométrica en las dimensiones y perfil del cordón de soldadura. En las propiedades mecánicas el valor obtenido en los distintos ensayos presenta una modificación en presencia del aumento del flujo de gas protección, siendo estos incrementos graduales y correspondientes al 50 %, y 100% respecto al primer flujo de 8 lt/min

Se elaboró el diseño del WPS en función de pruebas experimentales de calibración de los equipos para obtener los valores reales de operación, para garantizar la confiabilidad y repetibilidad de las soldaduras ejecutadas

Se diseñó el cuadrado latino en base a los tres tipos de gases de protección los mismos que se convierten en factores principales de bloque, los factores de variable deben tener el mismo nivel del factor de bloque tres flujos para el mismo tipo de gas, la selección de las variables principales de experimentación aislando las variables de ruido garantizan que al final del experimento las variables presenten una correlación adecuada.

Los cupones sometidos a soldadura con gas de protección mezcla Argón – CO₂, en proporción 80% - 20% respectivamente presenta el menor número de defectos en la inspección visual, su desempeño en las propiedades mecánicas es aceptable excepto en el ensayo de tensión que ninguno llega al valor mínimo que exige la especificación, además presenta la mayor productividad de los tres gases aplicados

Al aumentar el flujo de gas se obtiene una mayor tasa de deposición de material, esto incrementa la producción del proceso permitiendo obtener

velocidades más altas de soldeo, ejecutando una misma junta de similar configuración en un menor tiempo. En los tres casos al analizar de forma individual al aumentar el flujo de gas aumenta la productividad de la materia prima, para el caso de análisis global un aumento de la producción no garantiza un aumento en la productividad debido a los altos del gas de protección

El desarrollo del presente trabajo de investigación afianzó mis conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera, afirmando que me encuentro preparado con las suficientes herramientas para los retos de la vida profesional.

7.2. RECOMENDACIONES

Para tener una idea más amplia del presente proyecto en función de los resultados obtenidos, se debe incluir en el análisis como factor adicional de variable: la velocidad de avance de soldadura.

Al existir un factor que pueden cambiar para que la máquina soldadora se auto regule y permita mantener un arco estable, se recomienda que los valores sean medidos de forma continua para tener la certeza de que los mismos son correctos, el valor de la intensidad de corriente en la soldadora debe ser evaluado en función del tiempo para garantizar que el valor de alambre suministrado sea el mismo.

En la malla curricular de la carrera se debe incluir el tema de diseño de experimentos debido a su gran importancia en el correcto planteamiento, para la solución eficiente a una problemática que no se conoce su comportamiento.

En las prácticas presentes en cada uno de los laboratorios de la carrera se debe dejar que cada estudiante desarrolle a su criterio la solución a los problemas planteados, poniendo en evidencia su verdadero potencial e iniciativa.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. (2009). *ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. ASTM.
- American Society for Testing and Materials. (s.f.). *ASTM A36/A36M - 12 Standard Specification for Carbon Structural Steel*. ASTM.
- Callister, W. D. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverté S.A.
- Catálogo AGA
- Catalogo DIPAC 2015
- FOSCA CARLOS, D. (2005). *Introducción a la METALURGÍA DE LA SOLDADURA 5ta. Edición*. Lima.
- Grong O y Christensen, N. (1983). *Factors controlling GMAW weld metal*. Journal Metall.
- HORWARD CARY, B. (1979). *MODERN WELDING TECHNOLOGY*. Prentice hall.
- NARANJO, C. R. (2008). *tecnología de la Soldadura*. Sangolqui.
- R. Rowel, L. J. (2009). *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG)*. España : Paraninfo.
- S. Kou John Willey, J. W. (2003). *Welding Metallurgy*. USA.
- Saunders, H. (1997). *MIG/MAG Welding Guide, For Gas Metal Arc Welding*. Cleveland Ohio USA.
- Society(AWS), A. W. (2010). *AWSD1.1/D1.1M:2010*. Estados Unidos de america .
- technology, I. o. (2006). australia.
- Vaydia, V. (2002). *Shielding gas mixtures for semiautomatic welds* . *Welding Journal*.
- Varios. (1993). *ASM Handbook. Vol 6 Brazing and Soldering*.

ANEXO 1 WPS ESTABLECIDO

ANEXO 2 HOJAS DE DATOS