



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: ESTUDIO DE LAS TRANSFORMACIONES  
METALGRÁFICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA  
ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC) DESPUÉS DEL  
PROCESO DE SOLDADURA EN LOS ACEROS ASTM A588 Y  
A36.**

**AUTOR: TOBAR CASTRO, ESTEFANÍA ALEJANDRA**

**DIRECTOR: ING. NARANJO, CARLOS.**

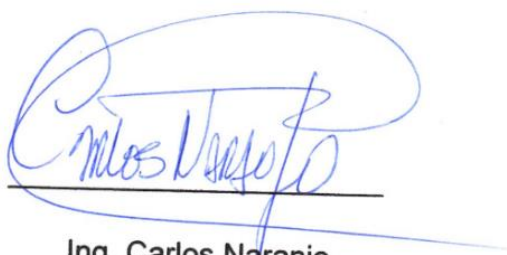
**CODIRECTOR: ING. SÁNCHEZ, XAVIER.**

**SANGOLQUÍ**

**2015**

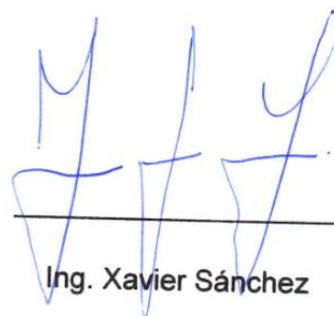
**CERTIFICADO**

El proyecto **“ESTUDIO DE LAS TRANSFORMACIONES METALGRÁFICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC) DESPÚES DEL PROCESO DE SOLDADURA EN LOS ACEROS ASTM A588 Y A36.”** Fue realizado en su totalidad por la señorita Estefanía Alejandra Tobar Castro, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniera Mecánica.



Ing. Carlos Naranjo

**DIRECTOR**



Ing. Xavier Sánchez

**CODIRECTOR**

Sangolquí, 17 de abril de 2015

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD


Yo, Estefanía Alejandra Tobar Castro

### DECLARO QUE:

El proyecto de grado titulado **“ESTUDIO DE LAS TRANSFORMACIONES METALGRÁFICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC) DESPÚES DEL PROCESO DE SOLDADURA EN LOS ACEROS ASTM A588 Y A36.”** Ha sido desarrollado en base a una investigación amplia, respetando los derechos de terceros, conforme a las citas y notas que constan al final de cada párrafo correspondiente, cuyas fuentes se incorporan a la bibliografía.

Consecuentemente. Este trabajo es mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en misión.



Estefanía Alejandra Tobar Castro

CI: 1003568910

Sangolquí, 17 de abril de 2015

## AUTORIZACIÓN

Yo, Estefanía Alejandra Tobar Castro

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado **“ESTUDIO DE LAS TRANSFORMACIONES METALGRÁFICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC) DESPÚES DEL PROCESO DE SOLDADURA EN LOS ACEROS ASTM A588 Y A36.”** Cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad de autoría.



Estefanía Alejandra Tobar Castro

CI: 1003568910

Sangolquí, 17 de abril de 2015

## DEDICATORIA

*A Dios, porque todos los días de mi vida y cuando las cosas se han puesto más oscuras jamás he dejado de sentir su presencia.*

*A mi mami, porque eres la mejor mamá y amiga que alguien puede tener gracias por apoyarme en todo sentido, en cada alegría o caída siempre estás tú.*

*A mi papi por todo tu amor y sacrificio. Gracias por tu apoyo, tu cariño y confianza a lo largo de esta etapa y de mi vida.*

*A Nicole por ser mi compañía, mi amiga y la que me da ánimos siempre que lo necesito. Gracias por estar ahí.*

**Estefanía Alejandra Tobar Castro**

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha dado y por la oportunidad de llegar hasta este punto en mi vida.*

*A mis padres por todo su sacrificio, su amor y su apoyo incondicional para lograr esta meta en mi vida.*

*A mi hermana por ser mi compañía y la que me da ánimo cuando más lo necesito.*

*A David por ayudarme, acompañarme y alegrar mis días.*

*A mis directores de proyecto, Ingeniero Carlos Naranjo e Ingeniero Xavier Sánchez, por guiarme y compartir conmigo sus conocimientos y experiencias tanto en este proyecto como en las aulas de clase.*

*A la “Fábrica de Municiones Santa Bárbara”, en especial al Ingeniero Aníbal López, quien siempre estuvo presto a brindarme su ayuda.*

*Finalmente agradezco a mis maestros y amigos quienes de una u otra forma compartieron conmigo a lo largo de mi vida universitaria y para la culminación de mi carrera.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO .....	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	vi
RESUMEN .....	xx
ABSTRACT .....	xxi
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.3 OBJETIVO GENERAL .....	3
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.5 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.6 ALCANCE .....	5
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>6</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1 RESEÑA HISTÓRICA DEL ACERO .....	6
2.2 ACERO ESTRUCTURAL .....	9
2.2.1 VENTAJAS DEL ACERO ESTRUCTURAL .....	9
2.2.2 DESIGNACIÓN ASTM PARA ACEROS. ....	10
2.3 ACERO ASTM A36 .....	11
2.4 ACERO ASTM A588 .....	13
2.5 PRINCIPALES ALEANTES DE LOS ACEROS UTILIZADOS. ....	14
2.5.1 CARBONO. ....	15
2.5.2 MANGANESO .....	15
2.5.3 FÓSFORO .....	16
2.5.4 SILICIO .....	16

2.5.5	AZUFRE .....	16
2.5.6	NÍQUEL .....	17
2.5.7	CROMO.....	17
2.5.8	MOLIBDENO .....	18
2.5.9	VANADIO .....	19
2.6	ENSAYOS .....	19
2.6.1	ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	19
2.6.1.1	ENSAYO DE TENSIÓN.....	19
2.6.1.2	ENSAYO DE IMPACTO O TENACIDAD .....	21
2.6.1.3	ENSAYO DE DOBLADO .....	22
2.6.1.4	ENSAYO DE METALOGRAFÍA.....	23
2.6.1.5	ENSAYO DE DUREZA.....	24
2.6.1.5.1	DUREZA ROCKWELL.....	25
2.6.1.5.2	DUREZA VICKERS .....	26
2.6.2	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	27
2.6.2.1	INSPECCIÓN VISUAL.....	27
2.6.2.2	ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES.....	28
2.7	SOLDADURA: CONCEPTOS BÁSICOS, DISEÑO Y CALIFICACIÓN.....	30
2.7.1	LA SOLDADURA COMO PROCESO TÉRMICO.....	30
2.7.2	SOLDADURA FCAW.....	32
2.8	DISEÑO Y CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO .....	34
2.8.1	ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	34
2.8.1.1	CONTENIDO DEL DOCUMENTO.....	35
2.8.2	REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA .....	35
2.8.3	ENSAMBLES DE PRUEBA Y ESPECÍMENES.....	36
2.9	METALURGIA DE LA SOLDADURA.....	37
2.9.1	PARÁMETROS IMPORTANTES EN LA SOLDADURA.....	37
2.9.1.1	CALOR APORTADO .....	37
2.9.1.2	ABSORCIÓN DE ENERGÍA .....	38



2.9.1.3	TEMPERATURA PICO .....	38
2.9.1.4	VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO .....	39
2.9.1.5	CORRIENTE .....	39
2.9.1.6	POLARIDAD.....	40
2.9.1.7	VOLTAJE Y LONGITUD DE ARCO .....	40
2.9.1.8	VELOCIDAD DE AVANCE .....	42
2.9.1.9	EXTENSIÓN DEL ELECTRODO .....	43
2.9.2	EL ACERO Y SUS TRANSFORMACIONES.....	44
2.9.2.1	MICROCONSTITUYENTES DEL ACERO.....	44
2.9.2.1.1	FERRITA .....	44
2.9.2.1.2	CEMENTITA.....	45
2.9.2.1.3	PERLITA.....	46
2.9.2.1.4	AUSTENITA .....	47
2.9.2.1.5	MARTENSITA.....	49
2.9.2.1.6	BAINITA.....	49
2.9.2.2	DIAGRAMA HIERRO - CARBONO.....	51
2.9.3	ZONA AFECTADA POR EL CALOR.....	52
2.9.3.1	SUBZONAS DEL CICLO TÉRMICO DE LA SOLDADURA. ....	54
2.9.3.2	DIAGRAMAS TTT.....	55
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>57</b>
<b>PARÁMETROS DE SELECCIÓN, EJECUCIÓN DE LA SOLDADURA Y ENSAYOS .....</b>		<b>57</b>
3.1	PARÁMETROS DE SELECCIÓN PARA EL WPS. ....	57
3.1.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE PROCESO DE SOLDADURA. ....	57
3.1.2	SELECCIÓN DEL TIPO DE PENETRACIÓN EN LA JUNTA. ..	58
3.1.3	SELECCIÓN DEL TIPO DE JUNTA.....	59
3.2	ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA .....	59
3.3	DISEÑO DEL CUPÓN DE SOLDADURA. ....	60
3.4	PREPARACIÓN DE CUPONES DE SOLDADURA. ....	60
3.4.1	VERIFICACIÓN DEL MATERIAL.....	60

3.4.2	PREPARACIÓN DE LAS JUNTAS .....	61
3.5	EJECUCIÓN DE LA SOLDADURA.....	63
3.5.1	ASPECTOS ANTES DE LA EJECUCIÓN DE LA SOLDADURA.	63
3.5.2	ASPECTOS DURANTE LA SOLDADURA.....	67
3.5.3	ASPECTOS DESPUÉS DE LA SOLDADURA DE CUPONES....	70
3.6	INSPECCIÓN VISUAL Y LÍQUIDOS PENETRANTES. ....	71
3.6.1	INSPECCIÓN VISUAL.....	71
3.6.2	LÍQUIDOS PENETRANTES .....	72
3.6.2.1	PRODUCTOS UTILIZADOS .....	73
3.6.2.2	EJECUCIÓN DEL ENSAYO .....	73
3.6.2.3	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN .....	75
3.6.2.4	RESULTADOS. ....	75
3.7	CORTE EN FRÍO DE PROBETAS.....	76
3.8	PREPARACIÓN DE PROBETAS. ....	77
3.9	ENSAYO DE DOBLADO .....	78
3.9.1	DIMENSIONES DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE DOBLADO.....	78
3.9.2	PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE DOBLADO.....	79
3.9.3	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA ENSAYO DE DOBLADO.....	80
3.10	ENSAYO DE TRACCIÓN. ....	81
3.10.1	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	81
3.10.2	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA EL ENSAYO.....	82
3.11	ENSAYOS DE IMPACTO .....	82
3.11.1	PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE IMPACTO.....	82
3.11.2	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA ENSAYO DE IMPACTO. ....	84
3.12	ENSAYOS DE METALOGRAFÍA Y MICRODUREZA .....	84
3.12.1	PROCEDIMIENTO PARA ENSAYO DE METALOGRAFÍA.....	85

<b>CAPÍTULO IV</b> .....	88
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	88
4.1 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN. ....	88
4.1.1 RESULTADOS .....	88
4.1.2 ANÁLISIS .....	90
4.2 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DOBLADO.....	93
4.2.1 RESULTADOS .....	93
4.2.2 ANÁLISIS .....	99
4.3 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE IMPACTO.....	100
4.3.1 RESULTADOS .....	100
4.3.2 ANÁLISIS .....	103
4.4 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE METALOGRAFÍA .....	104
4.4.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	104
4.5 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE MICRODUREZA.....	110
4.5.1 RESULTADOS .....	110
4.5.2 ANÁLISIS .....	111
<b>CAPÍTULO V</b> .....	114
<b>ANÁLISIS FINANCIERO</b> .....	114
5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS COSTOS.....	114
5.2 COSTOS DE MATERIAL BASE Y MATERIAL DE APORTE.....	114
5.2.1 MATERIAL BASE .....	114
5.2.2 MATERIAL DE APORTE.....	115
5.2.3 COSTOS TOTALES DE MATERIAL.....	116
5.3 COSTOS DE INSUMOS.....	116
5.4 COSTOS DE MANO DE OBRA.....	117
5.4.1 COSTOS POR SOLDADURA.....	118
5.4.2 COSTOS POR PREPARACIÓN DE JUNTAS Y ADECUACIÓN DE CUPONES.....	118
5.4.3 COSTOS DE ASESORAMIENTO Y LABOR ESTUDIANTIL. ....	119
5.5 COSTOS TOTALES DE MANO DE OBRA.....	119
5.6 COSTOS DE SERVICIOS.....	119

5.6.1	COSTOS DE SERVICIOS DIRECTOS.....	120
5.6.2	COSTOS DE SERVICIOS INDIRECTOS. ....	120
5.7	COSTOS TOTALES FINALES.....	121
	<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>123</b>
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>123</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	123
6.2	RECOMENDACIONES.....	124
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>126</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>131</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. No. 1	Ilustración antigua de la forja del hierro. ....	7
Figura. No. 2	Horno de Bessemer.....	8
Figura. No. 3	Esquema de máquina universal para ensayo de tensión....	20
Figura. No. 4	Esquema de probeta para ensayo de tensión. ....	20
Figura. No. 5	Curva esfuerzo – deformación unitaria para un acero. ....	21
Figura. No. 6	Esquema de un ensayo de impacto Charpy y tipos de probetas. ....	22
Figura. No. 7	Probeta ensayada para doblado.....	23
Figura. No. 8	Esquema de medición de la dureza Rockwell .....	25
Figura. No. 9	Medición de dureza Vickers.....	26
Figura. No. 10	Forma de aplicación de líquidos penetrantes según la norma ASTM E 1417.....	29
Figura. No. 11	Pieza ensayada con líquidos penetrantes .....	29
Figura. No. 12	Proceso térmico de soldadura.....	31
Figura. No. 13	Zonas formadas por la soldadura. ....	32
Figura. No. 14	Procedimiento de soldadura FCAW.....	33
Figura. No. 15	Configuración de equipo para soldar con FCAW.....	34
Figura. No. 16	Dimensiones del cupón de soldadura.....	36
Figura. No. 17	Longitud de arco de soldadura. ....	41
Figura. No. 18	Extensión del electrodo en una pistola para soldar.....	43
Figura. No. 19	Ferrita en acero con bajo contenido de carbono (100x).....	45
Figura. No. 20	Cementita (Zonas oscuras), perlita (Zonas claras). ....	46
Figura. No. 21	Microestructura de perlita. ....	47
Figura. No. 22	Microestructura de la austenita.....	48
Figura. No. 23	Agujas de martensita (negras) en una matriz de austenita retenida (blanca).....	49
Figura. No. 24	Bainita superior (Áreas oscuras) 1500x.....	50
Figura. No. 25	Agujas oscuras de bainita inferior en matriz de martensita (500x) .....	51
Figura. No. 26	Diagrama Hierro – Carbono.....	52

Figura. No. 27	Transformaciones del acero según la temperatura .....	53
Figura. No. 28	Transformaciones de grano a lo largo de la junta soldada.	54
Figura. No. 29	Sub-zonas de la ZAC, en múltiples pases. ....	54
Figura. No. 30	Diagrama TTT para el acero ASTM A588.....	56
Figura. No. 31	Diagrama TTT para el acero ASTM A36.....	56
Figura. No. 32	Junta tipo CJP. ....	58
Figura. No. 33	Junta tipo PJP. ....	59
Figura. No. 34	Dimensiones de la junta a preparar en los cupones. ....	61
Figura. No. 35	Junta de soldadura armada con todas sus partes. ....	62
Figura. No. 36	Comprobación de la separación entre placas y ángulo de abertura de la junta. ....	63
Figura. No. 37	Máquina soldadora Millermatic 300. ....	64
Figura. No. 38	A.- Cupón de pruebas. B.- Medición de Parámetros y tiempos de ejecución.....	67
Figura. No. 39	Control de tiempos de soldados con marcas transversales en cupón. ....	68
Figura. No. 40	A. Pre calentamiento de cupones. B. Controles de temperatura de pre calentamiento. ....	69
Figura. No. 41	Medición del tiempo de ejecución de cada cordón de soldadura. ....	69
Figura. No. 42	Cálculo del calor total aportado en la junta. ....	70
Figura. No. 43	Retiro de placa de respaldo y puentes en juntas soldadas.....	71
Figura. No. 44	Cupones de soldadura para inspección visual A,B,C Acero ASTM A588 12, 20 y 30 mm de espesor respectivamente, D y E Acero ASTM A36, 12 y 24 mm. ...	72
Figura. No. 45	Kit de tintas penetrantes. A. Limpiador B. Penetrante C. Revelador. ....	73
Figura. No. 46	Limpieza de cupones de soldadura. ....	74
Figura. No. 47	A. Cupón aplicado penetrante. B. Limpieza de penetrante.....	74
Figura. No. 48	A. Aplicación del revelador. B Cupón listo para	

	inspeccionar. ....	75
Figura. No. 49	Porosidad en cupón de acero ASTM A36 / 12 mm. ....	76
Figura. No. 50	Corte de cupón de soldadura mediante chorro de agua. ....	77
Figura. No. 51	Cupón de soldadura una vez realizado los cortes. ....	77
Figura. No. 52	Rebajada de sobre - monta a probetas. ....	78
Figura. No. 53	Especificaciones de dimensiones de probetas para ensayo de doblado lateral. ....	79
Figura. No. 54	Probeta sometida a ensayo de doblado.....	80
Figura. No. 55	Probetas antes de ser sometidas a ensayo de tracción. ....	81
Figura. No. 56	Caída del péndulo para golpear a la probeta. ....	83
Figura. No. 57	Probetas sumergidas en solución de CO <sub>2</sub> sólido con alcohol industrial. ....	83
Figura. No. 58	Lijado manual de probetas para metalografía.....	85
Figura. No. 59	A. Preparación de Alúmina. B Pulido fino de probetas.....	86
Figura. No. 60	A. Secado de probetas. B Probeta para metalografía, pulida tipo espejo .....	86
Figura. No. 61	Probeta siendo atacada con Nital al 2%. ....	87
Figura. No. 62	Probetas atacadas con Nital al 2%. A. Acero ASTM A588 B. Acero ASTM A36 .....	87
Figura. No. 63	Probetas ensayadas a tracción de acero ASTM A36.....	89
Figura. No. 64	Probetas ensayadas a tracción de acero ASTM A588.....	89
Figura. No. 65	Espesor de material vs Resistencia a la tracción para acero ASTM A36.....	91
Figura. No. 66	Espesor de material vs Resistencia a la tracción para acero ASTM A588.....	91
Figura. No. 67	Probetas de ensayos de tracción, espesores 12 milímetros. A. Vista Lateral. B. Vista Frontal.....	92
Figura. No. 68	Probetas de ensayos de tracción, aceros ASTM A36 y A588. A. Vista Frontal. B. Vista Lateral. ....	93
Figura. No. 69	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A36 12 milímetros. Vista lateral. ....	94
Figura. No. 70	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A36	

	12 milímetros. Vista frontal. ....	94
Figura. No. 71	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A36 24 milímetros. Vista lateral. ....	95
Figura. No. 72	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A36 24 milímetros. Vista frontal. ....	95
Figura. No. 73	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588 12 milímetros. Vista lateral. ....	96
Figura. No. 74	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588 12 milímetros. Vista frontal. ....	96
Figura. No. 75	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588 20 milímetros. Vista Lateral. ....	97
Figura. No. 76	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588 20 milímetros. Vista frontal. ....	97
Figura. No. 77	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588 30 milímetros. Vista lateral. ....	98
Figura. No. 78	Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588 30 milímetros. Vista frontal. ....	98
Figura. No. 79	Espesor de material vs Resistencia al impacto para acero ASTM A36. ....	101
Figura. No. 80	Espesor de material vs Resistencia al impacto para acero ASTM A588. ....	101
Figura. No. 81	Guía para estimar el porcentaje de absorción de energía, según la apariencia de la fractura. ....	102
Figura. No. 82	Probetas de impacto acero A36. A. 12 mm B. 24 mm. ...	102
Figura. No. 83	Probetas de impacto acero A588. A. 12 mm. B. 20 mm. C. 30 mm. ....	103
Figura. No. 84	Metalografías del acero A36. 1) Zona de límite de fusión (material de aporte y material base). 2) Zona de grano grueso. 3) Zona de grano fino 4) Transición, recristalización de grano fino a material base. ....	105
Figura. No. 85	1. Bainita hallada en la parte superior de la junta,	



	entre el material de aporte y el límite de fusión.	
	Acero ASTM A36 / 12 mm. 2. Metalografía de Bainita Superior.....	105
Figura. No. 86	Inclusiones de SiO <sub>2</sub> en metalografías. Acero A36 12mm y 24mm. ....	107
Figura. No. 87	Inclusiones de SiO <sub>2</sub> . Ampliación 1000 X. ....	107
Figura. No. 88.	Metalografías del acero A588. 1) Zona de límite de fusión (material de aporte y material base). 2) Zona de grano grueso. 3) Zona de grano fino 4) Material base. ....	108
Figura. No. 89	Perlita fina hallada en la parte superior de la junta, entre el material de aporte y el límite de fusión. Acero ASTM A588 / 12 mm y 20 mm. 2. Metalografía de Perlita gruesa.....	109
Figura. No. 90	Inclusiones de SiO <sub>2</sub> en probetas de acero A588 /12mm, 20mm y 30 mm.....	109
Figura. No. 91	Distribuciones de indentaciones en la junta soldada....	111
Figura. No. 92	Dureza por zonas para acero ASTM A588 y A36. ....	112
Figura. No. 93	Porcentaje de financiamiento del proyecto. ....	122

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. No. 1	Propiedades de tensión mínimas requeridas para un acero ASTM A36.....	12
Tabla. No. 2	Requerimientos químicos del acero A36.....	12
Tabla. No. 3	Propiedades de tensión mínimas requeridas para un acero ASTM A588.....	13
Tabla. No. 4	Requerimientos químicos del acero A588.....	14
Tabla. No. 5	Parámetros de soldadura para efectuar el procedimiento...	65
Tabla. No. 6	Dimensiones de secciones transversales de especímenes.	88
Tabla. No. 7	Resultados de los ensayos de tracción.....	90
Tabla. No. 8	Reducción de área en el ensayo de tracción .....	99
Tabla. No. 9	Resultados de los ensayos de impacto.....	100
Tabla. No. 10	Valores promedios de dureza por zonas para acero ASTM A588 y A36.....	111
Tabla. No. 11	Costos de acero ASTM A36 utilizado en el proyecto. ....	114
Tabla. No. 12	Costos del acero ASTM A588 utilizado en el proyecto.....	115
Tabla. No. 13	Costos totales del material base .....	115
Tabla. No. 14	Costo total del Material del Aporte. ....	116
Tabla. No. 15	Costo total de materiales. ....	116
Tabla. No. 16	Costos totales de los insumos utilizados. ....	117
Tabla. No. 17	Costos de mano de obra del proceso de soldadura.....	118
Tabla. No. 18	Costos de mano de obra de preparación de juntas y cupones. ....	118
Tabla. No. 19	Costos de Labor estudiantil y Asesoramiento del Proyecto.....	119
Tabla. No. 20	Costos totales de mano de obra. ....	119
Tabla. No. 21	Costos de servicios directos. ....	120
Tabla. No. 22	Costos de servicios indirectos. ....	120
Tabla. No. 23	Detalle General Final de gastos del proyecto. ....	121
Tabla. No. 24	Financiamiento del proyecto .....	122

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Especificaciones del Procedimiento de soldadura.....	132
Anexo 2: Plano de la distribución de especímenes en los cupones de soldadura.....	133
Anexo 3: Certificados de calidad de los aceros ASTM A36 Y A588.....	134
Anexo 4: Especificaciones técnicas de máquina soldadora Millermatic 300.....	135
Anexo 5: Levantamiento de datos de las variables durante el proceso de soldadura.....	136
Anexo 6: Informe técnico de ensayo de líquidos penetrantes.....	137
Anexo 7: Plano de ubicación y dimensiones para probetas de ensayo de impacto.....	138
Anexo 8: Informe técnico de resultados de ensayo de tracción.....	139
Anexo 9: Informe técnico de resultados de ensayo de doblado lateral.....	140
Anexo 10: Informe técnico de resultados de ensayo de impacto.....	141

## RESUMEN

Esta investigación trata de determinar cómo se afectan las propiedades mecánicas y la estructura metalográfica en juntas soldadas con FCAW, de acero ASTM A36 (12 mm y 24 mm) y ASTM A588 (12 mm, 20 mm y 30 mm de espesor). Utilizando un procedimiento de soldadura basado en la norma AWS D1.5. Una vez soldadas las juntas, se realizó la inspección visual y ensayo de líquidos penetrantes, descartando discontinuidades superficiales. Seguido a esto se realizó las probetas para cada ensayo mediante corte por chorro de agua, evitando la adición de más calor. Los ensayos realizados fueron resistencia a la tracción (ASTM E8), doblado lateral para evaluar la ductilidad de la junta soldada (ASTM E190), ensayo de impacto tipo Charpy con muesca en "V" (ASTM E23) para evaluar la tenacidad. Así como análisis metalográfico y micro dureza a través de la junta soldada, para descartar la formación de microestructuras adversas para la soldadura. Se encontró que aportando una misma cantidad de calor, indistintamente del material y espesor, el acero A36 tiene una ductilidad ligeramente mayor al A588. El ensayo de impacto reveló que el acero A588 presenta un 16.38% más tenacidad que el A36. Cuanto a la micro dureza esta tiene su valor más alto para los dos aceros en la zona del límite de fusión, siendo el acero A588 un 17.22 % más duro en esta zona que el A36. Adicionalmente las matrices encontradas en cada material son de tipo ferrítica – perlítica, con particulares formaciones de bainita para el acero A36 (12 mm.) y perlita fina para el A588 (12 y 20 mm) en la parte superior del cordón. Se verificó que el procedimiento de soldadura cumple con las especificaciones de la norma AWS D1.5 y es aplicable a los dos aceros seleccionados.

### Palabras Clave-

- **Análisis Metalográfico.**
- **Variación de propiedades mecánicas.**
- **Comportamiento de aceros en una junta de soldadura.**

## ABSTRACT

This research is about how much the mechanical properties and metallographic structure in welded joints are affected. Using a FCAW process in ASTM A36 steel (12 mm and 24 mm) and ASTM A588 (12 mm, 20 mm and 30 mm thickness) with a welding process specification based on the standard AWS D1.5. After to weld the joints, the next step was to discard surface discontinuities in test assemblies using the visual inspection and liquid penetrant test (PT). Following this, the specimens for each test were done by water jet cutting, avoiding the addition of more heat. The mechanical tests performed were: tensile strength (ASTM E8), lateral bending to evaluate the ductility of welded joints (ASTM E190) and Charpy "V" notch (ASTM E23) to evaluate the toughness. Additionally were done Micro hardness and metallographic analysis through the welded joint, to confirm the no formation of undesirable microstructures in welding. The results obtained showed that providing the same amount of heat, regardless of the material and thickness, the A36 steel has a slightly higher ductility than A588 steel. For the Impact test the A588 steel has 16.38% more toughness than A36 steel. In the micro hardness analysis was found that the highest value for both steels was in the fusion limit area, the A588 steel was 20.80% harder in this area than A36 steel. Additionally the global structure for both materials was a ferritic – pearlitic matrix, with formations of bainite in the A36 steel (12 mm.) And fine pearlite in A588 steel (12 and 20 mm) on the top of the welded joint because this zone is exposure to the environment during the solidification process after the welding. Therefore the welding process specifications were verified according AWS D1.5 standard and is applicable to both steels mentioned.

### ***Keywords:***

- **Metallographic analysis.**
- **Variation of mechanical properties.**
- **ASTM A36 and A588 steel behavior in a weld.**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Con la Revolución Industrial se dieron muchos cambios tanto económicos, culturales, tecnológicos e industriales en el mundo, a partir de este punto se lograron grandes avances a nivel industrial, entre ellos la utilización del acero para varias construcciones (Catherine, 2007)

Dentro de estas construcciones se encuentran los puentes de estructura metálica, de los cuales sobresalen algunas ventajas como su facilidad de montaje, su peso ligero, la utilización de menos material para su construcción, en comparación con puentes de hormigón armado. Sin embargo al mismo tiempo presentan desventajas debido a la naturaleza del acero, como la corrosión, el costo de mantenimiento, el alto control que se debe dar al manejo de sus uniones, por nombrar algunas.

Con el tiempo y los avances tecnológicos, uniones como remaches (los cuales eran comúnmente utilizados en construcciones hasta los años 60) han sido reemplazadas por la soldadura, la cual permite mejorar tiempos de producción, montaje, mantenimiento, etc. (Takeuchi, 2006)

Generalmente en el proceso de soldadura son aspectos importantes la preparación del material base, la determinación de los parámetros de soldadura y posterior a esto la verificación de la calidad de la pieza o junta soldada, pero muchas veces se pasa por alto qué sucede con el material base debido a la micro-fundición<sup>1</sup> que este sufre al juntarse con el material de aporte, en general se verifica de tal manera que la junta no falle en la zona del cordón realizado, pero qué sucede con la zona afectada de calor ZAC<sup>2</sup> del

---

<sup>1</sup> Fundición del material de soldadura de manera puntual o en pequeña escala.

<sup>2</sup> Zona afectada por el calor emitido en el proceso de soldadura al material base.

material base, por qué no estudiar los cambios metalográficos y de sus propiedades mecánicas que el material base sufre.

Dentro de esta área se han realizado anteriormente algunos estudios, como por ejemplo la influencia de la fatiga sobre la estructura metalográfica en puentes metálicos antiguos, este estudio destaca la influencia de los defectos superficiales para la extracción de probetas, así como el estudio del comportamiento de las uniones soldadas a lo largo del tiempo y el desgaste que estas han tenido. (Varona, Gutiérrez Solana, & González, 1992),

Otro aporte a esta área es cómo el efecto del procedimiento de soldadura influye sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros micro-aleados para tubería, donde se hacen varios estudios comparativos sobre las propiedades mecánicas de aceros micro-aleados con distintos procedimientos y variaciones a los parámetros de soldadura. (Zalazar, Ramini, Surian, Bruna, & Baralla, 2009)

Con este tipo de estudios se pretende analizar la variación en las propiedades mecánicas y estructurales del material y cómo esto puede repercutir en el desempeño del elemento. Con esto se podrían plantear alternativas de mejora a los procedimientos de soldadura, para aumentar la confiabilidad de la junta y que los elementos soldados resistan adecuadamente las cargas de trabajo para las cuales fueron diseñadas. Para este caso de aplicación particular en puentes con un mismo procedimiento se puedan soldar más de un solo material y varios espesores. Adicionalmente se disminuiría la probabilidad de que estos sufran daños en su estructura soldada, disminuyendo chequeos periódicos a las juntas y evitando reparaciones.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Cuando se realiza una soldadura se presentan algunas variaciones en el material debido al ciclo térmico que se produce. Por ello el material sufre alteraciones micro-estructurales, las cuales se ven reflejadas en las propiedades mecánicas finales de la junta de soldadura.

Esta investigación trata de determinar cómo pueden verse afectadas las propiedades mecánicas en dos tipos de aceros, el ASTM A36 en espesores de 12 mm y 24 mm y el acero ASTM A588 en espesores de 12 mm, 20 mm y 30 mm. Utilizando un procedimiento de soldadura que abarque los espesores mencionados para cada material.

De esta manera mediante ensayos no destructivos, ensayos mecánicos destructivos y metalografías, se puede determinar los cambios en propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, ductilidad, tenacidad y micro dureza, así como cambios micro-estructurales en los materiales soldados mencionados. Con lo cual se puede evaluar si estas variaciones afectan de manera adversa y significativa el desempeño de una junta soldada al ser sometido a cargas de trabajo. Con esto, de no encontrar que estas variaciones afecten el desempeño de los elementos soldados, se minimizarían los costos de producción ya que con un mismo procedimiento se podría abarcar varios materiales y espesores distintos.

### **1.3 OBJETIVO GENERAL**

Determinar las transformaciones metalográficas y variaciones de las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción, ductilidad, tenacidad y dureza en juntas soldadas de aceros ASTM A588 y A36, conforme a un procedimiento de soldadura que cumpla con los requerimientos de la norma AWS D1.5.



## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los materiales base utilizados, conociendo sus propiedades mecánicas iniciales como resistencia a la tracción, dureza, composición química y microestructura.
- Realizar los ensambles de prueba para soldadura conforme a la norma AWS D1.5, para los aceros ASTM A588 de 12, 20 y 30 milímetros y el acero ASTM A36 de 12 y 24 milímetros.
- Ejecutar y controlar los parámetros establecidos en el procedimiento de soldadura seleccionado para el proyecto, conforme a la normativa AWS D1.5.
- Ejecutar los ensayos mecánicos y análisis metalográficos para determinar la variación en las propiedades mecánicas y cambios micro-estructurales en los aceros seleccionados en cada uno de sus espesores.
- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos y metalográficos, para conocer la existencia de variación significativa en las propiedades, que afecte negativamente a la junta para plantear posibles alternativas de mejora al procedimiento de soldadura.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

Dentro del procedimiento de soldadura, es necesario controlar actividades previas, dentro del proceso y después del mismo, todo esto para garantizar que las propiedades mecánicas y la microestructura de la junta soldada estén

en rangos permisibles, para un adecuado desempeño y con ello garantizar que el elemento soporte las cargas de trabajo a las cuales va a estar sometido.

En el caso del acero ASTM A588 y el acero A36, los cuales son utilizados en la mayoría de la industria ecuatoriana sobretodo en el área de la construcción de puentes, son necesarios el control de calidad de toda la junta soldada y el cordón de soldadura. Así como también verificar y mejorar los procedimientos para que el material base al sufrir un choque térmico producto de la micro-fundición que se produce, no altere de manera significativa sus propiedades mecánicas y estructura metalográfica.

Es por ello que este estudio va encaminado a determinar estas variaciones, ayudándose del control de parámetros de soldadura mediante la norma AWS D1.5 y los respectivos ensayos para la determinación de la variación de las propiedades mecánicas y estructuras metalográficas conforme a la normativa.

## **1.6 ALCANCE**

Determinar las transformaciones metalográficas y afectaciones a las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción, micro - dureza tipo Vickers, ductilidad mediante ensayo de doblado lateral y ensayos de impacto tipo Charpy, en juntas soldadas con acero ASTM A36 de 12 y 24 milímetros y ASTM A588 de 12, 20 y 30 milímetros, soldados con proceso FCAW<sup>3</sup>, designados en un procedimiento de soldadura seleccionado y apegado a la norma AWS D1.5.

---

<sup>3</sup> FCAW. Flux Cored Arc Welding. Tipo de soldadura por arco que utiliza como material de aporte hilos tubulares.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 RESEÑA HISTÓRICA DEL ACERO

Antes de hablar de acero se debe necesariamente mencionar al hierro y cómo este fue desarrollado por varias civilizaciones, hasta convertirse en la aleación hierro – carbono que hoy se conoce como acero.

El hierro es un mineral abundante en la corteza terrestre, en mayor parte presente en forma de óxidos. Esta es una de las razones por las cuales se cree que su desarrollo en la metalurgia fue algo tardío en relación a otros materiales como el oro y el cobre, los cuales pueden encontrarse en estados de alta pureza y más fáciles de explotar o fundir. (Arquitectura en Acero / Alacero, 2013)

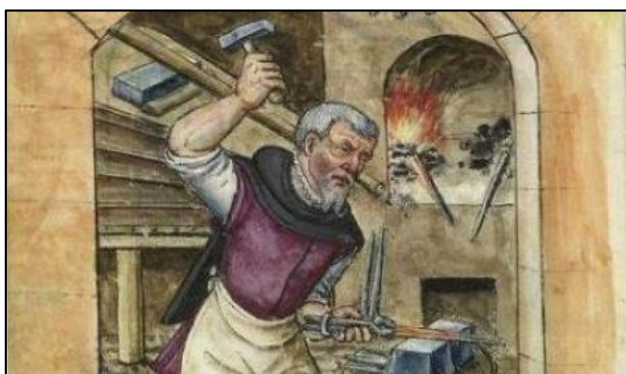
Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3.000 a.C., se sabe que antes de esa época se empleaban adornos de hierro. Los griegos ya conocían hacia el año 1.000 a.C. la técnica para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico.

Se considera que la primera aleación como tal llamada acero apareció en China en el período de la dinastía Han, que comprende entre los años 202 A.C y el año 220 D.C. En este período existen datos que se mezcló hierro forjado semisólido con hierro fundido, obteniendo de esta manera un mejor producto, debido a un mayor contenido de carbono que en hierro forjado como tal.

Adicionalmente el término acero se empleó para describir a las espadas de Damasco, éstas eran fabricadas en Medio Oriente entre los años 1100 y 1700 A.C, se las conocía por su extrema dureza y su filo “eterno”, según estudios estas espadas tenían un procedimiento de calentamiento lento con

adición de carbón vegetal o mineral y enfriadas en un crisol. De esta manera se obtenían las propiedades características de estas espadas.

En general las aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro se clasificarían en la actualidad como hierro forjado, este procedimiento reducía el mineral haciéndolo una masa de hierro metálico llena de una escoria formada por impurezas metálicas y cenizas de carbón vegetal. Esta masa de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente y se golpeaba con pesados martillos para expulsar la escoria y consolidar la pieza. (InfoAcero, 2000)



**Figura. No. 1 . Ilustración antigua de la forja del hierro.**  
Fuente: (Oficios de Arte)

Después del siglo XIV se aumentó el tamaño de los hornos, en los cuales el mineral de hierro ingresaba y se reducía a hierro metálico a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.

El proceso de refinado del arrabio mediante chorros de aire se debe al inventor británico Henry Bessemer, que en 1855 desarrolló el horno o convertidor que lleva su nombre. (InfoAcero, 2000)



**Figura. No. 2 Horno de Bessemer.**  
Fuente: (lesporza)

Desde la década de 1960 funcionan varios mini-hornos que emplean electricidad para producir acero a partir de chatarra. Sin embargo, las grandes instalaciones de altos hornos continúan siendo esenciales para producir acero a partir de mineral de hierro. (InfoAcero, 2000)

En la actualidad el consumo de acero ha ido en aumento en casi todas las regiones del mundo, la industria es su principal demandante, ya sea para la fabricación de maquinaria, carrocería, etc. Así como para fabricar piezas y artículos mecánicos como repuestos y material de construcción. (PACKSYS ACADEMY, 2013)

El acero ha ido desarrollándose tecnológicamente, actualmente este material en buena parte es reciclado y gracias a ello se evita una sobre explotación del mineral del hierro. El futuro del acero está también unido a sus estudios de unión y simbiosis con otros materiales, como vidrio o plásticos, es decir el acero pasa a transformarse en una parte de un material compuesto. Por ello, dentro de estos procedimientos no se puede olvidarse las combinaciones de materiales metálicos para constituir elementos más ligeros y con grandes prestaciones como así lo exige el mercado actual. Así las aplicaciones son infinitas como en la aeronáutica, la biomecánica, construcción, etc. (Pérez Arroyo, 2014).

## **2.2 ACERO ESTRUCTURAL.**

El acero utilizado en estructuras de ingeniería generalmente viene dado en dos tipos, el acero con bajo contenido de carbono, también llamado acero dulce y aceros de baja aleación, en el caso de los segundos, el objetivo de los aleantes es aumentar la resistencia mecánica y a la corrosión.

Las especificaciones de estos aceros generalmente están dadas en base a la norma ASTM, estos tipos de aceros están presentes en la construcción de puentes, edificios, barcos, perfiles estructurales, varillas, así como en la industria automotriz, electrodomésticos, transporte, etc.

### **2.2.1 VENTAJAS DEL ACERO ESTRUCTURAL.**

El acero estructural tiene varias ventajas en comparación con otros materiales utilizados en la construcción, entre ellas se puede mencionar:

- **Facilidad de Montaje**

El realizar estructuras con acero, permite una mayor facilidad para armar las edificaciones en relación a si se lo hiciera con materiales y procedimientos comunes como lo es la construcción a base de hormigón armado.

- **Material tenaz y relativamente dúctil y maleable.**

El acero al ser un material con las características mencionadas anteriormente permite hacer con él diferentes formas, como perfiles, varillas, planchas e incluso alambres lo cual permite construir edificaciones con una amplia variedad de formas.

- **Economía.**

Con respecto a la rapidez de montaje el utilizar acero permite que las obras sean realizadas en un menor lapso de tiempo con ello se evitan costos de mano de obra, etc. Además la utilización de acero permite la

compatibilidad con materiales complementarios a un menor costo, en cuestión de acabados. (AHMSA, 2014)

Cabe señalar que si bien el acero presenta algunas ventajas, entre sus desventajas más apreciables está la corrosión, la cual se puede controlar con tratamientos existentes en el mercado e incluso existen tipos de aceros que no se corroen fácilmente.

Otra desventaja es el fuego, en caso de incendio o una explosión con fuego, las estructuras de acero son altamente vulnerables, pero con la utilización de sistemas contra incendios y tratamientos especiales, permite minimizar este tipo de riesgos en una estructura metálica.

### **2.2.2 DESIGNACIÓN ASTM PARA ACEROS.**

El sistema del ASTM para metales consta de la letra “A” para materiales ferrosos y “B” para materiales no ferrosos, seguido por un número arbitrario asignado de forma secuencial. Los estándares que pueden ser suministrados en unidades Métricas ASTM tienen un sufijo M.

La norma ASTM no especifica la composición del material directamente, sino la clasifica en función de la aplicación o su ámbito de empleo.

A continuación se indicará mediante un ejemplo la nomenclatura completa que se utiliza para la denominación de metales según la ASTM.

Designación:

#### **ASTM A 516 / A 516M-90 (2001) Grado 70**

Corresponde a: Placas o láminas para recipientes a presión, de acero al carbono, de moderada y baja temperatura de servicio.

- **A:** Describe que es metal ferroso.
- **516:** Es un número secuencial, sin ninguna relación con las propiedades del metal.

- **M:** Indica que el estándar A 516M está escrito en las unidades del sistema Internacional SI. (Métrico), por lo tanto, conjuntamente A 516 / A 516M utiliza tanto pulgada-libra y unidades del SI.
- **90:** Indica el año de la adopción o la última revisión.
- **(2001):** Indica el año de su última aprobación.
- **Grado 70:** Indica la resistencia a la tracción mínima en ksi, 70 ksi o 70.000 psi. (PhiOneLimited, 2013)

### 2.3 ACERO ASTM A36

El acero ASTM A36 es uno de los aceros más comunes dentro de los aceros de tipo estructural. En el Ecuador es uno de los materiales más utilizados para la construcción de estructuras, puentes, varillas, actividad metalmecánica, etc. Existen algunas empresas en el mercado que se encargan de fabricar piezas estructurales de acero para la construcción, entre ellas están ADELCA, NOVACERO, ANDEC, por mencionar las más reconocidas. (INEC, 2012)

Viene dado en varias formas como por ejemplo varillas, planchas, perfiles estructurales, láminas, platinas, ángulos, etc.

En la tabla. No. 1 se muestran propiedades de tensión de este material.



**Tabla. No. 1 Propiedades de tensión mínimas requeridas para un acero ASTM A36.**

<b>Resistencia a la tracción</b>	58 – 80 [ksi] / 400 – 550 [MPa]
<b>Mín. Punto de fluencia</b>	36 [ksi] / 250 [MPa]
<b>Elongación en 8" [200 mm]</b>	20% mín.
<b>Elongación en 2" [50 mm]</b>	23% mín.

Fuente: Norma ASTM Vol. 01.04. /A36/ Año 2004.

Existen además de estas propiedades mecánicas, requerimientos de composición química, las cuales están dadas mediante la norma ASTM A36, estas se detallan en la tabla. No. 2.

**Tabla. No. 2 Requerimientos químicos del acero A36.**

Tipo	Láminas / Planchas					
	Espesor, in[mm]	Hasta 3/4" [20], incl	Sobre 3/4" hasta 1 1/2" [20 hasta 40 ], incl	Sobre 1 1/2" hasta 2 1/2" [40 hasta 65 ], incl	Sobre 2 1/2" hasta 4" [65 hasta 100], incl	Sobre 4" [100]
Carbono, máx, %		0,25	0,25	0,26		
Manganeso, máx, %		...	0,80 a 1,20	0,80 a 1,20	0,85 a 1,20	0,85 a 1,20
Fósforo, máx, %		0,04	0,04	0,04	0,04	
Azufre, máx, %		0,05	0,05	0,05	0,05	
Silicio, máx, %		0,40 máx	0,40 máx	0,15 a 0,40	0,15 a 0,40	0,15 a 0,40
Cobre, máx, % cuando se especifica acero de cobre		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Nota: Por cada reducción de 0,01% por debajo del máximo especificado de carbono, se requiere un aumento del 0,06% de manganeso por encima de la cantidad máxima prevista, será permitido hasta un máximo del 1.35%						

Fuente: Norma ASTM Vol. 01.04. /A36/ Año 2004.

Es necesario aclarar que estas tablas aplican para formas como láminas y planchas, se toma este tipo de forma ya que el análisis será realizado en cupones de soldadura, los cuales son planchas de acero.

## 2.4 ACERO ASTM A588

Este tipo de acero se utiliza principalmente para la construcción de estructuras de puentes y edificios en los que la disminución en peso y la durabilidad son importantes.

La resistencia a la corrosión atmosférica de este acero en la mayoría de los ambientes es sustancialmente mejor que la de los aceros al carbono estructurales.

Cuando es expuesto a la atmósfera, este acero es adecuado para muchas aplicaciones sin ningún tipo de recubrimiento como pintura por lo cual este acero es utilizado también en la construcción de buques, barcos, etc. Debido a su alta resistencia a la corrosión.

A continuación en la tabla. No. 3 se muestran los requerimientos de tensión de este acero.

**Tabla. No. 3. Propiedades de tensión mínimas requeridas para un acero ASTM A588.**

	Menos de 4" [100 mm], incl	Sobre las 4" [100 mm] hasta 5" [125mm], incl	Sobre las 5" [125 mm] hasta 8" [200 mm], incl
Resistencia mínima a la tensión, KSI [MPa]	70 [485]	67 [460]	63 [435]
Mínimo punto de fluencia, KSI [MPa]	50 [345]	46 [315]	42 [290]
% Elongación de 8" [200 mm]	18 (b,c)	...	...
% Elongación en 2" [50mm]	21 (b,c)	21 (b,c)	21 (b,c)
<b>b: El alargamiento no está obligado a ser determinado por la placa que sean utilizadas de base</b> <b>c: Para placas más anchas que 24 in [600mm], el alargamiento requerido se reduce en dos puntos menos al porcentaje establecido. Observar el alargamiento requerido según los ajustes en los ensayos de tensión, según la especificación A6/ A6M</b>			

Fuente: Norma ASTM Vol. 01.04. /A588/ Año 2004.

Como se explicó anteriormente para cada acero existen composiciones químicas requeridas para el caso del acero ASTM A588, se muestran en la tabla. No. 4.

**Tabla. No. 4. Requerimientos químicos del acero A588**

Elemento	Grado A	Grado B	Grado C	Grado K
<b>Carbón (a)</b>	0,19 máx	0,20 máx	0,15 máx	0,17 máx
<b>Manganeso (a)</b>	0,80 a 1,25	0,75 a 1,25	0,8 a 1,35	0,50 a 1,20
<b>Fósforo</b>	0,04 máx	0,04 máx	0,04 máx	0,04 máx
<b>Azufre</b>	0,05 máx	0,05 máx	0,05 máx	0,05 máx
<b>Silicio</b>	0,30 a 0,65	0,15 a 0,50	0,15 a 0,40	0,25 a 0,50
<b>Níquel</b>	0,40 máx	0,50 máx	0,25 a 0,50	0,40 máx
<b>Cromo</b>	0,40 a 0,65	0,40 a 0,70	0,30 a 0,50	0,40 a 0,70
<b>Molibdeno</b>	...	...	...	0,10 máx
<b>Cobre</b>	0,25 a 0,40	0,20 a 0,40	0,20 a 0,50	0,30 a 0,50
<b>Vanadio</b>	0,02 a 0,10	0,01 a 0,10	0,01 a 0,10	...
<b>Columbio</b>	...	...	...	0,005 a 0,005 (b)
<b>a: Para cada reducción de 0,01% por debajo del máximo especificado de carbono, un aumento del 0,06% de manganeso por encima de la cantidad máxima prevista será permitido, hasta máximo, hasta el máximo de 1,50%</b>				
<b>b: Para planchas con un espesor bajo 1/2 in [13mm], el mínimo de Columbio no es necesario</b>				

Fuente: Norma ASTM Vol. 01.04. /A588/ Año 2004.

## 2.5 PRINCIPALES ALEANTES DE LOS ACEROS UTILIZADOS.

Siempre que se esté involucrado en actividades de investigación, ingenieriles, constructivas, etc. Es necesario conocer la composición química de un acero y qué es lo que cada uno de estos compuestos produce sobre un material, en este caso los aceros que están en estudio.

De esta manera se puede conocer mejor al material y así prever ciertas propiedades o reacciones que este va a sufrir, así como la utilización del acero para la aplicación que se necesite.

A continuación se da una breve descripción de los aleantes que se encuentran en los aceros en estudio.

### **2.5.1 CARBONO.**

El carbono es el elemento de aleación principal y de bajo costo utilizado en los aceros.

En aceros enfriados lentamente, el carbón forma carburo de hierro y cementita, la cual con la ferrita forma a su vez la perlita.

Cuando el acero se enfría más rápidamente, el acero muestra endurecimiento superficial.

El carbón es el elemento responsable de dar la dureza y alta resistencia del acero. (Totten, 2007)

### **2.5.2 MANGANESO**

Se puede considerar que el Manganeso (Mn) está presente en casi todos los aceros, en tasas del 0.30% o más. Este elemento es un desoxidante y desulfurador, beneficia la calidad superficial del acero, a excepción de aceros con tasas contenido de carbono muy bajas. Además favorece la forjabilidad y soldabilidad del acero.

Este elemento es un formador de austenita, pero un débil formador de carburos, el cual solo se disuelve en cementita.

En grandes cantidades de Manganeso, por ejemplo en porcentajes mayores al 2%, tiene como resultado un incremento de la tendencia a la fisuración y distorsión, sobre todo si se hace un enfriamiento rápido. La presencia de manganeso ayuda a la eliminación de impurezas como Fósforo (P), Estaño (Sn), Antimonio (Sb), y Arsénico (As). (Totten, 2007)

### **2.5.3 FÓSFORO**

El fósforo se disuelve en ferrita e incrementa la resistencia del acero, cuando la tasa de fósforo (P) aumenta, la ductilidad y resistencia al impacto decae. Además incrementa la dureza y retarda la descomposición de martensita.

Un contenido alto de fósforo en aceros con bajo contenido de carbono (alrededor del 0.1% de Carbono) mejora la maquinabilidad del acero, así como la resistencia a la corrosión atmosférica. (Arqhys, 2014)

### **2.5.4 SILICIO**

El silicio (Si) es uno de los principales desoxidantes del acero, este elemento se disuelve completamente en ferrita. En tasas alrededor del 0.30% puede incrementar la resistencia del acero, sin necesariamente disminuir su ductilidad. Aunque si la tasa es cerca del 0.40% la disminución de ductilidad se hace bastante notoria. (Totten, 2007)

### **2.5.5 AZUFRE**

El azufre tiene una baja solubilidad en el acero sólido y forma inclusiones de sulfuro. Este elemento puede perjudicar significativamente la ductilidad en caliente. El aumento del azufre reduce la tenacidad y ductilidad aunque mejora la maquinabilidad.

El nivel de azufre es estrictamente controlado en la mayoría de las especificaciones de los aceros a fin de cumplir con los requerimientos de tenacidad, ductilidad o maquinabilidad. El aumento del azufre resulta en una tenacidad reducida ya que estas inclusiones actúan como núcleos de inicio de fisuración y rutas de fácil propagación, por lo cual reducir el azufre significa menos núcleos de inicio de fisuración y por tanto mayor tenacidad. (Totten, 2007)

### **2.5.6 NÍQUEL**

Mejora las propiedades del tratamiento térmico reduciendo la temperatura de endurecimiento y distorsión al ser templado. La aleación con níquel amplía el intervalo de temperatura crítica<sup>4</sup>, no forma carburos u óxidos. Esto aumenta la resistencia sin disminuir la ductilidad.

El níquel se utiliza con frecuencia junto con el cromo para obtener la tenacidad y ductilidad proporcionadas por el níquel, y la resistencia al desgaste y la dureza que aporta el cromo.

### **2.5.7 CROMO**

El cromo aumenta la profundidad del endurecimiento y mejora la resistencia al desgaste y corrosión. Su adición origina la formación de diversos carburos de cromo que son muy duros, sin embargo el acero resultante es más dúctil que un acero de la misma dureza producido solo con incrementar su contenido de carbono. La adición de cromo amplía el intervalo crítico de temperatura. (Totten, 2007)

Dentro de los aleantes cromo y níquel es importante mencionar que cuando estos elementos están presentes en determinados porcentajes en un acero, forman un grupo de aceros en particular llamados aceros inoxidable.

El acero de cromo-níquel es resistente contra la humedad y la mayoría de ácidos, destaca por su dureza, resistencia, gran tolerancia al frío y al calor y por sus propiedades higiénicas. Dado que el cromo y el níquel poseen gran afinidad por el oxígeno por lo cual se produce una capa pasivadora en el material.

A continuación se muestra qué tipo de acero se forma en función del porcentaje de aleante utilizado.

---

<sup>4</sup> Temperatura crítica: Temperatura a la cual el acero cambia de fase o empieza su transformación.

- **Martensíticos**<sup>5</sup>: Aleación básicamente de cromo y carbono con los siguientes rangos de porcentajes. 10.5% - 18% en Cr y C hasta de 1.2%
- **Ferríticos**<sup>6</sup>: Contenidos de cromo del 10.5% al 30% y Carbono de máximo 0.08%
- **Austeníticos**<sup>7</sup>: Se obtienen agregando níquel, manganeso y nitrógeno y un porcentaje de cromo del 16% al 20% y porcentajes de carbono del 0.03% al 0.08%. (BONNET, 2012)

Es necesario aclarar que lo referente a ferrita, martensita, austenita y demás fases del acero, se tratará como un tema completo en páginas posteriores.

### 2.5.8 MOLIBDENO

Este elemento mejora las propiedades del tratamiento térmico. Su aleación con acero forma carburos y se disuelve en ferrita hasta cierto punto, de modo que intensifica su dureza y la tenacidad.

El Molibdeno también es un elemento habitual, ya que aumenta mucho la profundidad de endurecimiento del acero, así como su resistencia al impacto. Este es el elemento más efectivo para mejorar la resistencia del acero a las bajas temperaturas, reduciendo la pérdida de resistencia por templado. (Totten, 2007)

---

<sup>5</sup> Martensítico: Referente a que tienen una estructura metalográfica formada por martensita.

<sup>6</sup> Ferrítico: Referente a que tienen una estructura metalográfica formada por ferrita.

<sup>7</sup> Austenítico: Referente a que tienen una estructura metalográfica formada por austenita.

### **2.5.9 VANADIO**

El Vanadio brinda dureza y ayuda en la formación de granos de tamaño fino. Aumenta la resistencia a los impactos por lo tanto es muy efectivo para aumentar la resistencia a las fracturas por impacto así como la resistencia a la fatiga. (Totten, 2007)

## **2.6 ENSAYOS**

Los ensayos sirven para conocer datos concretos y objetivos sobre las propiedades que se desea analizar u obtener de un determinado objeto o fenómeno.

Para el caso de este proyecto se realizarán ensayos destructivos y no destructivos, por lo cual se dará una pequeña base teórica de cada uno de ellos.

### **2.6.1 ENSAYOS DESTRUCTIVOS.**

Este tipo de ensayos son pruebas a las que se someten los materiales con el fin de comprobar propiedades. En este caso el material o pieza base va a sufrir daño, debido a la extracción de muestras para poder ser analizadas, además de roturas o marcas debido a los ensayos.

A continuación se detallan los ensayos destructivos que serán utilizados para el análisis del proyecto en curso.

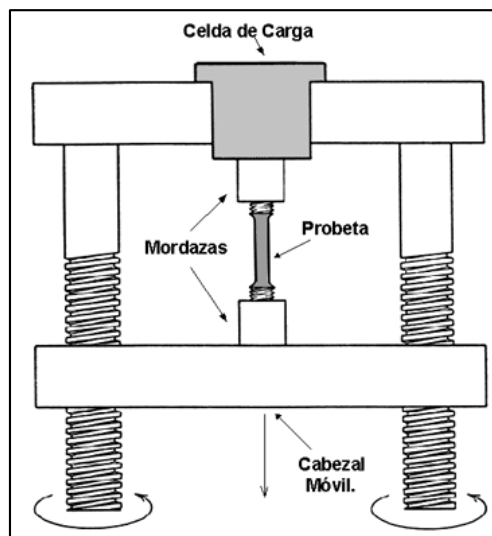
#### **2.6.1.1 ENSAYO DE TENSION.**

Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o que es aplicada lentamente.

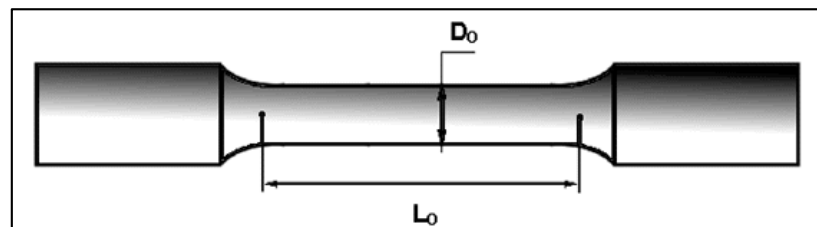


Se considera a este ensayo de importancia ya que las propiedades que se muestran en él, permiten conocer la resistencia del material, como por ejemplo resistencia a la tensión, esfuerzo último, punto de fluencia del material, etc.

La probeta es colocada en la máquina de ensayos universales y se aplica una fuerza  $F$  unidireccional al espécimen, previamente se colocan dos marcas de calibración, mientras se ejecuta el ensayo se observa como la distancia entre marcas aumenta. (Askeland & Phulé, 2003)

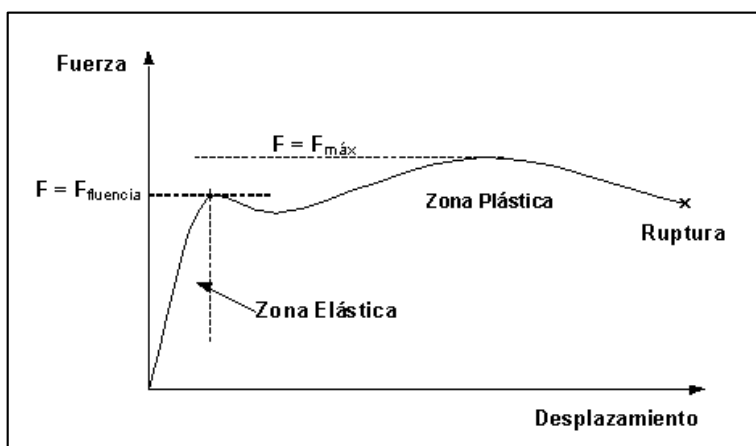


**Figura. No. 3. Esquema de máquina universal para ensayo de tensión**  
Fuente: (Universidad Católica de Chile, Guía de laboratorio 4.)



**Figura. No. 4. Esquema de probeta para ensayo de tensión.**  
Fuente: (Universidad Católica de Chile, Guía de laboratorio 4.)

El ensayo de tensión muestra algunas propiedades, las cuales se las puede conocer mediante la interpretación del gráfico de esfuerzo - deformación del material ensayado.



**Figura. No. 5. Curva esfuerzo – deformación unitaria para un acero.**  
Fuente: (Universidad Católica de Chile, Guía de laboratorio 4.)

En general los aceros presentan esta curva, se puede reconocer una parte lineal, llamada zona elástica, aquí el acero se comporta como un resorte ya que el material regresa a su longitud inicial, cuando la línea empieza a desviarse, el material llega a su límite de fluencia, a partir de este punto la deformación del material se vuelve plástica.

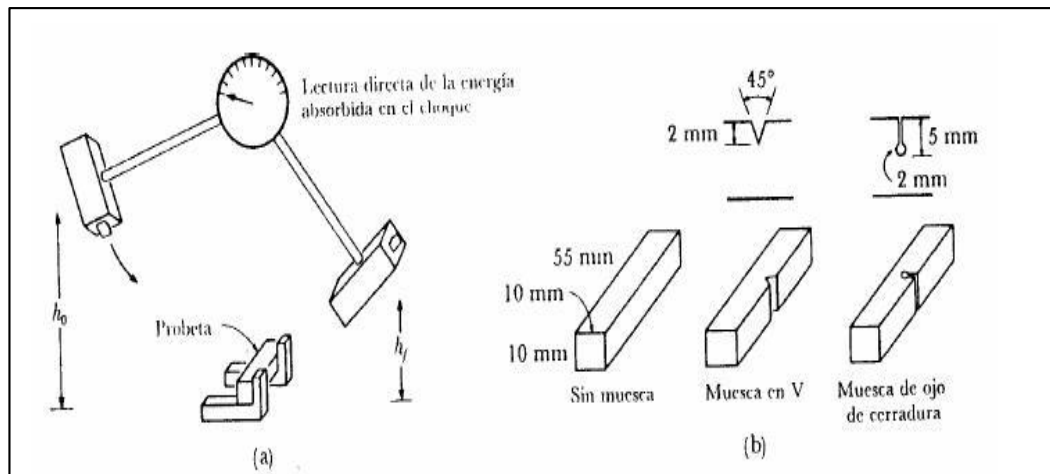
Luego a partir de este punto la curva se vuelve inestable y depende su comportamiento del acero que se esté analizando, hasta el punto de fractura del material.

### 2.6.1.2 ENSAYO DE IMPACTO O TENACIDAD

El ensayo de impacto sirve para evaluar la tenacidad de un material.

Generalmente para realizar este tipo de ensayo destructivo, se utiliza el denominado ensayo Charpy aunque para materiales cerámicos o extremadamente frágiles se utiliza el ensayo Izod, para el proyecto en curso se utilizará el ensayo Charpy, el cual consiste en soltar un péndulo en caída libre

y que este golpee una probeta, de modo que se puede comparar la energía absorbida por el material mediante la cuantificación de las alturas, a la que se soltó el péndulo inicialmente y a la que terminó, transformándolas en energía potencial.



**Figura. No. 6. Esquema de un ensayo de impacto Charpy y tipos de probetas.**

Fuente: (Geocities.)

La probeta del material a ser ensayado puede o no tener muesca, los especímenes que tienen muesca permite medir mejor la resistencia y observar mejor la propagación de las grietas. (Askeland & Phulé, 2003)

### 2.6.1.3 ENSAYO DE DOBLADO

Este ensayo permite conocer la capacidad de deformación de un material al ser doblado con el fin de prevenir roturas al ser sometido a una carga sin agrietarse, también permite conocer la ductilidad del material y el comportamiento que va a tener al aplicar una carga de este tipo.

El ensayo de doblado se realiza en la máquina de ensayos universales, se coloca la probeta entre dos apoyos y se somete a una carga en el centro de la probeta de forma que esta se vaya doblando, las dimensiones de la probeta son regidas según la norma que se aplique, en este caso según la norma AWS sección D1.5



**Figura. No. 7. Probeta ensayada para doblado.**  
Fuente: (Ecured.)

#### **2.6.1.4 ENSAYO DE METALOGRAFÍA.**

Previo a la explicación de este ensayo se dará una breve información sobre la metalografía como un área importante de los materiales metálicos.

La metalografía es un área de la metalurgia, la cual estudia la constitución y características estructurales de los metales y las aleaciones. De esta manera se los puede relacionar con propiedades físicas, mecánicas y químicas. (Universidad de Buenos Aires, 2010)

Este ensayo permite determinar aspectos a nivel macrográfico y micrográfico.

Con la macrografía se puede obtener datos como:

- Tratamientos mecánicos a los que ha sido sometido el material.
- Distribución de defectos.

Con la micrografía se puede determinar propiedades como:

- Tamaño de grano
- Forma y distribución de las fases del material.

- Existencia o no de tratamiento mecánico o térmico sobre el material.

El examen micrográfico se basa en la amplificación de la superficie mediante el microscopio para observar las características micro estructurales.

El examen de la microestructura es útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales. (Martínez , Porrúa, & Altshuler, 2012)

En general los pasos para realizar un ensayo de metalografía son:

- Extracción de la muestra.
- Montaje
- Desbaste y pulido.
- Ataque químico
- Observación y análisis.

#### **2.6.1.5 ENSAYO DE DUREZA.**

En términos sencillos la dureza es la resistencia que un material pone a la penetración, generalmente con un objeto más duro que el material en estudio.

Para este ensayo se utilizan indentadores, de distinta forma geométrica así como una carga definida según el indentador y el material en análisis.

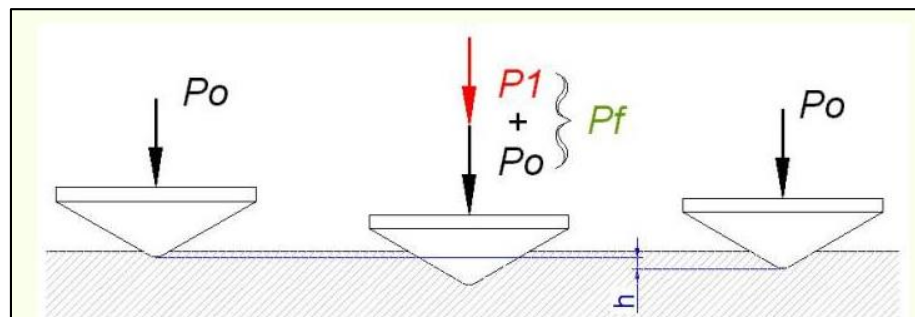
Al ser una deformación plástica el material queda marcado, a partir de la profundidad y medidas de esta marca se determina la dureza del material.

Dependiendo el indentador, la carga y el material hay diferentes mediciones de dureza y procedimientos para medirlas, las cuales se menciona a continuación:

### 2.6.1.5.1 DUREZA ROCKWELL

Este método de medir la dureza utiliza las indentaciones como forma de medida, pero no trata de medir de manera directa la dureza a través de la magnitud de los esfuerzos de contacto, sino que la define como un número arbitrario, inversamente proporcional a la penetración del indentador.

A continuación se muestra un esquema de la forma de medición Rockwell.



**Figura. No. 8** Esquema de medición de la dureza Rockwell  
Fuente. (Calle & Henao, Universidad Tecnológica de Pereira, 2012).

Además de una máquina calibrada, se utiliza un indentador cónico-esferoidal de diamante, o una bola de acero endurecido, bajo condiciones específicas contra la superficie del material a ser ensayado y se mide la profundidad permanente de la impresión bajo condiciones específicas de carga.

Para el cálculo de la dureza se utilizan las siguientes dos fórmulas, donde “HR” significa dureza Rockwell y “h” significa la profundidad de la marca. (Calle & Henao, Universidad Tecnológica de Pereira, 2012)

Indentador de cono de diamante:

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

Indentador de bola de acero:

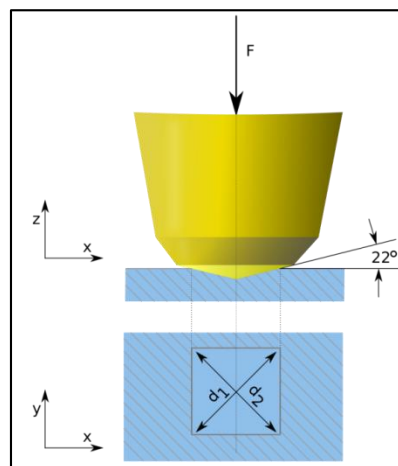
$$HR = 130 - \frac{h}{0.002}$$

### 2.6.1.5.2 DUREZA VICKERS

Este ensayo de dureza se utiliza para materiales duros, es un método de indentación en el cual se utiliza como indentador una pirámide de diamante.

Los valores de este ensayo son coincidentes en la escala Brinell para materiales de dureza media.

Se puede utilizar este ensayo también para materiales blandos, probetas delgadas, capas superficiales y como ya se lo mencionó antes, con materiales duros. (Calle & Henao, Universidad Tecnológica de Pereira, 2012)



**Figura. No. 9. Medición de dureza Vickers.**  
Fuente. (Calle & Henao, Universidad Tecnológica de Pereira, 2012).

Para el cálculo de esta dureza se utiliza la siguiente fórmula:

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

Donde \$d\$ es la media aritmética de \$d\_1\$ y \$d\_2\$ y \$P\$ es la carga aplicada.

## **2.6.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.**

Los ensayos no destructivos, son pruebas que se hacen a cualquier material, siempre y cuando esta prueba no afecte de forma permanente a las propiedades que el objeto ensayado posee.

Este tipo de ensayos deben dejar huellas o marcas casi imperceptibles o nulas, generalmente las prácticas que se aplican a los materiales en los ensayos no destructivos tienen que ver con la aplicación de fenómenos físicos tales que no afecten a su estructura, por ejemplo ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, etc.

Dentro del proyecto se prevé aplicar los siguientes ensayos no destructivos.

### **2.6.2.1 INSPECCIÓN VISUAL**

Este ensayo es uno de los más antiguos utilizados, es un ensayo relativamente fácil y de bajo costo. La eficiencia de los resultados de este ensayo, depende de quién lo ejecuta, su nivel de experiencia y los instrumentos de apoyo utilizados, como instrumentos de amplificación y de iluminación.

De acuerdo a los instrumentos utilizados y la distancia que se tenga entre el inspector y el objeto de estudio, la inspección Visual se puede ser de dos tipos:

- Inspección Visual Directa
- Inspección Visual Remota

La inspección directa se hace a una distancia corta del objeto, aprovechando al máximo la capacidad visual natural del inspector. Mientras que la inspección remota se utiliza cuando no se tiene acceso directo a la pieza a ser analizada y se utilizan instrumentos de apoyo como cámaras.



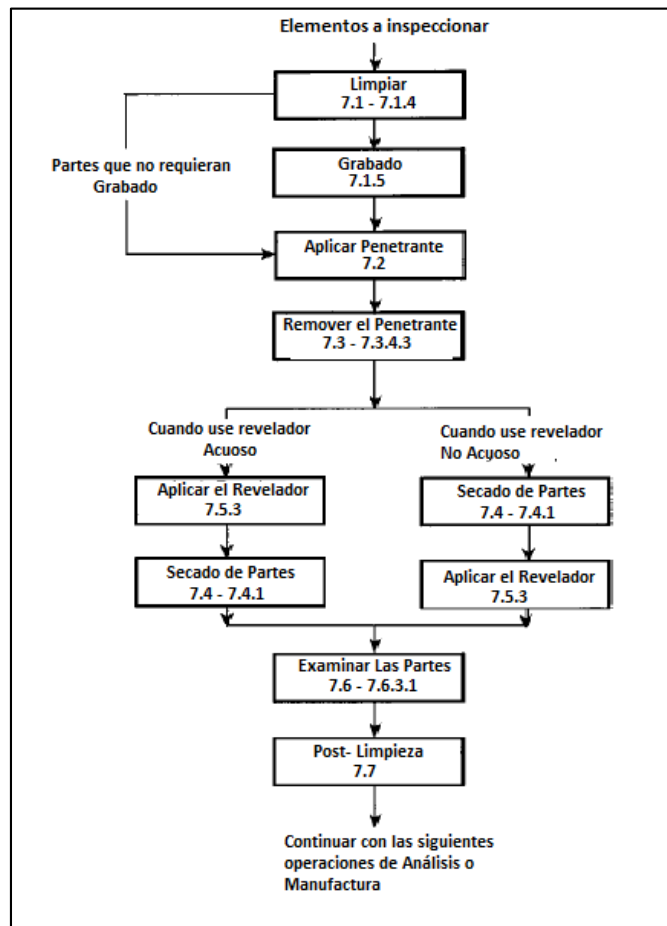
### **2.6.2.2 ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES.**

Este ensayo es uno de los más utilizados en la actualidad por la industria debido a su fácil aplicación e interpretación de resultados.

Mediante los líquidos penetrantes se puede inspeccionar una gran variedad de materiales como metales, plásticos, cerámicos, vidrios, acrílicos, etc. Siempre y cuando el material no presente alta porosidad ya que esto dificulta la diferenciación entre el acabado normal de la pieza y defectos superficiales. (ISOTEC, 2010)

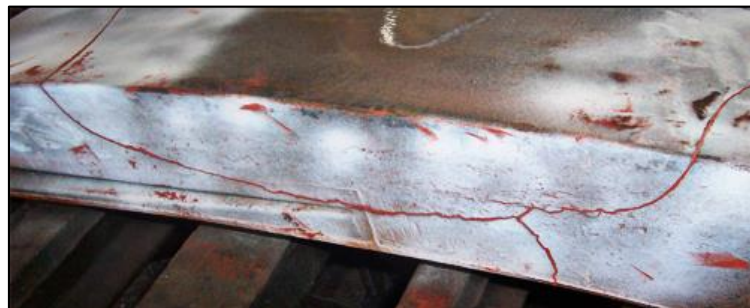
Como se mencionó anteriormente este ensayo solo se utiliza para detectar defectos superficiales y en ciertas ocasiones la detección de estos defectos puede ayudar a sospechar sobre defectos internos en las piezas.

A continuación se muestra un esquema de la aplicación de líquidos penetrantes en un orden.



**Figura. No. 10. Forma de aplicación de líquidos penetrantes según la norma ASTM E 1417.**

Fuente: (American Standards Test Materials, 2004)



**Figura. No. 11. Pieza ensayada con líquidos penetrantes**

Fuente: (ISOTEC, 2010)

## **2.7 SOLDADURA: CONCEPTOS BÁSICOS, DISEÑO Y CALIFICACIÓN.**

La soldadura básicamente consiste en unir dos piezas mediante fusión de ellas o añadiendo material, usualmente de metales y termoplásticos.

Según datos históricos las primeras piezas soldadas aparecieron en la Edad de Bronce (5000 a.C), cuando los artesanos calentaban el metal y golpeaban una pieza contra otra para poder unir las.

Con el paso del tiempo y el avance tecnológico se han desarrollado varios tipos de soldadura entre ellas la soldadura blanda, fuerte, por difusión, por resistencias y la más común y con tasas de productividad altas en la industria, la soldadura por arco.

Durante la ejecución del proyecto, se decidió realizar el procedimiento con la soldadura por arco, específicamente el procedimiento FCAW<sup>8</sup>, debido a que en la industria es uno de los métodos más utilizados para soldar elementos metálicos con una alta tasa de productividad.

### **2.7.1 LA SOLDADURA COMO PROCESO TÉRMICO.**

Dentro del proceso de soldadura al existir la adición de energía, la cual es liberada en forma de calor, es un proceso térmico, a continuación se describirá brevemente en qué consiste este proceso.

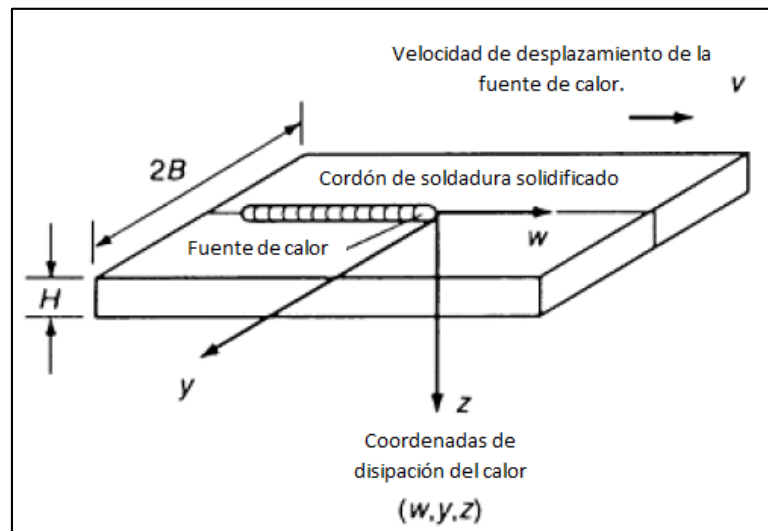
Cuando se suelda, la fuente de calor se mueve a una velocidad constante a lo largo de una trayectoria recta. El resultado final, ya sea después de la iniciación o terminación de la fuente de calor, es la formación de un estado térmico transitorio en la junta o pieza soldada.

---

<sup>8</sup> FCAW: Flux Cored Arc Welding, tipo de soldadura por arco semiautomático o automático, en la cual el electrodo es un alambre de tipo tubular y la protección a la soldadura se da por medio de un gas.

En algún momento después de la terminación de adición de calor, se llegará a un equilibrio térmico con respecto al estado inicial de la aplicación de calor. (ASM, 2000)

Este proceso lo podemos apreciar en la siguiente ilustración.



**Figura. No. 12. Proceso térmico de soldadura.**  
Fuente. (ASM, 2000)

El intenso calor de la soldadura hace que se funda el metal y forme un charco de material fundido por lo que el calor se disipa a través de diferentes espacios, parte de este calor se lleva el metal base, otra parte se pierde en la columna del arco o el metal y la otra superficie es la que rodea la placa de modo que se forman tres zonas metalúrgicas tras la finalización del ciclo térmico, estas zonas son:

- Zona de del metal de aporte (MA)
- Zona afectada por el calor (ZAC)
- Zona del metal base (MB)

Las variaciones en la temperatura y las velocidades de enfriamiento posteriores determinan las estructuras de la ZAC, mientras que los gradientes térmicos, la velocidades de solidificación y las velocidades de enfriamiento en

el charco de suelda lo cual se le considera límite líquido-sólido determinan la estructura de solidificación del material de aporte (MA).

En general la variación de temperaturas, cerca del punto de fusión del material es lo que determina los cambios metalúrgicos que se den en este proceso. (ASM, 2000)



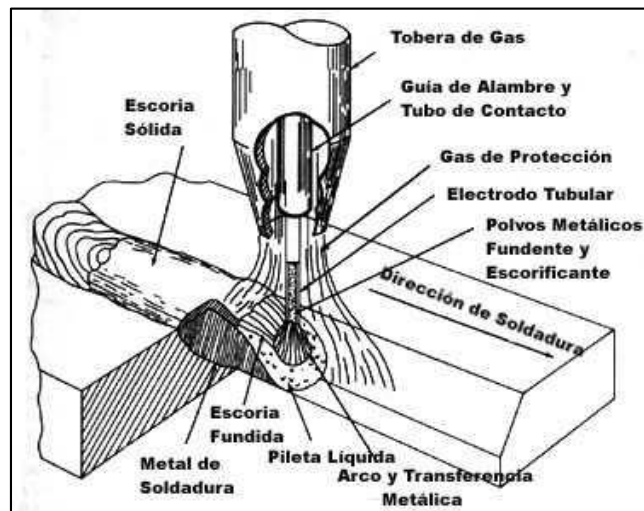
**Figura. No. 13. Zonas formadas por la soldadura.**  
Fuente: (Monografias.com)

### 2.7.2 SOLDADURA FCAW

Dado que se ha hablado del proceso de soldadura por arco en general, ahora se describirá el procedimiento que se utilizará para el desarrollo de este proyecto.

La soldadura por arco eléctrico con alambres tubulares (FCAW) es un proceso de soldadura que utiliza un arco entre un electrodo continuo metálico y el charco de soldadura. El proceso puede tener una protección proveniente de un fundente contenido en el interior del electrodo tubular, con o sin protección adicional proveniente de una fuente externa de gas.

En la figura Nro. 14 se muestra como se realiza el proceso de soldadura FCAW.

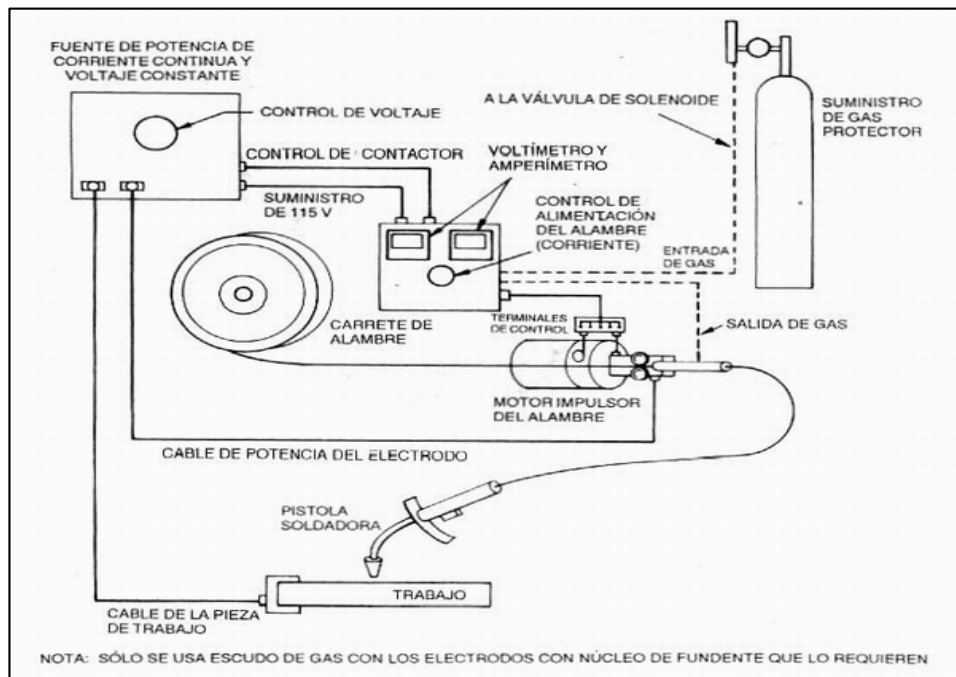


**Figura. No. 14. Procedimiento de soldadura FCAW.**  
Fuente. (ASM, 2000)

Es necesario aclarar que dentro de la clasificación y tipos de electrodos para FCAW, estos en su mayoría de veces se encuentran dentro de la clasificación para electrodos de tipo GMAW<sup>9</sup>. Para la protección se utiliza un gas que en muchas aplicaciones es dióxido de carbono o mezclas de este con argón o algún gas inerte. (de Vedia & Svoboda, 2004)

A continuación en la figura. No. 15 se muestra un esquema de la configuración de un equipo para soldadura FCAW.

<sup>9</sup> GMAW: Gas Metal Arc Welding, tipo de soldadura que necesita de un gas de protección y el electrodo es un alambre continuo.



**Figura. No. 15. Configuración de equipo para soldar con FCAW.**  
Fuente: (de Vedia & Svoboda, 2004)

## 2.8 DISEÑO Y CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

### 2.8.1 ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.

El WPS<sup>10</sup> el cual también se conoce como EPS (Especificaciones del Procedimiento de Soldadura), es un documento en el cual se especifican los parámetros necesarios para realizar un trabajo de soldadura.

Este documento debe ser aprobado mediante una calificación, la cual se la hace en base a una norma. Con ello se puede ejecutar la soldadura y posterior a esto proceder a la inspección.

<sup>10</sup> WPS: Welding Process Specification (EPS). Documento en el cual se indican las especificaciones del procedimiento de soldadura

### 2.8.1.1 CONTENIDO DEL DOCUMENTO.

El WPS relaciona las variables a considerar en la realización de una soldadura específica, determina la ejecución de las pruebas de calificación tanto de proceso y procedimiento como del operario de soldadura.

Dentro del EPS existen tres tipos de variables las cuales se relacionan entre sí, estas variables son:

- **Variables esenciales:** Son aquellos parámetros que de tener algún cambio, significarían una afectación a las propiedades mecánicas de la soldadura.
- **Variables no esenciales:** Son los parámetros que en caso de ser cambiados, no afectan a las propiedades mecánicas de la soldadura y se evita recalificar el WPS.
- **Variables suplementarias:** Son aquellas que por requerimientos de secciones del código se necesita tomarlas en cuenta.

### 2.8.2 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

El registro de calificación de procedimiento o también conocido como PQR<sup>11</sup> es un documento el cual sirve para registrar las pruebas realizadas en una soldadura. Con el fin de garantizar el procedimiento y con ello una buena calidad de la soldadura.

Aquí se adjuntan las variables del procedimiento, así como los resultados de los ensayos realizados, tanto destructivos como no destructivos.

---

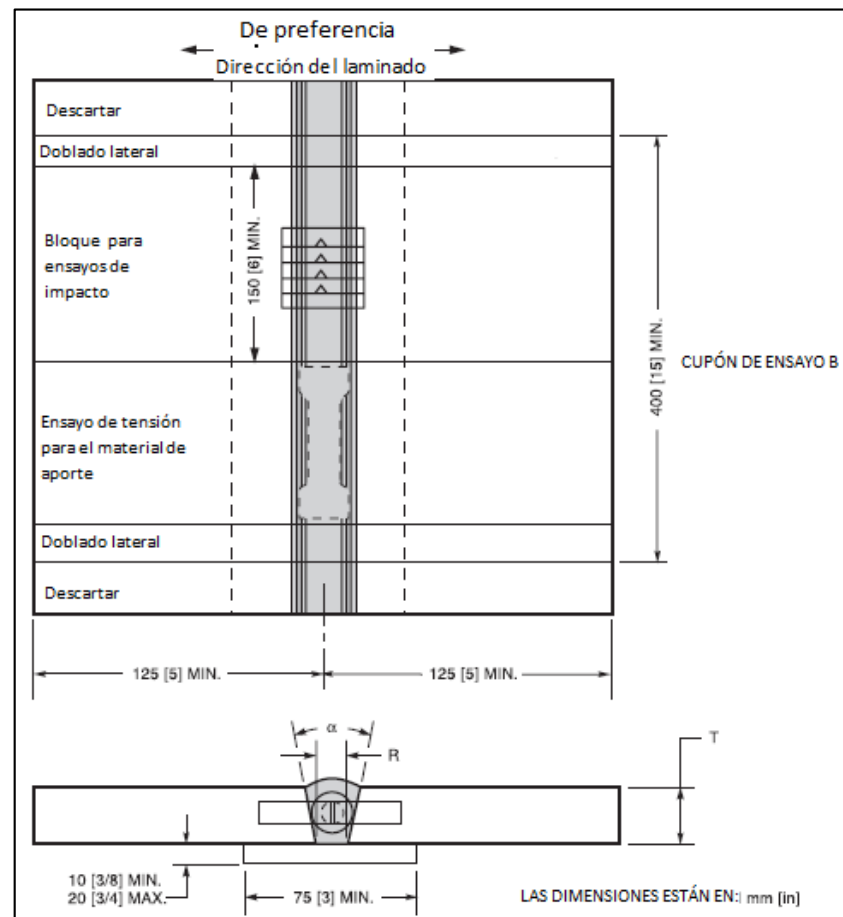
<sup>11</sup> PQR: Registro de calificación del procedimiento de soldadura.



### 2.8.3 ENSAMBLES DE PRUEBA Y ESPECÍMENES.

Para que una soldadura pueda ser calificada, es necesario hacer el procedimiento de soldadura sobre ensambles de prueba o cupones, los cuales son pedazos del material que va a ser soldado y tienen medidas específicas según la norma que se esté aplicando, el espesor del material así como el tipo y número de ensayos que se vaya a realizar.

Según la norma AWS D1.5 a la cual se está remitiendo la ejecución de este proyecto, existen tres tipos de especímenes, de los cuales se seleccionó el espécimen B, cuyas medidas y ensayos se muestran en la figura No. 16.



**Figura. No. 16. Dimensiones del cupón de soldadura.**  
Fuente: (Norma AWS. D1.5.)

Además de los ensayos que se muestran en la figura, se pueden realizar pruebas complementarias como por ejemplo dureza, macro y micrografía, etc.

Por lo cual estos esquemas pueden verse modificados. Las pruebas complementarias a realizarse serán hechas según las necesidades de profundidad en conocimiento de propiedades, variaciones, etc. Según lo requiera la ejecución del presente proyecto.

## **2.9 METALURGIA DE LA SOLDADURA.**

Cuando se realiza una soldadura debido a las variaciones de temperatura, ocurren cambios en la estructura del material, como por ejemplo crecimiento de granos, transformación de fases entre otras. Es por ello que este proyecto busca conocer los cambios microestructurales que se puedan dar y cómo estos podrían afectar o no a las propiedades mecánicas de la soldadura, los siguientes temas abarcan una base para poder comprender las variaciones en la estructura metalográfica del acero.

### **2.9.1 PARÁMETROS IMPORTANTES EN LA SOLDADURA.**

Dentro del cambio microestructural en una soldadura, existen parámetros que influyen directamente. A continuación se detallan los parámetros importantes dentro del proyecto realizado.

#### **2.9.1.1 CALOR APORTADO**

Cuando se suelda, el área donde se aporta calor es relativamente pequeña respecto de las dimensiones de la pieza.

El calor que se aporta a una pieza cuando se suelda por arco eléctrico está dada en función de algunas variables entre ellas tenemos:

- Velocidad de energía de ingreso, la cual depende de la máquina y su calibración y está expresada en Watts.
- Distribución de calor aportado.

- Velocidad de soldadura.

Es necesario notar que no todo el calor generado en la fuente ingresa a la pieza a soldar y que tampoco se distribuye de manera uniforme. Parte de este calor se pierde en el ambiente, otra parte ingresa al material base, de manera que este calor altera la estructura metalográfica del material formando la ZAC. Y por último el calor que funde el material, sea este de aporte o no.

### **2.9.1.2 ABSORCIÓN DE ENERGÍA**

La energía absorbida por la pieza es la responsable de llevar a cabo la soldadura desde la formación del charco de metal fundido, el establecimiento del campo de temperaturas lo cual depende del tiempo, a través de toda la soldadura y los cambios estructurales con sus propiedades mecánicas resultantes. Los fenómenos físicos que influyen en la absorción de energía por parte de la pieza son particulares de cada proceso de soldadura.

Para una fuente de poder, la cantidad de energía que es absorbida por la pieza es función de la naturaleza del material, del tipo de fuente de calor y de los parámetros del proceso de soldadura.

### **2.9.1.3 TEMPERATURA PICO**

La temperatura pico o máxima dentro de un proceso de soldadura es de vital importancia si se desea predecir o interpretar transformaciones metalúrgicas en un punto en el metal sólido de la soldadura o cercano a ella.

En general para tener una estructura metalográfica adecuada que garantice las propiedades mecánicas deseadas se deben controlar las temperaturas en el proceso pre, durante y post soldadura.

#### **2.9.1.4 VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO**

La energía térmica aplicada a la zona soldada es distribuida por conducción en la soldadura. Durante el enfriamiento la disminución de la temperatura se produce por una combinación de pérdida de calor al ambiente, transferencia de calor al metal base y al metal de soldadura. De esta forma, la velocidad de enfriamiento que tiene lugar en la soldadura es una función de la velocidad de disipación de energía. La estructura metalúrgica final de la zona soldada es determinada principalmente por la velocidad de enfriamiento desde la temperatura máxima o pico alcanzada durante el ciclo térmico de la soldadura.

#### **2.9.1.5 CORRIENTE**

Este parámetro es de mucha importancia dentro del proceso de soldadura, ya que la corriente está ligada al voltaje y la velocidad de avance en el proceso y dependiendo de ellas será la tasa de calor aportado a lo largo del proceso. En general si las demás variables inherentes al proceso se mantienen constantes, el amperaje de soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo o con la rapidez de fusión siguiendo una relación no lineal. Al variarse la velocidad de alimentación, el amperaje de soldadura varía de manera similar si se emplea una fuente de potencia de voltaje constante.

De incrementarse la corriente durante el proceso de soldadura y el resto de variables mantenerse constantes, resultará en lo siguiente:

- Aumento en la penetración del material de aporte, lo cual se verá reflejado en la profundidad y ancho del cordón.
- Aumento en la tasa de deposición de material.
- Aumento en el tamaño del cordón de soldadura.

### **2.9.1.6 POLARIDAD.**

Se utiliza el término de polaridad para describir la conexión eléctrica de la pistola de soldadura con relación a los terminales de una fuente de potencia que produzca corriente continua (soldadora).

Cuando el cable de la pistola está conectada al terminal positivo de la máquina la polaridad se la denomina corriente directa electrodo positivo (DCEP), también se la conoce como polaridad invertida. Mientras que si la pistola está conectada al terminal negativo de la máquina se la conoce como polaridad negativa (DCEN) conocida también como polaridad directa.

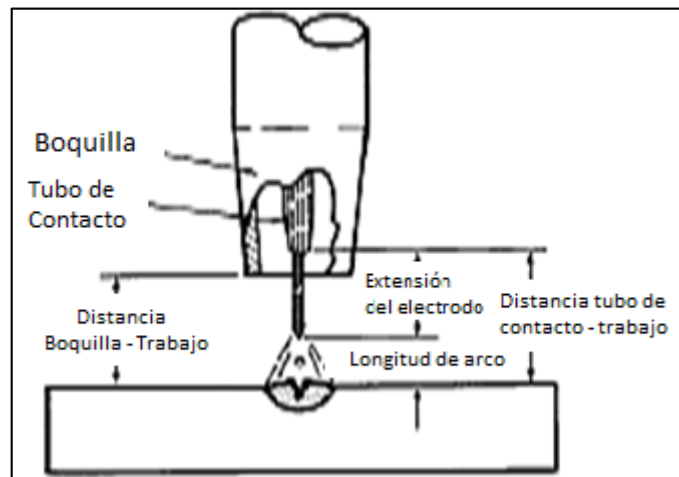
De la polaridad depende la cantidad de calor liberada en el electrodo y en el metal base. De esta forma mediante el cambio de polaridad se puede concentrar el calor donde más se desee.

Cuando lo requerido sea que el material base deba calentarse más que el electrodo, es conveniente trabajar con polaridad directa. En cambio si lo que se desea es calentar más el electrodo y no el material base, se deberá trabajar con polaridad inversa. (Giachino & Weeks, 2007)

La polaridad se selecciona también según el tipo de electrodo que se utilice, en general los fabricantes establecen el tipo de polaridad a usarse con cada electrodo.

### **2.9.1.7 VOLTAJE Y LONGITUD DE ARCO**

Para hacer una definición más clara de lo que se conoce como longitud o voltaje de arco, es necesario explicarlo a través de la siguiente figura.



**Figura. No. 17. Longitud de arco de soldadura.**  
Fuente. (Formación de Soldadores Blogspot, 2013)

El voltaje de arco depende de la longitud del arco así como de muchas otras variables, como la composición y dimensiones del electrodo, el gas protector y la técnica de soldadura.

Si todas las variables se mantienen constantes, el voltaje del arco se relaciona directamente con la longitud del arco. Aunque la variable que interesa y que debe controlarse es la longitud del arco, es más fácil vigilar el voltaje, por ello se la conoce como voltaje de arco.

En general los efectos negativos de no tener una adecuada longitud de arco son los siguientes:

- Para un arco que es demasiado corto experimenta cortocircuitos momentáneos que causan fluctuaciones de la presión, bombean aire hacia el chorro del arco y producen porosidad.
- Para un arco demasiado largo, se tiende a un movimiento lateral aleatorio que afecta tanto la penetración como al aspecto del cordón.
- Arcos demasiado largos puede romper el escudo de gas de protección y generar defectos en la soldadura

Como se mencionó anteriormente la longitud de arco y su variación también provoca defectos particulares según la protección gaseosa que se utilice, en el caso del proyecto se utilizará dióxido de carbono como se explicará posteriormente, para este tipo de protección un arco largo produce salpicaduras excesivas y también porosidad; si el arco es demasiado corto, la punta del electrodo hará cortocircuito con el charco de soldadura, causando inestabilidad. (Facum inspsold Blogspot, 2007)

### **2.9.1.8 VELOCIDAD DE AVANCE**

La velocidad de avance se define como la tasa de movimiento lineal del arco a lo largo de la junta a soldar. Si se tienen parámetros constantes en el proceso de soldadura, la penetración máxima se da cuando se tienen velocidades intermedias de avance.

Si la velocidad de avance se disminuye, se aumenta la deposición del metal de aporte por unidad de longitud, por lo tanto se reduce la penetración, además de producir un cordón de soldadura más ancho.

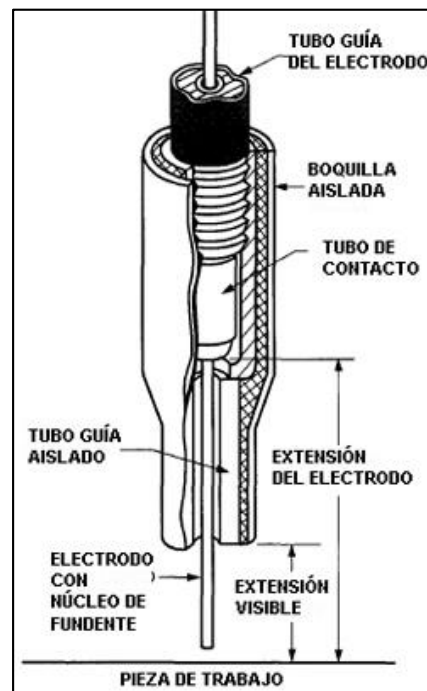
Mientras que si se aumenta la velocidad de avance, en un principio esta aumentará la cantidad de energía térmica transferida al metal base, ya que el arco actúa directamente sobre el metal base, si se continúa aumentando la velocidad de avance esta hará que se transfiera menos energía térmica. Por lo tanto al aumentar la velocidad de avance, la fusión del material base primero se aumenta y luego se disminuye.

Pero si se tiene una excesiva velocidad, evitará que haya penetración del material de aporte, además de producir socavaduras a lo largo del cordón.

Las velocidades de avance son de vital importancia en el proyecto, ya que de ellas dependerá en su mayoría la cantidad de calor aportado por unidad de longitud en los cupones de soldadura. Por lo tanto se debe hacer un riguroso control de los tiempos que el soldador se demora efectuado el cordón de soldadura.

### 2.9.1.9 EXTENSIÓN DEL ELECTRODO

Se define como extensión del electrodo a la distancia entre el extremo de la boquilla de contacto y la punta del electrodo como se muestra en la figura No. 18.



**Figura. No. 18. Extensión del electrodo en una pistola para soldar.**  
Fuente. (Tecnoficio, s.f.)

Cuando se aumenta la extensión del electrodo, se produce un aumento en su resistencia eléctrica, debido a este aumento la temperatura del electrodo se eleva lo que causa un pequeño incremento en la tasa de fusión de este.

Una mayor resistencia eléctrica produce una caída de voltaje mayor entre la punta del electrodo y el material de trabajo.

Según algunos autores se recomienda que la extensión del electrodo debe estar entre 6 a 12 mm para transferencia en cortocircuito y entre 12 y 25 mm para la transferencia tipo spray.



## **2.9.2 EL ACERO Y SUS TRANSFORMACIONES**

El acero al ser un material alotrópico<sup>12</sup>, existe en diferentes formas de estructura cristalina según la temperatura a la cual se encuentre, por lo tanto es necesario conocer este comportamiento y de alguna manera prever lo que sucederá con las propiedades del material si pasa por estos cambios.

En los siguientes temas a tratar se dará una breve introducción y explicación de estos cambios estructurales, para comprender mejor la parte del proyecto referente a metalografía y su posterior análisis.

### **2.9.2.1 MICROCONSTITUYENTES DEL ACERO.**

Como se mencionó anteriormente, ya que el acero tiene alotropía es necesario conocer en qué formas podría transformarse su estructura.

A continuación una breve descripción.

#### **2.9.2.1.1 FERRITA**

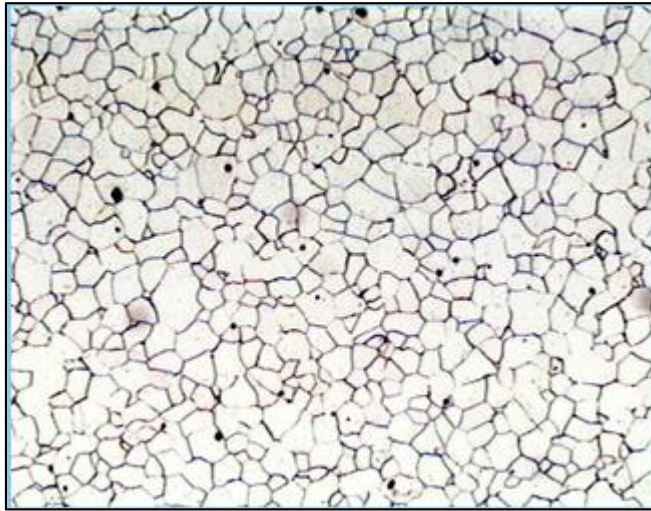
La ferrita es considerada una solución de carbono en hierro puro alfa ( $\alpha$ ). La solubilidad de este micro-constituyente es muy baja (0.008% de C a los 727 °C aproximadamente) por lo que se la considera hierro alfa puro.

Entre sus propiedades más importantes están:

- Es el constituyente más blando y dúctil de los aceros.
- Tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC).
- Dureza de 95 Vickers, resistencia a la rotura de 2.7 MPa.
- Presenta propiedades magnéticas.

---

<sup>12</sup> Alotropía: Propiedad del acero, en la cual la estructura cristalina, cambia dependiendo de la temperatura a la cual se encuentre el material.



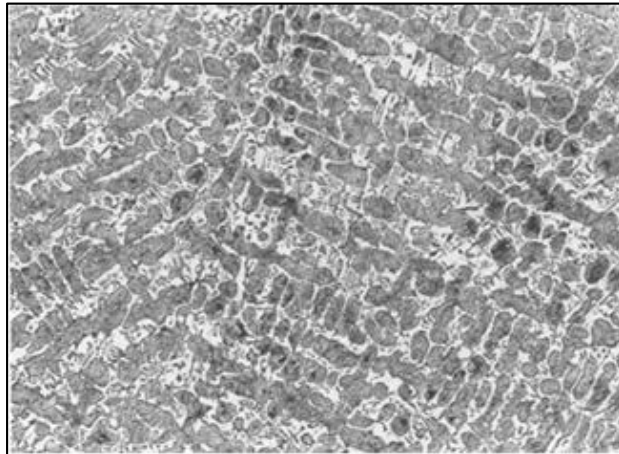
**Figura. No. 19. Ferrita en acero con bajo contenido de carbono (100x)**  
Fuente: (Departamento de Física Aplicada "Universidad de Sevilla", s.f.)

#### **2.9.2.1.2 CEMENTITA.**

La cementita también conocida como carburo de hierro cuya fórmula química se presenta como  $Fe_3C$ , tiene un contenido de carbono de 6.67% en peso, es un compuesto intersticial duro y frágil, de baja resistencia a la tensión (5000 psi aprox.) pero de alta resistencia a la compresión.

Es una de las estructuras más duras que se puede encontrar en un diagrama (HRC 68 Aprox.). Su estructura cristalina es ortorrómbica. (Avner, 1995)

La cementita es magnética hasta los 218°C.

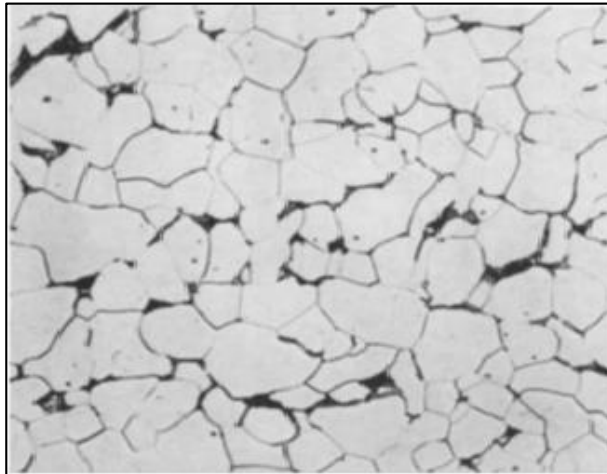


**Figura. No. 20. Cementita (Zonas oscuras), perlita (Zonas claras).**  
Fuente. (Universidad Tecnológica de Pereira, 2014)

### 2.9.2.1.3 PERLITA

La perlita es una mezcla (cementita y ferrita) que contiene 0,77 % de C y se forma a 727°C a un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar. Se le da este nombre porque tiene la apariencia de una perla al observarse microscópicamente a pocos aumentos.

Cuando esta estructura laminar es muy fina es decir las láminas son muy delgadas, la perlita se ve al microscopio óptico como negra. Sin embargo ambas fases, ferrita y cementita en condiciones normales de ataque son blancas. El color oscuro o negro lo producen el gran número de límites de grano existentes entre la matriz ferrítica y las láminas de cementita. Se comprende que cuanto más anchas sean las láminas la tonalidad se irá aclarando hasta poder distinguirse las distintas láminas.



**Figura. No. 21. Microestructura de perlita.**  
Fuente: (Universidad Tecnológica de Pereira, 2014)

Se pueden encontrar dos tipos de perlita, cada una con sus particularidades, a continuación:

- **Perlita Fina:** La perlita fina, se puede obtener cuando se enfría dentro del horno bastante rápidamente o cuando se deja enfriar el acero al aire, tiene aproximadamente 300 Brinell de dureza y la separación entre láminas es bastante corta.
- **Perlita Gruesa:** Este tipo de perlita tiene una separación entre las láminas mucho más amplia que en la perlita fina, aproximadamente el doble y una dureza de 200 Brinell, que se obtiene por enfriamiento muy lento dentro del horno.

#### 2.9.2.1.4 AUSTENITA

La austenita, también conocida como hierro gamma ( $\gamma$ ). Esta es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900°C a 1400°C. La austenita es dúctil, blanda y tenaz.

Se presenta de como una estructura cristalina de forma cúbica centrada en las caras (FCC). Esta estructura permite una mejor difusión con el carbono,

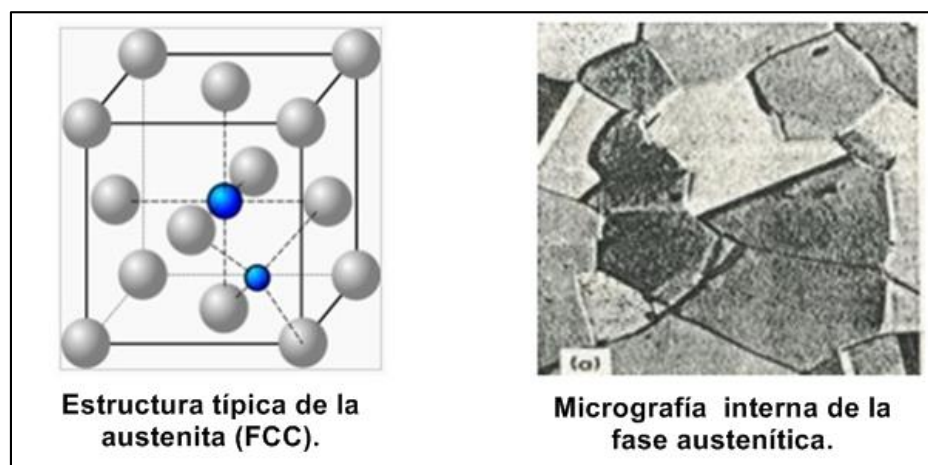
acelerando así el proceso de carburación del acero. La solubilidad máxima es sólo del 2.11%.

Este micro constituyente se lo incluye dentro de las estructuras de temple pues a partir de ella, cuando el enfriamiento es suficiente rápido para impedir la difusión del carbono, se forma la estructura típica del temple llamada martensita. En aceros aleados o hipereutectoides, se encuentra a temperatura ambiente ya que no alcanzan a transformar completamente a martensita durante el temple; en este caso se la denomina “austenita retenida”. También se encuentra a temperatura ambiente en aceros inoxidable de alto níquel, denominados austeníticos, y en los de alto Mn (12 %).

La austenita está formada por cristales cúbicos de hierro gamma con los átomos de carbono intercalados en las aristas y en el centro.

Las propiedades de este micro constituyente son:

- Resistencia a la tracción: 860 a 1030 MPa.
- Alargamiento: 30 a 60 %
- Dureza: 300 HB (Larre, 2013)

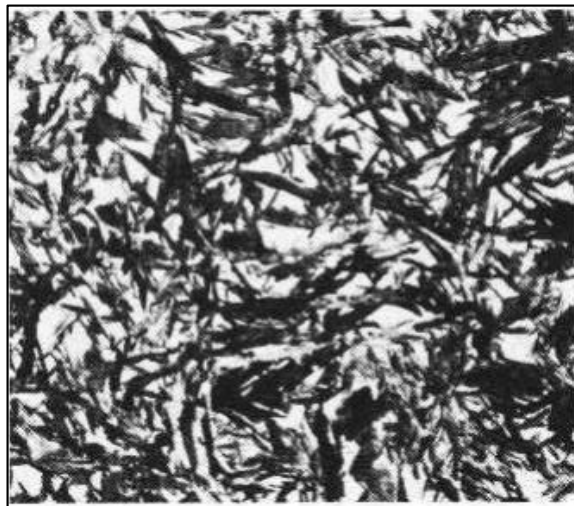


**Figura. No. 22. Microestructura de la austenita.**  
Fuente: (Universidad Tecnológica de Pereira, 2014)

### 2.9.2.1.5 MARTENSITA

La martensita se obtiene por enfriamiento rápido de la austenita, sin que exista difusión. Es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro  $\alpha$ , por lo que la estructura cristalina es tetragonal centrada.

La figura. No. 23 muestra la metalografía de un acero par herramientas en la cual se encontró martensita.



**Figura. No. 23. Agujas de martensita (negras) en una matriz de austenita retenida (blanca).**

Fuente. (Larre, 2013)

### 2.9.2.1.6 BAINITA

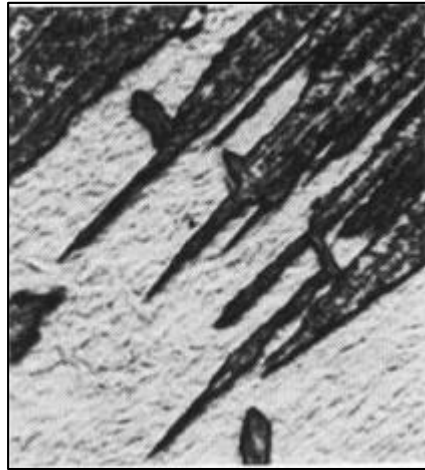
La Bainita es un constituyente intermedio entre la austenita y la martensita. Se trata de un agregado de cementita y ferrita, este micro constituyente fue descubierto por Edgar Bain, por ello su nombre.

Los aceros bainíticos son más duros y resistentes que los perlíticos porque tienen una estructura más fina a base de partículas diminutas de cementita en una matriz ferrítica por este motivo exhiben una combinación de resistencia y ductilidad.

Dentro de esta estructura se puede encontrar dos tipos los cuales son:

- **Bainita superior:** En este tipo de bainita la cementita está en forma de barras. Un problema es que esta estructura en ocasiones es demasiado fina para ser resoluble en el microscopio óptico.

En la figura. No. 24 se muestra la metalografía de un acero SAE 4350, en la cual se puede observar bainita superior.



**Figura. No. 24. Bainita superior (Áreas oscuras) 1500x.**  
Fuente. (Larre, 2013)

- **Bainita inferior:** Este tipo de bainita se forma por transformación isotérmica entre 250 y 350°C. Debido a que la difusión del carbono es baja a esta temperatura, la Cementita precipita internamente en las placas de ferrita. A diferencia de lo que sucede en la Martensita en la cual los carburos precipitan en dos o más direcciones, en la Bainita inferior la precipitación de carburos tiene una orientación predominante en la cual la plaquillas de carburo de hierro forman 55° con el eje longitudinal de la aguja de ferrita. En la formación de Bainita inferior, la ferrita se produce a partir de la Austenita por desplazamiento de corte y luego precipita la Cementita al interior de la ferrita. Se observa al microscopio óptico en forma de placas oscuras.

En la figura. No. 25 se muestra la metalografía de un acero templado en agua, donde se puede observar Bainita inferior en una matriz de martensita.

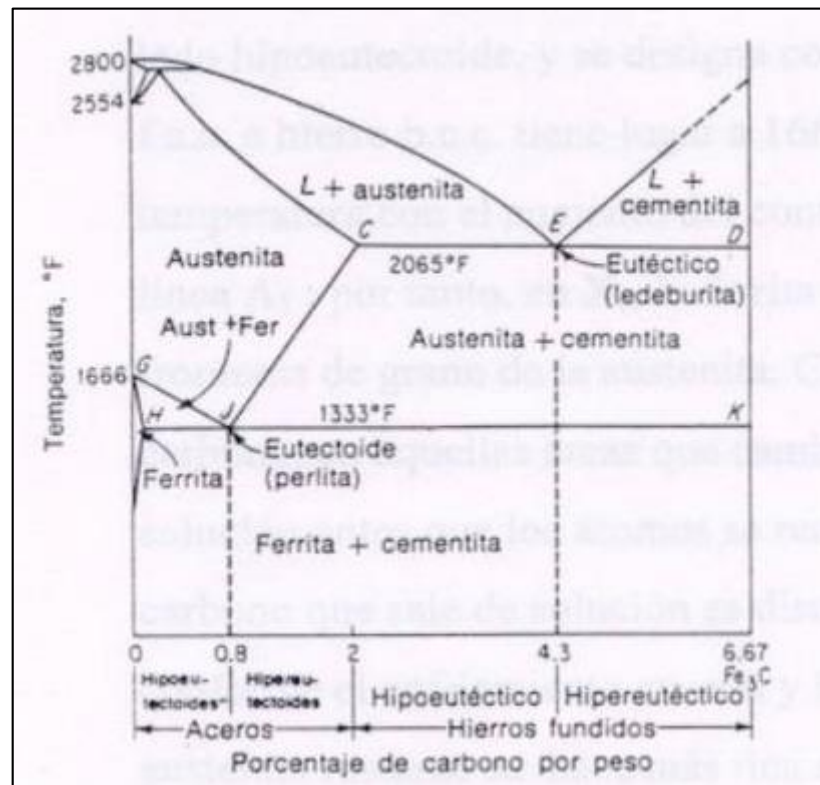


**Figura. No. 25. Agujas oscuras de bainita inferior en matriz de martensita (500x)**  
Fuente. (Larre, 2013)

#### **2.9.2.2 DIAGRAMA HIERRO - CARBONO**

Este diagrama se obtiene como su nombre lo indica a partir del hierro y carbono, también se lo conoce como diagrama de equilibrio de fases y representa las transformaciones que sufren los aceros al carbono en función de la temperatura, teniendo en consideración que estos procesos se están realizando muy lentamente, de manera que estos cambios tienen suficiente para tiempo completarse. (Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", 2013)



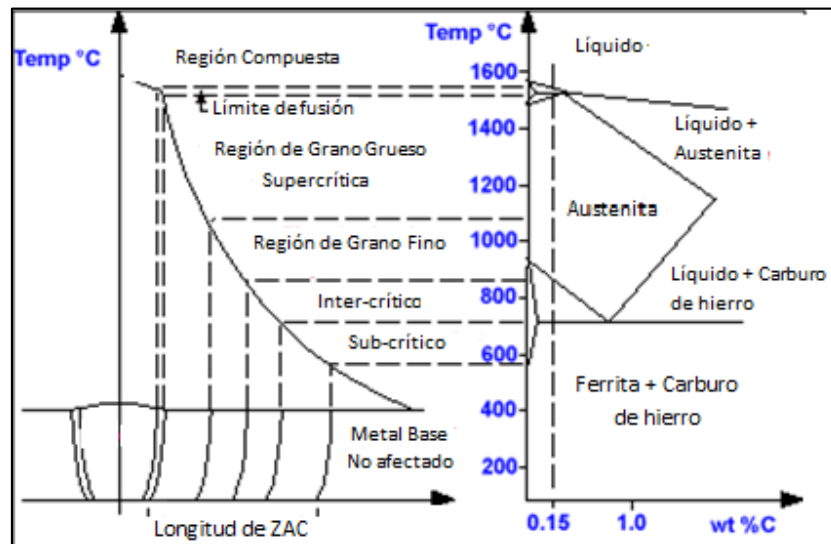


**Figura. No. 26. Diagrama Hierro – Carbono.**  
 Fuente: (Universidad Tecnológica de Pereira, 2014)

### 2.9.3 ZONA AFECTADA POR EL CALOR

La zona afectada por el calor o ZAC, es el volumen de material que se encuentra entre el material de aporte de la soldadura y el material base, cuyas propiedades han sido alteradas debido al calor de la soldadura.

Esta zona se la puede llamar crítica ya que aquí se encuentra el mayor cambio metalográfico del material y además es donde existe una mayor probabilidad que el material falle debido al cambio de sus propiedades iniciales.



**Figura. No. 27. Transformaciones del acero según la temperatura**  
Fuente: (hcmut.edu)

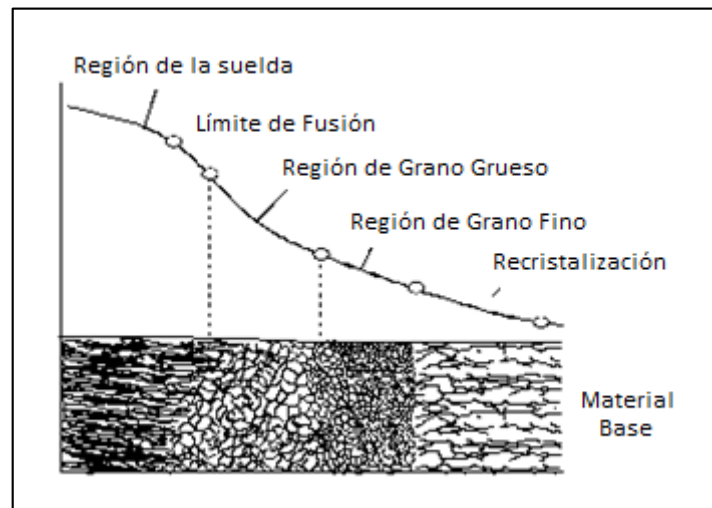
Las transformaciones que se dan en esta zona dependen del tipo de material, del procedimiento de soldadura, así como el precalentamiento y post calentamiento que se le dé al material.

Es importante notar que no toda la ZAC tiene un mismo tipo de estructura, esto se da debido a las temperaturas que se alcanza en cada zona, así como velocidades de enfriamiento, etc. Adyacente al límite de fusión se encuentra la zona de grano grueso la cual se forma cuando sobrepasamos temperaturas de 1100 °C pero menores a la temperatura de fusión.

Seguido de esto se encuentra la zona de grano fino, la cual debido a un menor calor, no proporciona la suficiente energía para que los grano crezcan.

En la zona inter-crítica existe una descomposición de perlita en granos más finos. Y la zona sub-crítica donde existe una recuperación de los granos que han sido deformados a lo largo de este proceso térmico.

En la figura. No. 28 se puede observar como ocurren las transformaciones de grano a lo largo de la ZAC.

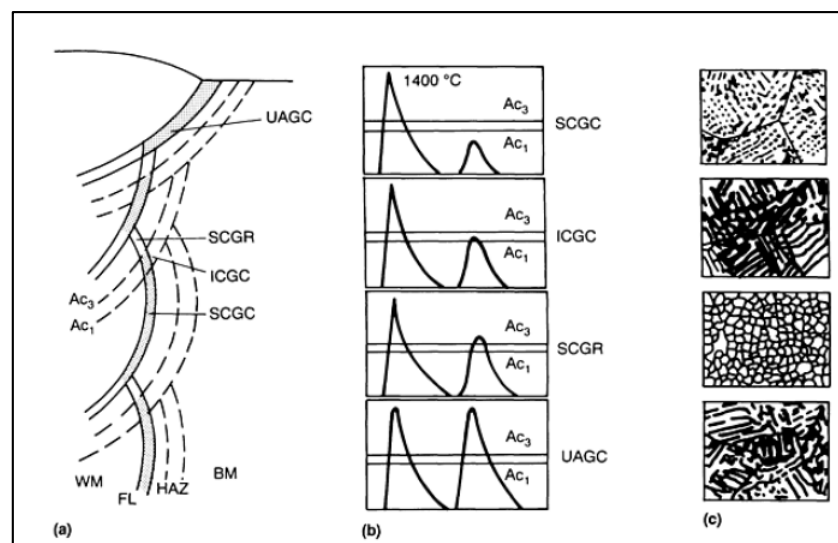


**Figura. No. 28. Transformaciones de grano a lo largo de la junta soldada.**

Fuente: (Sepúlveda Bello)

### 2.9.3.1 SUBZONAS DEL CICLO TÉRMICO DE LA SOLDADURA.

Cuando se hace una soldadura con varios pases, las transformaciones de grano sufren alteraciones más específicas, es aquí donde se forman las sub-zonas del ciclo térmico de la soldadura.



**Figura. No. 29. Sub-zonas de la ZAC, en múltiples pases.**

Fuente: (ASM. Vol. 6)

A continuación se detallan las letras que se encuentran en el gráfico anterior.

- SCGC (Subcritically reheated grain – coarsened): Zona de grano grueso recalentada subcrítica por debajo de AC1 (Línea de transformación a perlita)
- ICGC (Intercritically reheated grain coarsened): Zona de grano grueso recalentada intercrítica entre AC1 y AC3 (Línea de transformación a ferrita)
- SCGR (Subcritically reheated grain refined): Zona de grano normalizado.
- UAGC (Unaltered grain coarsened) : Zona de grano grueso recalentado.

### **2.9.3.2 DIAGRAMAS TTT**

Un diagrama TTT (temperatura, tiempo, transformación) o curva S resume las posibles transformaciones micro estructurales para un acero, este diagrama es de importancia, sobre todo para el diseño de tratamientos térmicos así como para la interpretación de las microestructuras resultantes después de los mismos.

Es necesario aclarar que estos diagramas son distintos, todo depende del tipo de acero y la composición.

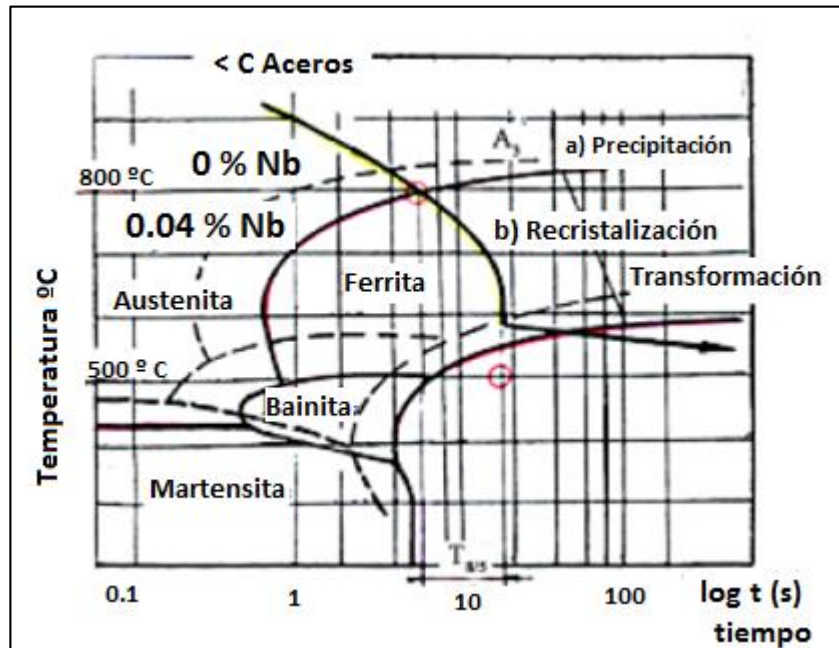


Figura. No. 30. Diagrama TTT para el acero ASTM A588.  
Fuente: (Grote & Feldhusen, 2014)

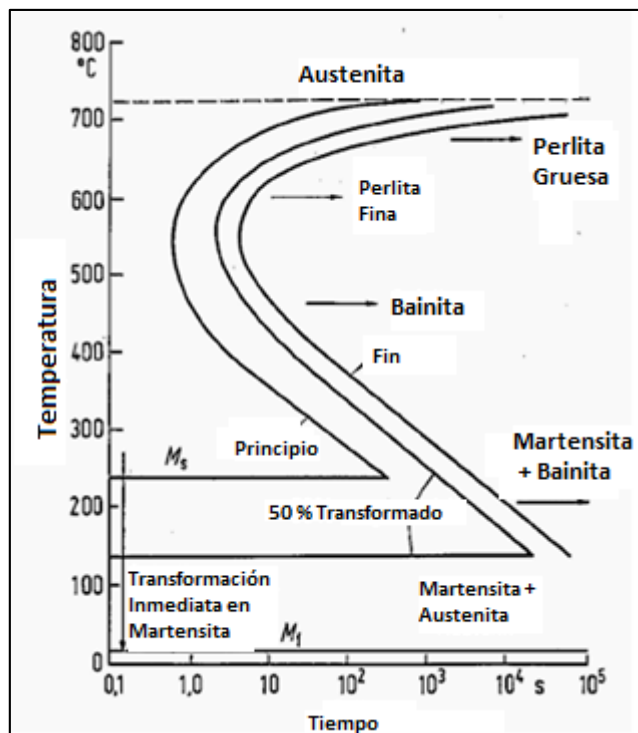


Figura. No. 31. Diagrama TTT para el acero ASTM A36.  
Fuente: (Grote & Feldhusen, 2014)

## **CAPÍTULO III**

### **PARÁMETROS DE SELECCIÓN, EJECUCIÓN DE LA SOLDADURA Y ENSAYOS**

En el presente capítulo se dará una descripción más detallada de cómo se llevó a cabo la parte práctica del proyecto, haciendo énfasis a la ejecución del procedimiento de soldadura, los ensayos realizados y en base a qué normas se efectuaron.

Es menester aclarar que el análisis de los resultados que se obtuvieron aquí, así como la tabulación de datos, entre otros, se encuentra en el capítulo posterior y se complementan con los anexos del proyecto.

#### **3.1 PARÁMETROS DE SELECCIÓN PARA EL WPS.**

Dentro del proyecto previamente se decidió sobre algunos parámetros para en base a ello seleccionar un WPS para realizar el estudio.

A continuación se detallan los parámetros en los cuales se basó para la selección del WPS.

##### **3.1.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE PROCESO DE SOLDADURA.**

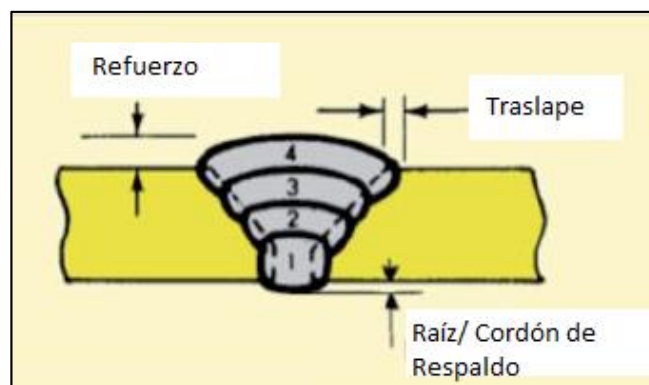
En la selección del proceso de soldadura a utilizar se tomaron en cuenta algunos aspectos para la decisión, entre ellos se encuentran:

- El proceso debe ser uno de los que más se utilice en las aplicaciones dentro de la industria de puentes metálicos.
- Tasas de aportación de material mayores que otros procesos.

Conocidos estos aspectos se seleccionó para el proyecto el proceso de soldadura FCAW, cuyos detalles se trataron en el capítulo anterior.

### 3.1.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE PENETRACIÓN EN LA JUNTA.

Para el proyecto se decidió llevar a cabo una junta de penetración completa CJP<sup>13</sup>, en la cual la suelda penetra todo el espesor de la junta.



**Figura. No. 32. Junta tipo CJP.**  
Fuente: (IPLOCA, 2013)

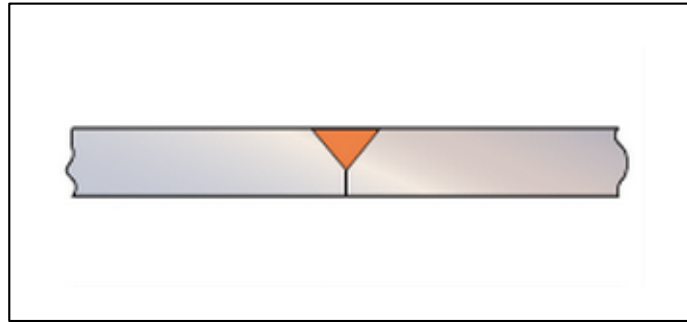
Entre las razones para elegir este tipo de penetración se encuentra:

- Mejor visualización de la ZAC.
- Debido a una mayor aportación de calor, las condiciones de análisis se vuelven más críticas por lo que el análisis se vuelve más completo.

Dado el concepto de CJP es necesario definir el concepto de PJP<sup>14</sup> el cual hace referencia a una junta de penetración parcial en la cual la soldadura no penetra en todo el espesor del material.

<sup>13</sup> CJP: Complete Joint Penetration: Junta de penetración total. La suelda penetra en todo el espesor de la junta.

<sup>14</sup> PJP: Partial Joint Penetration: Junta de penetración parcial. La soldadura no penetra en todo el espesor del material.



**Figura. No. 33. Junta tipo PJP.**

Fuente: (IPLOCA, 2013)

### 3.1.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE JUNTA

Para la selección del tipo de junta basándose en la norma AWS D1.5 y los parámetros antes seleccionados, se decide utilizar la junta tipo V simple la cual dentro del código se encuentra designada como la junta B-Ua-2GF.

Se toma en consideración esta junta debido a que:

- La penetración de junta es total. (CJP)
- El tipo de junta seleccionado es el que más se utiliza en la industria, dada su facilidad de preparación.

### 3.2 ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

El WPS o especificaciones del procedimiento de soldadura como se explicó anteriormente muestra las pautas bajo las cuales se debe llevar a cabo desde la selección del material, la preparación de la junta, la ejecución de la soldadura y el tratamiento posterior a ella.

Para el proyecto se utilizó un WPS, el cual es válido para aceros estructurales dentro de los cuales se encuentran el ASTM A588 y el ASTM A36 los cuales son parte del proyecto, además abarca varios espesores de material con lo cual permite usar libremente los espesores seleccionados, mencionados anteriormente.

Los detalles del documento se encuentran en el Anexo. No 1.



### **3.3 DISEÑO DEL CUPÓN DE SOLDADURA.**

Para tener un adecuado diseño del cupón de soldadura, es necesario tomar en cuenta qué tipos de ensayos se van a realizar y que estos estén dentro de la norma, algunos de estos aspectos son:

- Tipo de junta y sus dimensiones.
- Tipo de soldadura.
- Dimensiones de los especímenes para las probetas de ensayos.
- Ubicación de los especímenes dentro del cupón de soldadura.

La norma AWS D1.5 brinda según los requerimientos, formatos guías para el diseño del cupón y los especímenes que son requeridos, pero como se mencionó anteriormente se pueden aumentar o cambiar los tipos de especímenes según los ensayos que se requieran realizar.

Para el caso de este proyecto se tomó el cupón de la figura 5.2 de la norma AWS D1.5, que es adecuado para la verificación de un WPS, el cual aplica para el proyecto.

Debido a que es necesario realizar ensayos de metalografía y dureza para estudiar la ZAC, se rediseñó el cupón de soldadura, por lo tanto los especímenes para los diferentes ensayos también cambiaron, de tal forma que se puede observar su distribución final del cupón en el Anexo No 2.

### **3.4 PREPARACIÓN DE CUPONES DE SOLDADURA.**

#### **3.4.1 VERIFICACIÓN DEL MATERIAL**

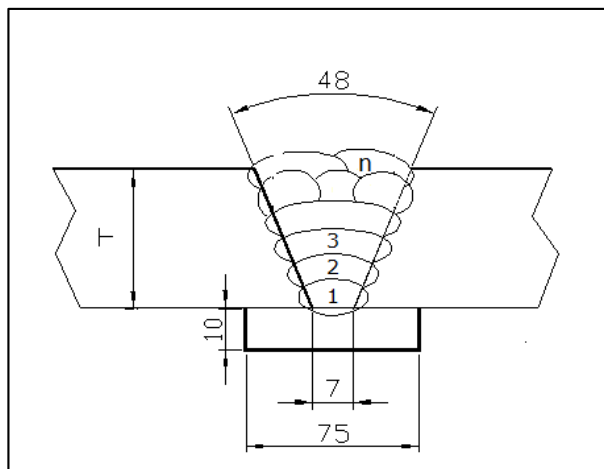
Es necesario garantizar que el proyecto se realiza con los materiales propuestos, con ello se evitarán varios contratiempos entre ellos la alteración de resultados, falta de coherencia con los datos, etc.

Para verificar que los materiales sean aceros ASTM A588 y ASTM A36. Se solicitó los respectivos certificados de las empresas que proveen cada tipo de acero.

Los certificados se encuentran el Anexo No 3.

### 3.4.2 PREPARACIÓN DE LAS JUNTAS

En la preparación de las juntas se debe tener en cuenta las dimensiones que se establecen en el WPS para lo cual a continuación se muestra en la figura No. 34.



**Figura. No. 34. Dimensiones de la junta a preparar en los cupones.**

Para la preparación de este tipo de junta se realizaron los siguientes pasos:

- **Corte de las planchas de acero con plasma.**

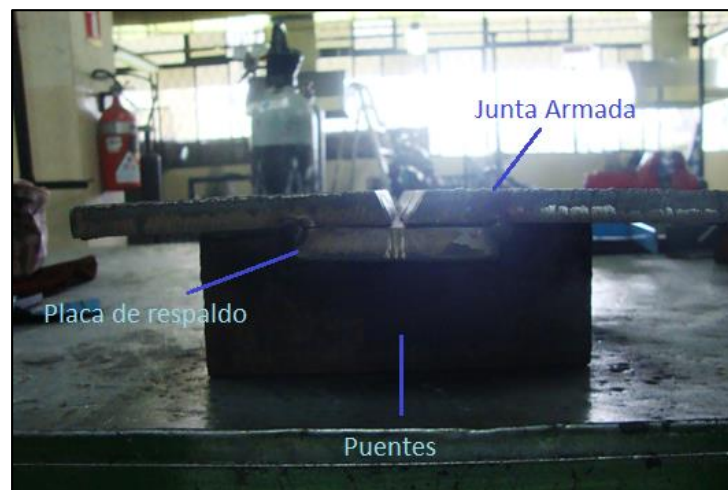
Aquí se da la medida del ángulo aproximado del bisel para la junta. Para posterior a ello amolar y dar las dimensiones finales a las planchas antes de armar el cupón.

- **Armado de la junta con sus respectivos puentes.**

El armado de la junta consiste en colocar en la posición adecuada las planchas de tal manera que se cumpla con las dimensiones establecidas.

Para este tipo de junta es necesario a más de controlar la separación entre planchas y el ángulo, la placa de respaldo que va en la parte inferior de tal manera que se encuentre centrada en relación a la junta.

Además se deben colocar puentes, los cuales son placas transversales que van a lo largo de la junta, con el fin de dar soporte al cupón y evitar el pandeo de este debido la contracción del material y con ello la pérdida de la horizontalidad después de haber soldado.



**Figura. No. 35. Junta de soldadura armada con todas sus partes.**

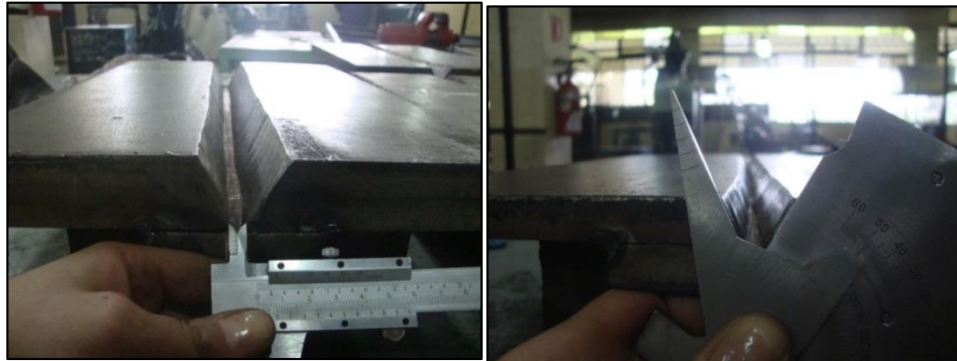
- **Identificación y etiquetado de las juntas**

Se identifica a cada cupón. Para lo cual se los etiqueta con el tipo de material, espesor y proceso de soldadura a realizar.

- **Comprobación de medidas de la junta**

Se debe realizar una comprobación tanto al ángulo de abertura de la junta así como la separación entre placas, cuyas medidas vienen dadas en el WPS.

Para el proyecto se realizó la comprobación de la junta a cada uno de los cupones de soldadura.



**Figura. No. 36. Comprobación de la separación entre placas y ángulo de abertura de la junta.**

### **3.5 EJECUCIÓN DE LA SOLDADURA**

Para la ejecución de la soldadura, es necesario tener en cuenta aspectos que incluyen un antes, durante y después al proceso, el control de estos parámetros garantizan una mejor calidad en la junta soldada y por lo tanto en el rendimiento de esta.

#### **3.5.1 ASPECTOS ANTES DE LA EJECUCIÓN DE LA SOLDADURA.**

Dentro de estos aspectos se incluye la preparación tanto de materiales, insumos, soldadora y soldador.

- **Preparación de materiales e insumos.**

En este aspecto se debe tener listo tanto los cupones de soldadura, así como los diferentes insumos y materiales que se van a utilizar.

- **Preparación de la máquina.**

Para la preparación de la máquina es necesario un conocimiento de la misma así como su funcionamiento. Se soldó con una máquina soldadora semi – automática marca Miller, modelo Millermatic 300. Los detalles de

funcionamiento, así como su ciclo de trabajo y especificaciones se encuentran en el Anexo. No. 4.



**Figura. No. 37. Máquina soldadora Millermatic 300.**

- **Parámetros de soldadura.**

Para realizar un buen control de calor aportado en la soldadura, se necesita tener presente los parámetros que rige el WPS para llevar a cabo el procedimiento.

A continuación en la tabla No 5. Se muestran los parámetros de soldadura para el procedimiento.

**Tabla. No. 5. Parámetros de soldadura para efectuar el procedimiento**

Parámetro	Cantidad
Amperaje	215 - 235 A
Voltaje	24 - 25 V
Velocidad de Avance	17 -20 cm/min
Electrodo	E81T1Ni1
Pre calentamiento	Mínimo 20 °C - Máximo 230 °C
Calor Aportado	17 - 19 KJ/cm por cordón
Gas de Protección	CO2 10 - 15 ltrs/ min
Limpieza entre pases	Mecánica con grata

- **Velocidades de avance y tiempos de soldado.**

La velocidad de avance es un parámetro del cual se depende mucho para realizar un adecuado control de la soldadura. Aunque de esta depende en gran parte el calor que se aporta, no es posible en la práctica controlarla directamente, para lo cual lo que se hace es controlar el tiempo en el cual el soldador se demora en ejecutar el cordón de soldadura a lo largo de la junta, para obtener este tiempo se lo hace a través de las siguientes expresiones.

$$\text{Entrada de Calor} \left[ \frac{J}{mm} \right] = \frac{\text{Voltaje} * \text{Amperaje} * 60}{\text{Velocidad de Avance} \left[ \frac{mm}{min} \right]}$$

De esta expresión se despeja la Velocidad de avance, de manera que se obtiene:

$$\text{Velocidad de avance} \left[ \frac{mm}{min} \right] = \frac{\text{Voltaje} * \text{Amperaje} * 60}{\text{Entrada de Calor} \left[ \frac{J}{mm} \right]}$$

Tomando en consideración valores promedios de los parámetros de soldadura de la tabla No 5.

- Amperaje: 225 A.

- Voltaje: 24.5 V
- Entrada de calor: 18 KJ/cm

Se obtiene una velocidad de avance de 18.37 cm/ min

Para calcular el tiempo se utiliza la siguiente expresión con los siguientes datos:

$$Tiempo [min] = \frac{Longitud\ de\ la\ junta\ (mm)}{Velocidad\ de\ Avance\ (\frac{mm}{min})}$$

Dónde:

- Longitud de la junta: 400 mm
- Velocidad de avance: 183.37 mm/min

Obteniendo un tiempo para soldar la junta de: 2.17 minutos que es igual a 130.6 segundos.

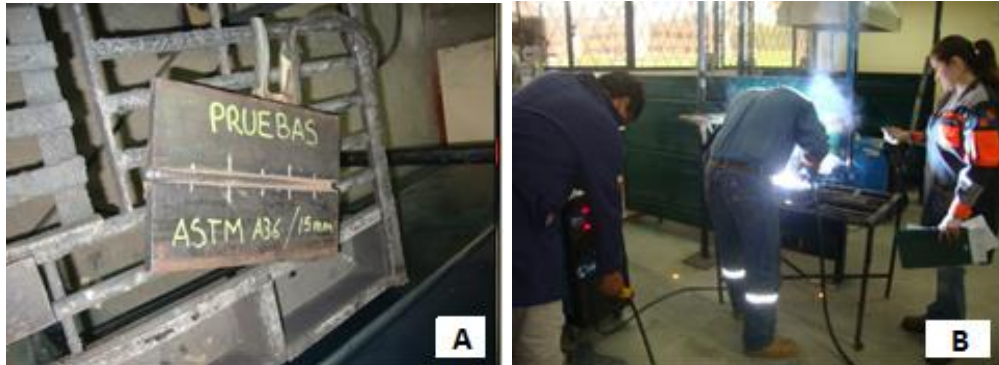
Este es el valor medio de tiempo en el cual debe oscilar la ejecución de un cordón de soldadura a lo largo de la junta para de esta manera poder tener una aportación de calor de acuerdo a lo requerido en el WPS.

- **Pruebas de soldadura.**

Debido a que la velocidad de avance es un parámetro que se debe controlar rigurosamente, ya que de esta depende el aumento o decremento del calor aportado, es necesario efectuar pruebas con el soldador, para de esta manera evaluar los tiempos que se demora en soldar un cordón e ir solicitando que se incremente o disminuya su velocidad hasta que esta sea igual o lo más parecida a la que se calculó anteriormente.

Para ello se elaboró un cupón de pruebas similar a los cupones de soldadura del proyecto y se soldaron varios cordones de manera que se midió el tiempo de ejecución de los mismos, así como el amperaje en la

máquina soldadora para conocer el comportamiento de la misma y de esta manera saber las variaciones de corriente que se pueden presentar.



**Figura. No. 38. A.- Cupón de pruebas. B.- Medición de Parámetros y tiempos de ejecución.**

### **3.5.2 ASPECTOS DURANTE LA SOLDADURA.**

- **Segmentación de la longitud total de soldadura.**

Para poder realizar un mejor control del tiempo de ejecución de cada cordón de soldadura, se realizaron marcas transversales a la longitud total de la junta de manera que se facilite la observación y control en el tiempo que ejecuta el soldador cada cordón.

Estas marcas fueron hechas de una longitud de diez centímetros de separación entre ellas, como se indica en la figura No. 39.





**Figura. No. 39. Control de tiempos de soldados con marcas transversales en cupón.**

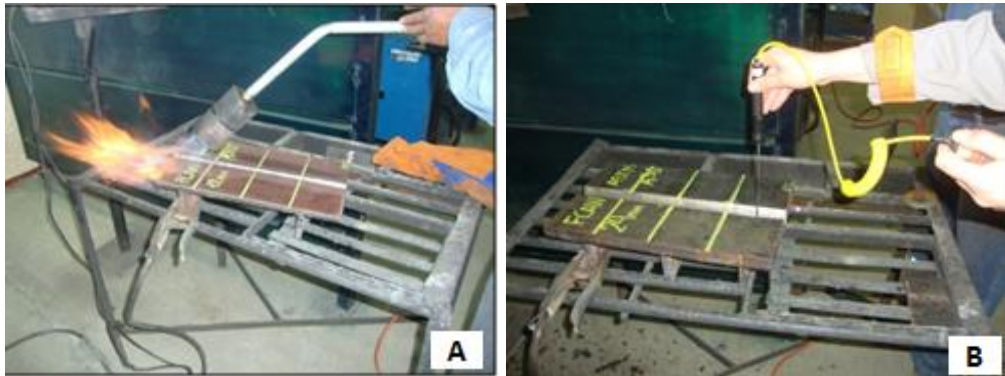
- **Pre calentamiento de cupones.**

El pre calentamiento de los cupones se lo realizó con un mechero y GLP aplicando la llama sobre la superficie del cupón.

Es necesario realizar un pre calentamiento para acondicionar el material y evitar que se produzca un choque térmico el momento que se empieza a soldar.

Pese a que para soldar espesores bajos no es necesario un pre calentamiento, se realizó uno leve, de aproximadamente 50°C a los cupones de espesor 12 milímetros con el fin de deshumidificar la junta.

En el caso de los cupones de espesores más altos (20, 24 y 30 milímetros) se realizó un pre calentamiento mayor de aproximadamente 100 °C en cada uno de ellos.



**Figura. No. 40. A. Precalentamiento de cupones. B. Controles de temperatura de precalentamiento.**

- **Control del calor aportado.**

Para realizar un control al calor aportado es necesario cronometrar el tiempo en el cual el soldador se demora en realizar cada cordón de soldadura.

Se realizó el control de manera que se cronometró el tiempo por tramos según las segmentaciones realizadas explicadas anteriormente, así se puede pedirle al soldador que aumente o disminuya la velocidad con la que está soldando.



**Figura. No. 41. Medición del tiempo de ejecución de cada cordón de soldadura.**

Adicionalmente se utilizó una hoja de cálculo para realizar el control de la soldadura, de manera que el control sea más preciso en el momento que se ejecuta cada cordón. Se utilizó esta ayuda, ya que el momento de

realizar las pruebas se evidenció que el amperaje no es constante, es decir un amperaje es en el momento que el soldador empieza a soldar el cordón y otro amperaje es el que se obtiene una vez que se estabiliza el arco y se está soldando.

Con esta hoja de cálculo se coloca el valor del calor que se desea aportar de manera que con los datos de amperaje y voltaje que marque ese momento la máquina se obtiene el tiempo en segundos por tramo que el soldador debe demorar. También se hace más rápido el cálculo del calor aportado en cada cordón.



**Figura. No. 42. Cálculo del calor total aportado en la junta.**

El levantamiento de datos de las variables del proceso de soldadura, se pueden verificar en el Anexo. No. 5.

### **3.5.3 ASPECTOS DESPUÉS DE LA SOLDADURA DE CUPONES.**

- **Retiro de placa de respaldo y puentes de soldadura.**

Es necesario antes de comenzar con el corte de probetas y realización de ensayos, el retiro de los puentes de la junta, así como la placa de respaldo.

Hay que tomar en consideración que la norma AWS D1.5 (6.26.1.9) establece que para realizar una inspección visual a una junta se debe esperar al menos 48 horas después de la ejecución de la misma, siempre y cuando el acero sea ASTM [A709], caso contrario se puede comenzar a inspeccionar

inmediatamente después de haber soldado . El retiro de los puentes y placas de respaldo, se muestra en la figura No. 43.



**Figura. No. 43. Retiro de placa de respaldo y puentes en juntas soldadas.**

Cabe añadir que en este proceso se debe tener cuidado con no estropear la raíz de la junta. Ya que esto influiría directamente en el desempeño del material al someterse a los diferentes ensayos.

### **3.6 INSPECCIÓN VISUAL Y LÍQUIDOS PENETRANTES.**

Estos ensayos se encuentran dentro de los ensayos no destructivos, a continuación se da una breve muestra de cómo se llevaron a cabo estos ensayos.

#### **3.6.1 INSPECCIÓN VISUAL.**

La inspección visual debe llevarse a cabo según los parámetros de la norma AWS D1.5 los cuales están en la Parte D, desde los numerales 6.26.1.1 hasta el numeral 6.26.1.9. Cada uno de los requerimientos establecidos en estos numerales debe cumplirse.

Dentro de la inspección visual no se encontraron defectos que hagan descartables a los cupones, por lo que se realizó un ensayo de líquidos penetrantes para corroborar lo que se observó en este ensayo.



**Figura. No. 44. Cupones de soldadura para inspección visual A,B,C Acero ASTM A588 12, 20 y 30 mm de espesor respectivamente, D y E Acero ASTM A36, 12 y 24 mm.**

### 3.6.2 LÍQUIDOS PENETRANTES

Este tipo de ensayo es utilizado para detectar discontinuidades o defectos de tipo superficial. Es preferible realizar este ensayo además de la inspección visual ya que dará una mayor confiabilidad por si algún defecto se pasó por alto en la inspección visual.

Para la ejecución de este ensayo se basó en la norma ASTM E 1417 y E 165 en las cuales se encuentran los lineamientos e instrucciones básicas para la correcta aplicación de este ensayo.

### 3.6.2.1 PRODUCTOS UTILIZADOS

En la figura se muestra el Kit de tintas penetrantes utilizado para el ensayo



Figura. No. 45. Kit de tintas penetrantes. A. Limpiador B. Penetrante C. Revelador.

### 3.6.2.2 EJECUCIÓN DEL ENSAYO

- Limpieza de cupones

Se procede a realizar una limpieza general de cada cupón, haciendo énfasis en el cordón de soldadura, utilizando el spray limpiador.



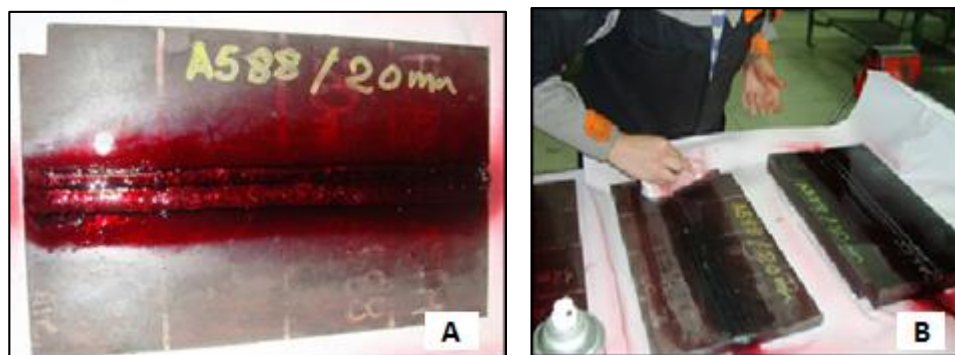
**Figura. No. 46. Limpieza de cupones de soldadura.**

- **Aplicación del Penetrante**

Después de la limpieza de los cupones se procede a colocar el spray penetrante a lo largo del cordón de soldadura. Es necesario que el penetrante actúe durante al menos 20 minutos para después proceder a la limpieza.

- **Limpieza del Penetrante**

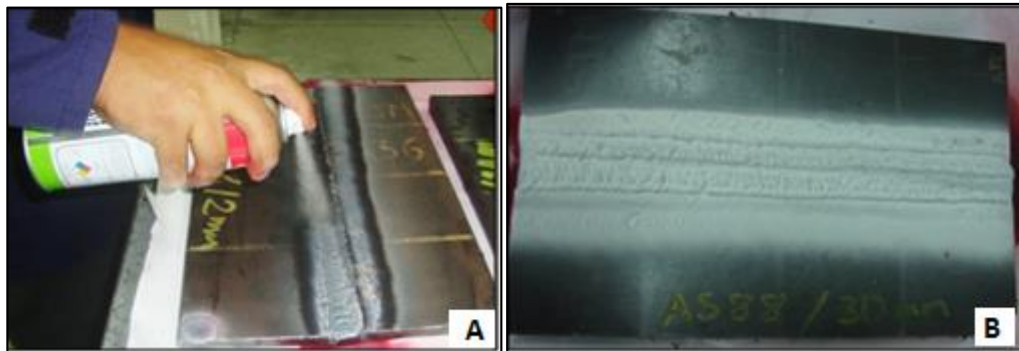
Con la ayuda de paños de papel se debe retirar el penetrante completamente de cada uno de los cupones de soldadura.



**Figura. No. 47. A. Cupón aplicado penetrante. B. Limpieza de penetrante.**

- **Aplicación del Revelador.**

Una vez limpios los cupones, se aplica el Revelador, haciendo énfasis en el cordón de soldadura. Después se debe esperar entre 5 y 15 minutos según recomendaciones del fabricante de líquidos penetrantes utilizado.



**Figura. No. 48. A. Aplicación del revelador. B Cupón listo para inspeccionar.**

### **3.6.2.3 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN**

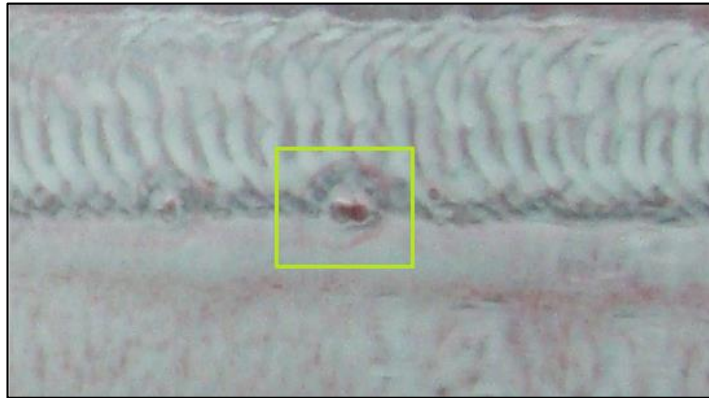
Los criterios de aceptación para líquidos penetrantes son los mismos criterios que la norma exige para la inspección visual.

### **3.6.2.4 RESULTADOS.**

En los cupones de acero ASTM A588 de 12, 20 y 30 milímetros, así como en el cupón de acero ASTM A36 de 24 milímetros no se encontraron discontinuidades.

En el cupón de acero ASTM A36 de 12 milímetros se encontró una porosidad de 1.68 milímetros, pero pasa la inspección visual y de líquidos penetrantes, ya que la norma establece que la porosidad no debe exceder a un poro cada 100 milímetros y dicha porosidad no debe tener un diámetro mayor a 2.4 milímetros.





**Figura. No. 49. Porosidad en cupón de acero ASTM A36 / 12 mm.**

Para tener ampliar la información con un informe del ensayo de líquidos penetrantes, favor remitirse al Anexo. No. 6

### **3.7 CORTE EN FRÍO DE PROBETAS.**

El corte en frío de las probetas para ensayos se realizó mediante el corte por chorro de agua automatizado.

Se empleó este tipo de corte ya que es necesario conservar los cambios micro - estructurales que se dan en el material después del proceso de soldadura, por lo cual no debe haber más aportación de calor. A continuación se dará una breve explicación de este tipo de corte.

El corte por chorro de agua es un proceso de tipo mecánico, mediante el cual se consigue cortar una variedad de materiales, haciendo impactar sobre éste un chorro de agua a gran velocidad.

Al ser un procedimiento de corte en frío este proceso esta demandado en todas las aplicaciones en las que el material no se pueda ver afectado por el calor. (FLOW WATER JET, 2015)

En las siguientes figuras (50 y 51), se muestra cómo se cortaron las probetas de cada cupón de soldadura.



**Figura. No. 50. Corte de cupón de soldadura mediante chorro de agua.**



**Figura. No. 51. Cupón de soldadura una vez realizado los cortes.**

### **3.8 PREPARACIÓN DE PROBETAS.**

Previo a la ejecución de ensayos mecánicos, es necesario preparar a las probetas.

En esta parte lo que se hace es bajar la sobremonta a las probetas tanto para ensayos de tracción y doblado, así como dar la dimensiones finales a cada espécimen antes de ensayarlo.



**Figura. No. 52. Rebajada de sobre - monta a probetas.**

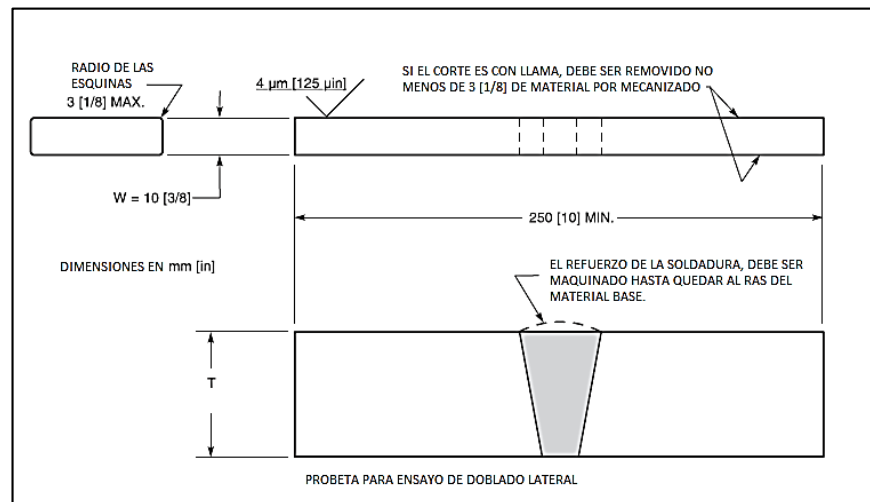
### **3.9 ENSAYO DE DOBLADO**

El ensayo de doblado, sirve para conocer la calidad de la soldadura, así como la ductilidad de la junta soldada.

Para el proyecto, se realizó un ensayo de doblado lateral, a continuación se detalla las dimensiones de las probetas así como el procedimiento para la ejecución del ensayo.

#### **3.9.1 DIMENSIONES DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE DOBLADO.**

Las dimensiones para las probetas de ensayo lateral están especificadas bajo la norma AWS. D1.5 las cuales se muestran a continuación.



**Figura. No. 53. Especificaciones de dimensiones de probetas para ensayo de doblado lateral.**

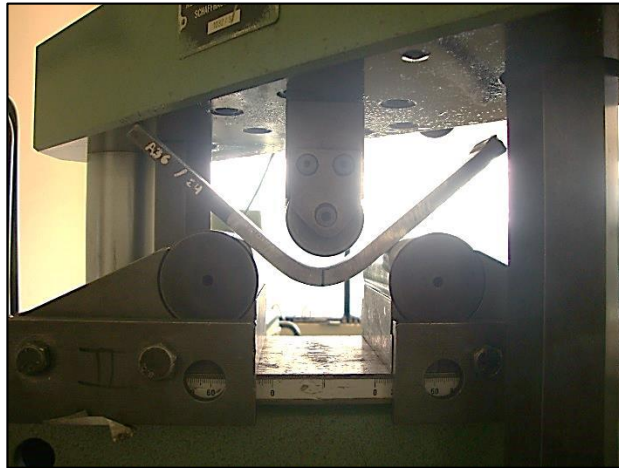
Fuente: (American Welding Society, 2008)

### 3.9.2 PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE DOBLADO.

Este ensayo se remite a la norma AWS. D1.5 numeral 5.18.3 en el cual se hace referencia a ciertas especificaciones del equipo las cuales se muestran en las figuras 5.14, 5.15 y 5.16. De la norma.

En general la probeta debe ser obligada a entrar en el dado, mediante la aplicación de una carga sobre el émbolo, hasta que la curvatura de la probeta llegue a ser tal que esta sea expulsada por debajo del dispositivo.

Este tipo de ensayo se debe realizar en una máquina de ensayos universales, como se muestra en la figura. No. 54.



**Figura. No. 54. Probeta sometida a ensayo de doblado.**

### **3.9.3 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA ENSAYO DE DOBLADO.**

Los criterios de aceptación para este ensayo están dados en el numeral 5.19.2 de la Norma AWS D1.5, estos se detallan a continuación.

La superficie convexa de un ensayo de doblado, deber ser examinada visualmente, en busca de discontinuidades, de encontrarse alguna, estas no deben ser mayores a:

- 3 mm [1/8 plg] medido en cualquier dirección de la superficie.
- 10 mm [3/8 plg] en total de la suma de todas las discontinuidades que sean superiores a 1 mm [1/32 plg], pero menos de o igual a 3 mm [1/8 plg]
- 6 mm [1/4 plg] máximo, grietas formadas en las esquinas , excepto cuando:

Cuando la grieta esquina resultó de una inclusión de escoria u otro tipo de discontinuidad por fusión, esta será de máximo 3 mm [1/8 plg].

Las muestras con grietas en esquinas superiores sin evidencia de inclusiones de escoria u otras discontinuidades de tipo fusión se tendrán en cuenta como máximo 6 mm [1/4 plg].

### 3.10 ENSAYO DE TRACCIÓN.

Este ensayo consiste en la aplicación de una carga axial a la probeta, para poder determinar su deformación plástica y el esfuerzo por rotura.

Las probetas están normadas mediante la norma AWS. D1.5 en 5.16.3 y específicamente en la figura. 5.10 de la norma.



**Figura. No. 55. Probetas antes de ser sometidas a ensayo de tracción.**

#### 3.10.1 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.

El procedimiento se encuentra detallado en AWS. D1.5 en el numeral 5.18.1, algunas de las pautas que da son:

- Antes de realizar el ensayo se debe medir la sección reducida.
- El área se puede obtener multiplicando el ancho por el espesor de la sección.
- La carga de rotura se calculará dividiendo la carga total de rotura para el área más pequeña de la probeta.

Este ensayo se lleva a cabo en una máquina de ensayos universales.

### **3.10.2 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA EL ENSAYO.**

Los criterios de aceptación para este ensayo se encuentran en la norma AWS. D1.5 en el numeral 5.19.1 en la cual especifica:

La resistencia a la tracción no deberá ser inferior al mínimo de la resistencia especificada en el rango de tracción del metal base que figuran en el PQR.

### **3.11 ENSAYOS DE IMPACTO**

Este ensayo es también conocido como ensayo de tenacidad, con él se puede determinar la cantidad de energía que un material absorbe, antes de producirse una fractura.

Este ensayo está regido bajo la norma ASTM E23, en la cual se detalla desde el procedimiento de cómo llevar a cabo el ensayo, así como el dimensionamiento de las probetas.

En el Anexo. No. 7. Se puede observar el dimensionamiento de las probetas para impacto.

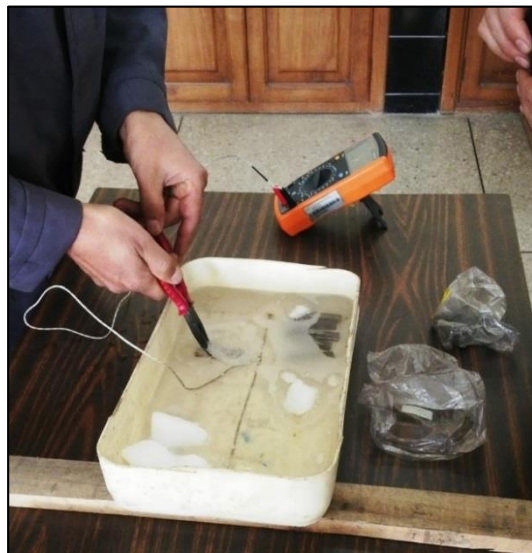
#### **3.11.1 PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE IMPACTO.**

El procedimiento para realizar este ensayo se encuentra detallado en el manual de la máquina para ensayos de impacto de la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE, en el cual se indica que la probeta debe ser colocada con la muesca hacia el lado de los apoyos de la máquina, para luego dejar caer el martillo para impactar a la probeta y tomar la medición en la regla graduada de la máquina.



**Figura. No. 56. Caída del péndulo para golpear a la probeta.**

Según las especificaciones AWS. D1.5 la temperatura a la cual se debe realizar el ensayo es de  $-30^{\circ}\text{C}$  la cual se logra disolviendo  $\text{CO}_2$  en estado sólido (conocido como hielo seco), en alcohol industrial.



**Figura. No. 57. Probetas sumergidas en solución de  $\text{CO}_2$  sólido con alcohol industrial.**



Es necesario bajar más la temperatura en el recipiente, ya que mientras se saca la probeta de la solución y se la coloca en los apoyos de la máquina, esta gana calor y la temperatura aumenta.

### **3.11.2 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA ENSAYO DE IMPACTO.**

Los criterios de aceptación se remiten a AWS D1.5 numerales 5.19.5 los cuales se puede ver en las tablas 4.1 y 4.2 de la norma, así como en 5.19.5.1 para el caso de los especímenes del proyecto, en los cuales dice lo siguiente:

- Resultados de las pruebas de CVN deberán cumplir o superar los valores indicados en la Tabla 4.1 o 4.2, o salvo que se especifique lo contrario en el contrato.
- La aceptación se basará en lo siguiente:

Para procesos como: SMAW, SAW, FCAW, GMAW los valores más altos y más bajos de los especímenes de prueba CVN serán ignorados y los tres valores restantes serán promediados. El promedio de las tres pruebas CVN restante deberán tener valores de energía que cumplan o excedan la mínima especificada. No más de una muestra pueden tener un impacto de valor energético inferior al mínimo especificado y no ninguna muestra tendrá un valor de menos de 2/3 del mínimo de valor especificado.

### **3.12 ENSAYOS DE METALOGRAFÍA Y MICRODUREZA**

El ensayo de metalografía sirve para revelar la estructura interna de un metal que a simple vista no se puede observar como microestructuras, inclusiones, etc.

Para obtener una adecuada visualización de la microestructura, es necesario obtener buenas muestras del metal a ser analizado.

Se incluye el ensayo de micro - dureza, ya que la preparación de la muestra sigue los mismos pasos que una metalografía, pero se utiliza un equipo diferente (micro - durómetro.)

### 3.12.1 PROCEDIMIENTO PARA ENSAYO DE METALOGRAFÍA

Las probetas deben llegar a tener un acabado tipo espejo, para lo cual se procede a lijar las probetas con lijas 80, 120, 160, 180, 200, 240, 360, 400, 600, 800, 1000, 1200 y 1500. De manera que al llegar a las lijas más altas, no deben quedar rayas sobre la superficie a estudiar.

Es necesario aclarar que cuando se lija manualmente, se debe lijar en una dirección hasta que las líneas dejadas por la lija estén en un solo sentido y luego girar la probeta 90° y continuar lijando, hasta que se desaparezcan las líneas por cada número de lija utilizada.



**Figura. No. 58. Lijado manual de probetas para metalografía.**

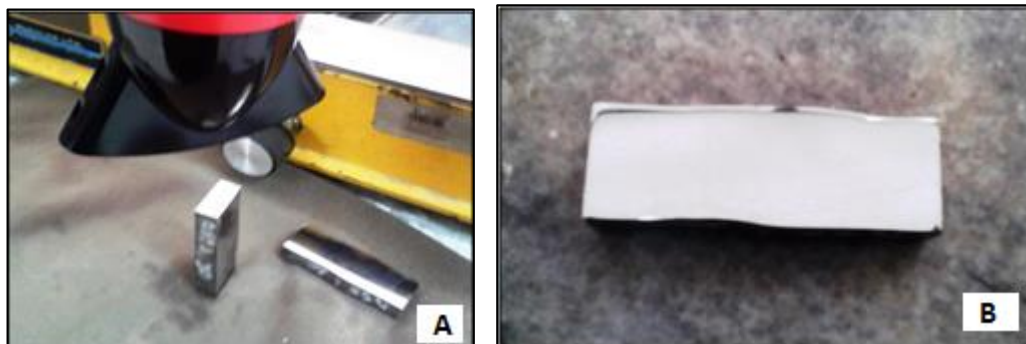
Después del lijado se procede al pulido fino el cual se realiza en una pulidora manual con una solución de alúmina en agua destilada.



**Figura. No. 59. A. Preparación de Alúmina. B Pulido fino de probetas.**

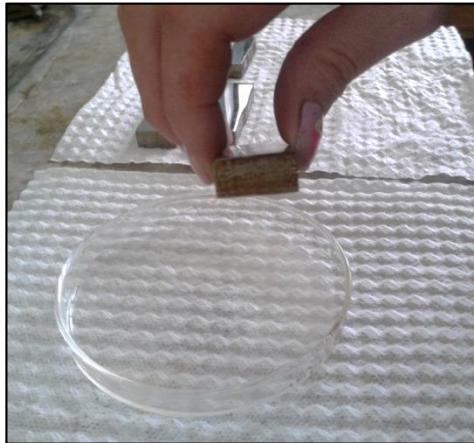
Después del pulido se puede notar que la probeta tiene un acabado similar a un espejo, es necesario lavar las probetas en agua teniendo cuidado de no rayarlas.

Al secar las probetas es recomendable utilizar una secadora eléctrica que permita quitar el exceso de agua, sin que la probeta sufra rayones.



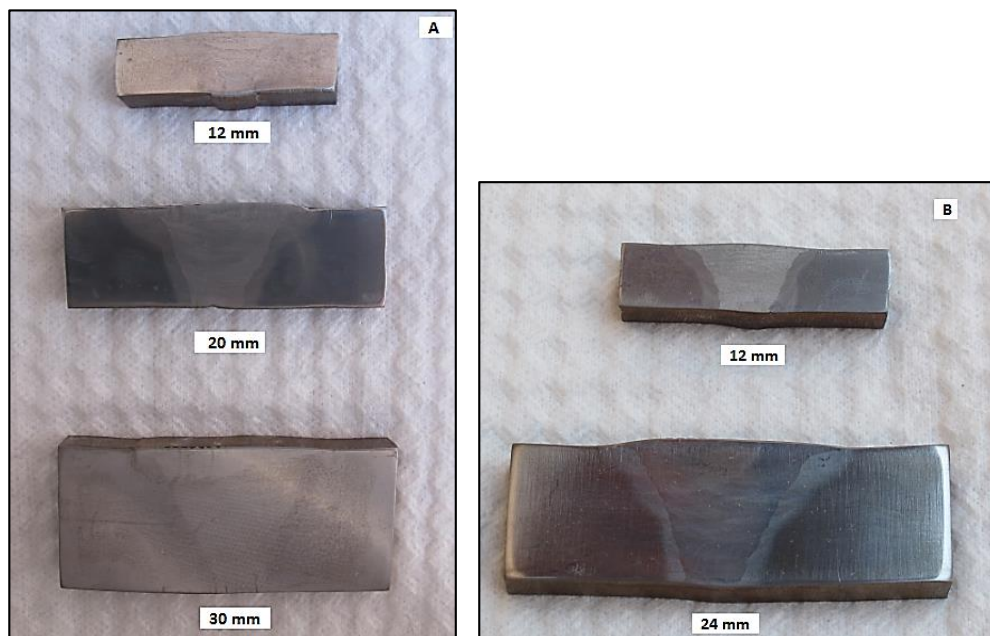
**Figura. No. 60. A. Secado de probetas. B Probeta para metalografía, pulida tipo espejo**

Una vez obtenida la probeta con un acabado tipo espejo se procede al ataque químico, en una solución de ácido nítrico en alcohol, esta solución se conoce como Nital y dependiendo de la concentración de ácido nítrico se conoce como Nital al %, para el caso de las probetas del proyecto se utilizó Nital al 2% durante un tiempo aproximado de 5 a 7 segundos.



**Figura. No. 61. Probeta siendo atacada con Nital al 2%.**

Después del ataque se debe lavar la probeta con agua y secarla nuevamente, para así llevarla al microscopio.



**Figura. No. 62. Probetas atacadas con Nital al 2%. A. Acero ASTM A588  
B. Acero ASTM A36**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se dará a conocer los resultados obtenidos para cada ensayo realizado y descrito en el capítulo anterior y su análisis.

Cualquier respaldo de información para cada ensayo se encuentra en la sección correspondiente a los Anexos.

#### 4.1 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.

##### 4.1.1 RESULTADOS

Previo a la ejecución del ensayo es necesario tener las medidas iniciales de las probetas antes de ser ensayadas. A continuación en la tabla. No. 6 se encuentran las dimensiones de cada espécimen, antes de ser ensayado.

**Tabla. No. 6. Dimensiones de secciones transversales de especímenes.**

Tipo de Material	Espesor (mm)	Designación	Ancho Promedio (mm)	Espesor Promedio (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
ASTM A36	12	T1	24,65	12,6	310,59
	12	T2	24,15	12,7	306,71
	24	T1	23,84	23,7	565,01
	24	T2	23,64	23,84	563,58
ASTM A588	12	T1	24,25	12,7	307,98
	12	T2	24,4	12,6	307,44
	20	T1	24,21	20,43	494,61
	20	T2	23,8	20,04	476,95
	30	T1	23,92	30,26	723,82
	30	T2	24,04	30,43	731,54

En las figuras 63 y 64 se muestran las probetas de tracción una vez ensayadas, según cada tipo de acero y sus espesores.

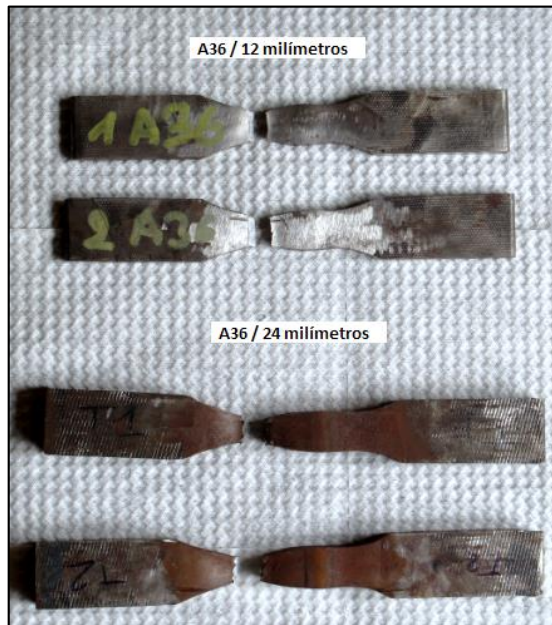


Figura. No. 63. Probetas ensayadas a tracción de acero ASTM A36.

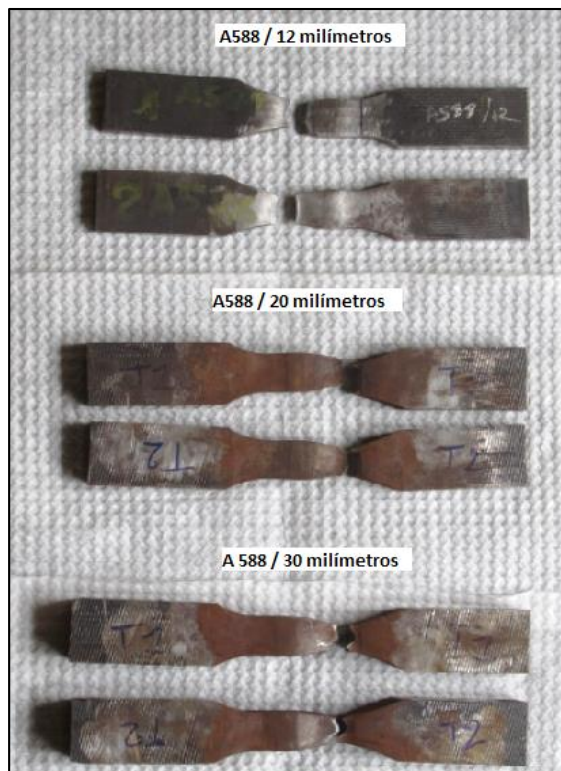


Figura. No. 64. Probetas ensayadas a tracción de acero ASTM A588.

A continuación se muestra los valores de carga máxima registrada sobre cada espécimen antes de la rotura y la resistencia a la tracción obtenida. Además de esta tabla los resultados obtenidos se encuentran en un informe técnico, el cual se encuentra en el Anexo No. 8

**Tabla. No. 7. Resultados de los ensayos de tracción**

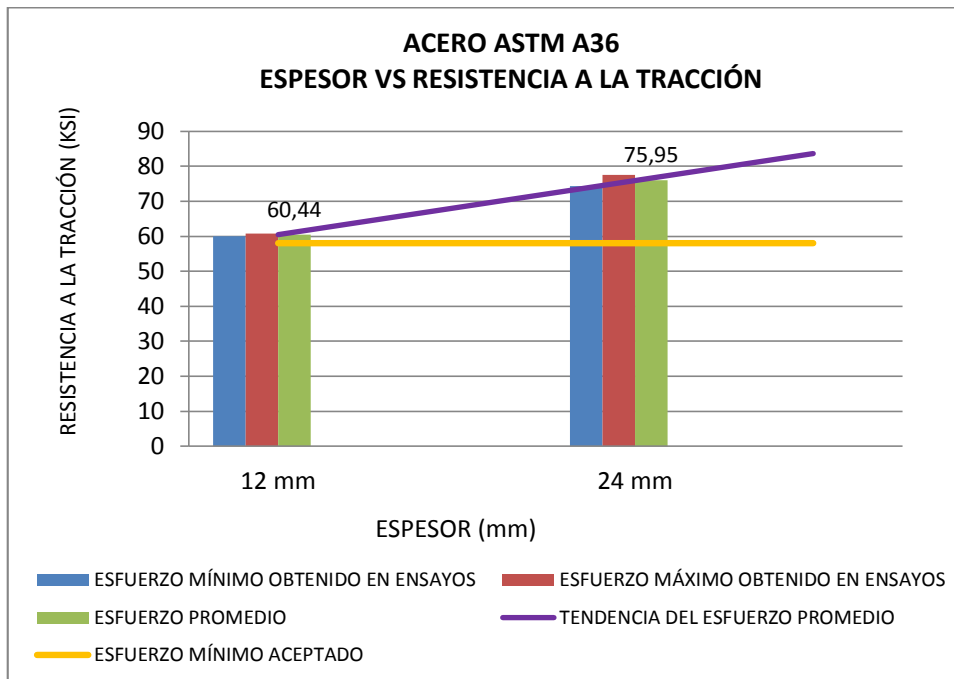
Tipo de Material	Espesor (mm)	Probeta	Carga máxima registrada (lbf)	Resistencia a la tracción (ksi)	Observaciones
<b>ASTM A36</b>	12	T1	28902	60,06	Rotura en material base
	12	T2	28902	60,82	Rotura en material base
	24	T1	67900	77,5	Rotura en material base
	24	T2	65000	74,4	Rotura en material base
<b>ASTM A588</b>	12	T1	34392	72,08	Rotura en material base
	12	T2	35108	73,71	Rotura en material base
	20	T1	61300	80	Rotura en material base
	20	T2	61900	83,7	Rotura en material base
	30	T1	95300	84,9	Rotura en material base
	30	T2	97000	85,5	Rotura en material base

#### 4.1.2 ANÁLISIS

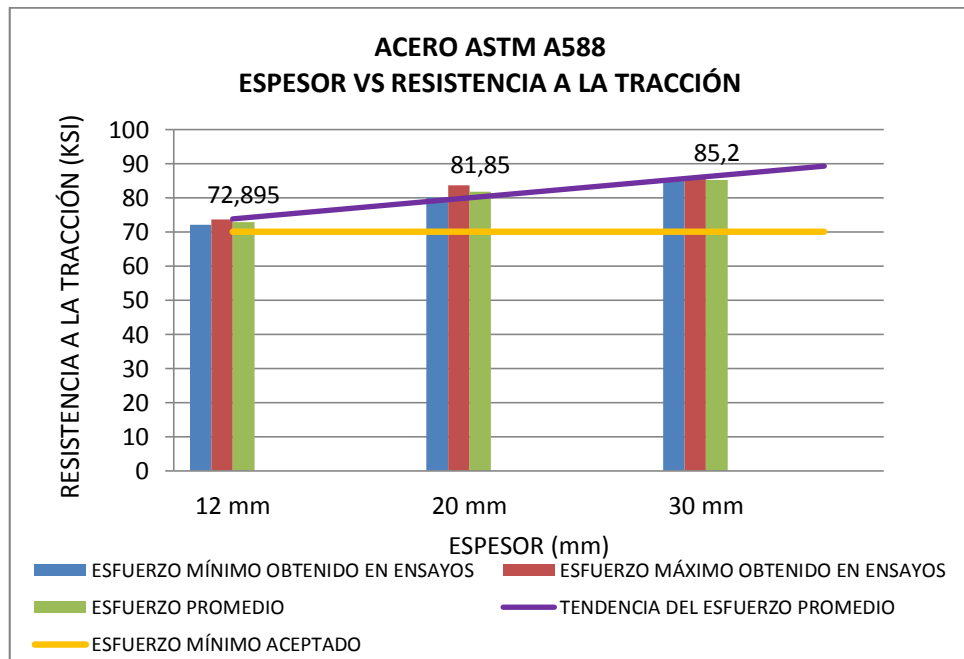
Para realizar el análisis se empieza identificando el tipo de material ensayado y los espesores de cada uno de ellos. Además de tener presente el valor mínimo aceptado por la norma en cuanto a la resistencia última de cada material.

Para el caso del acero ASTM A36, la norma ASTM A36/ A36M da un valor mínimo de resistencia a la tracción de 58 KSI, mientras que para el acero ASTM A588, en la norma ASTM A588, una resistencia de 70 KSI.

Para visualizar mejor los resultados obtenidos en los ensayos a continuación se presentan las siguientes figuras.



**Figura. No. 65. Espesor de material vs Resistencia a la tracción para acero ASTM A36.**

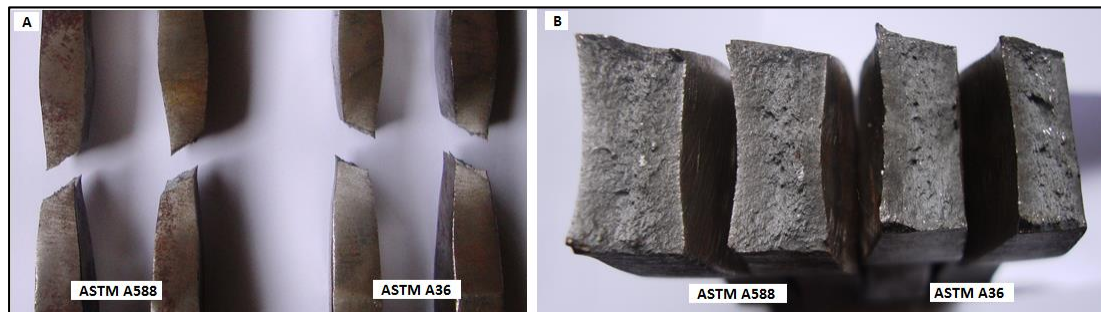


**Figura. No. 66. Espesor de material vs Resistencia a la tracción para acero ASTM A588.**

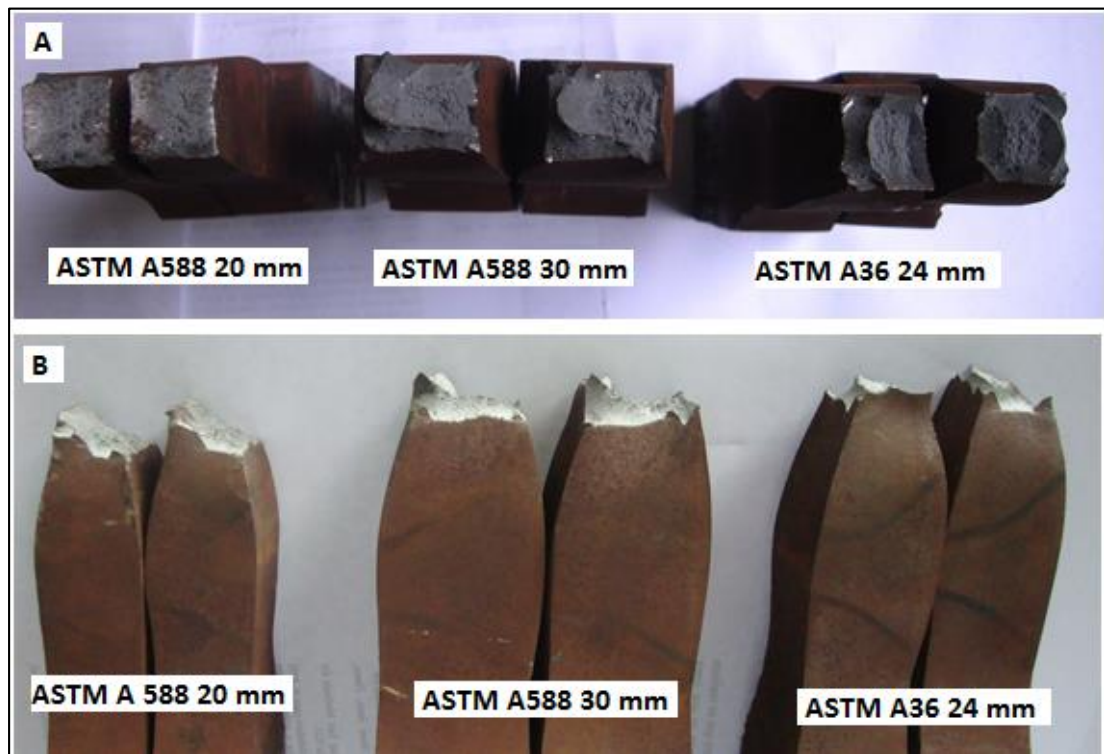


En las figuras 65 y 66 la resistencia a la tracción, oscila valores que sobrepasan a la especificación de resistencia según la norma ASTM A36 y ASTM A588 para cada acero.

Además se observa una tendencia a presentar una menor resistencia para los espesores de 12 milímetros en los dos materiales, esta variación se da debido a que las probetas de 12 milímetros de los dos materiales fueron ensayadas en un diferente laboratorio que las probetas de 20, 24 y 30 milímetros, por lo que se sospecha que la velocidad de carga con la que fueron ensayadas las probetas de 12 milímetros fue mayor que la velocidad de carga con la que fueron ensayadas las otras probetas, por ello en la figura 67 se muestra el tipo de rotura en estas probetas las cuales son diferentes a las probetas ensayadas en el otro laboratorio (figura 68).



**Figura. No. 67. Probetas de ensayos de tracción, espesores 12 milímetros. A. Vista Lateral. B. Vista Frontal.**



**Figura. No. 68. Probetas de ensayos de tracción, aceros ASTM A36 y A588. A. Vista Frontal. B. Vista Lateral.**

Sin embargo como se mencionó anteriormente esto no afectó en el resultado ya que los especímenes cumplieron con las especificaciones requeridas, sin importar el lugar donde se hayan efectuado.

## **4.2 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DOBLADO.**

### **4.2.1 RESULTADOS**

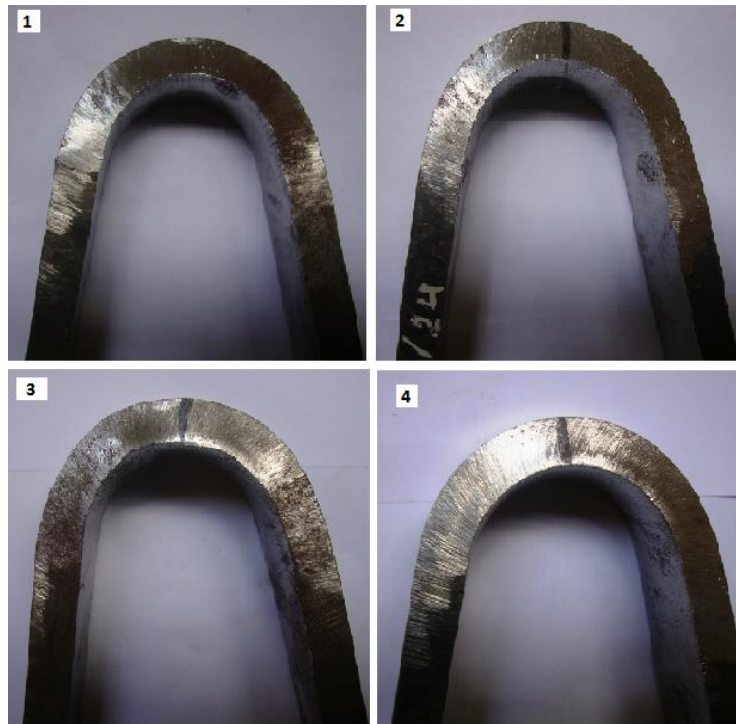
Al realizar los ensayos se obtuvieron los resultados mostrados en las siguientes figuras. Adicionalmente estos resultados se pueden observar en el informe técnico en el Anexo No. 9



**Figura. No. 69. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A36, 12 milímetros. Vista lateral.**



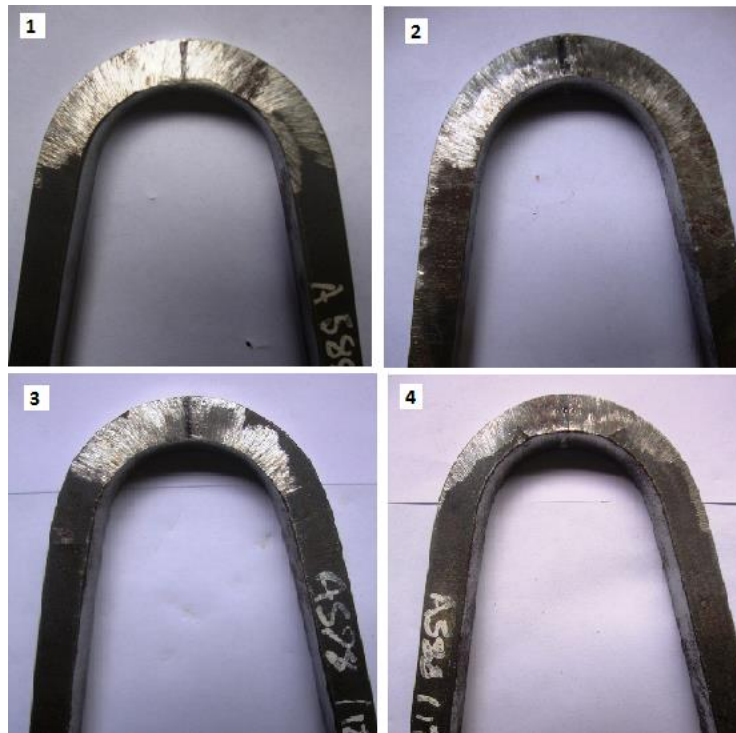
**Figura. No. 70. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A36, 12 milímetros. Vista frontal.**



**Figura. No. 71. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A36 24 milímetros. Vista lateral.**



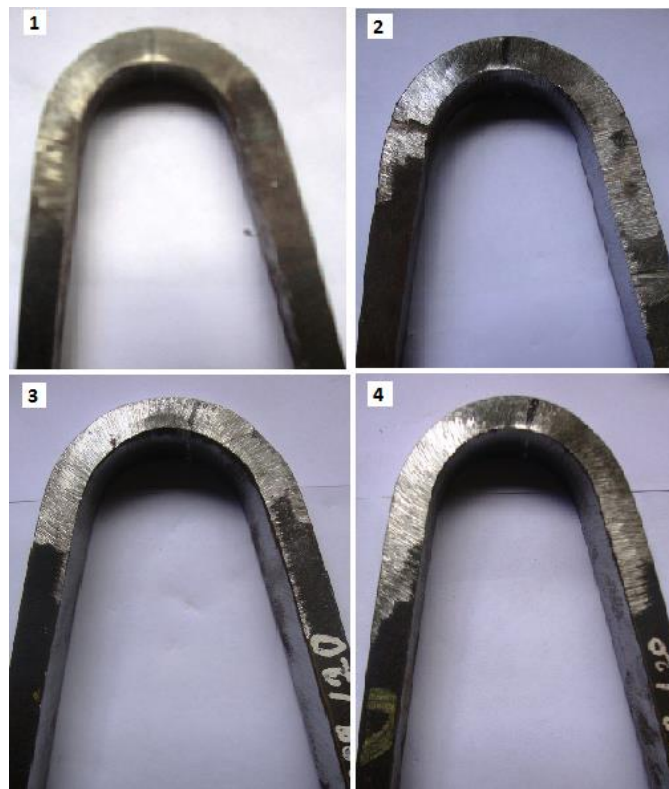
**Figura. No. 72. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A36, 24 milímetros. Vista frontal.**



**Figura. No. 73. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588, 12 milímetros. Vista lateral.**



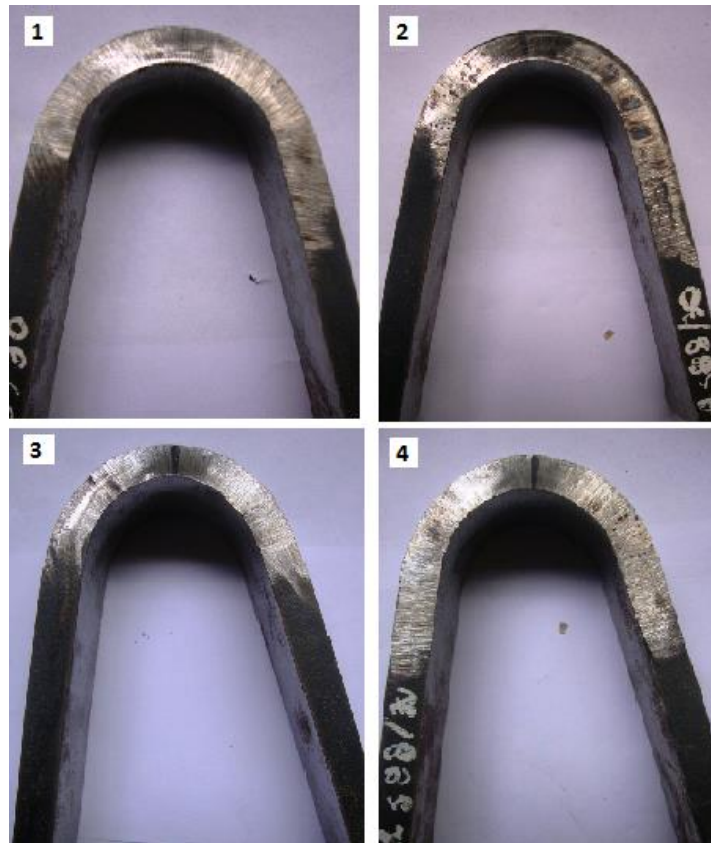
**Figura. No. 74. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588, 12 milímetros. Vista frontal.**



**Figura. No. 75. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588, 20 milímetros. Vista Lateral.**



**Figura. No. 76. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588, 20 milímetros. Vista frontal.**



**Figura. No. 77. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588, 30 milímetros. Vista lateral.**



**Figura. No. 78. Ensayos de doblado lateral, acero ASTM A588, 30 milímetros. Vista frontal.**

#### 4.2.2 ANÁLISIS

Se observa que en todas las probetas ensayadas, no se encuentran discontinuidades abiertas en la junta soldada. Adicionalmente para el caso del acero ASTM A36 de 12 y 24 mm, el radio de curvatura que presentan los especímenes, no es uniforme y tiene una tendencia a presentar pequeñas aristas (0.58 mm. Aprox.), alrededor de la curvatura, debido a esto las probetas no tienen una deformación uniforme, por lo cual la ductilidad del material base difiere del material de aporte, esto por sus diferentes valores de resistencia a la tracción (58 ksi, A36 y 80 ksi, Mat. Aporte). Dado que el material A36 presenta deformaciones similares para sus dos espesores, se puede decir que este material tiene una ductilidad similar en las juntas de los dos espesores analizados.

Mientras que el acero ASTM A588 en sus tres espesores analizados, presenta un radio de curvatura uniforme y adicionalmente un tanto menor que el radio de curvatura que presenta el acero ASTM A36.

Adicionalmente se realizó el análisis de la fractura en el ensayo de tracción con respecto a la reducción de áreas para poder tener un mayor conocimiento de la ductilidad presentada, los valores obtenidos son los siguientes:

**Tabla. No. 8. Reducción de área en el ensayo de tracción**

Tipo de Material	Espesor (mm)	Designación	Área Inicial (mm <sup>2</sup> )	Área Final (mm <sup>2</sup> )	Reducción de área (%)
ASTM A36	12	T1	310,59	140,16	54,87
	12	T2	306,71	135,61	55,78
	24	T1	565,01	235,19	58,37
	24	T2	563,58	221,73	60,66
ASTM A588	12	T1	307,98	138,96	54,88
	12	T2	307,44	142,52	53,64
	20	T1	494,61	230,51	53,40
	20	T2	476,95	234,90	50,75
	30	T1	723,82	328,94	54,55
	30	T2	731,53	334,50	54,27

En la tabla No. 8, la reducción de área para el caso del acero A588 presenta valores uniformes que oscilan entre el 50 – 54% mientras que el



acero A36 tiene un ligero incremento en su reducción de área para el caso de 24 mm del 54 - 60% con lo que se podría decir que el acero A36 es un tanto más dúctil que el acero A588. .

### 4.3 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE IMPACTO.

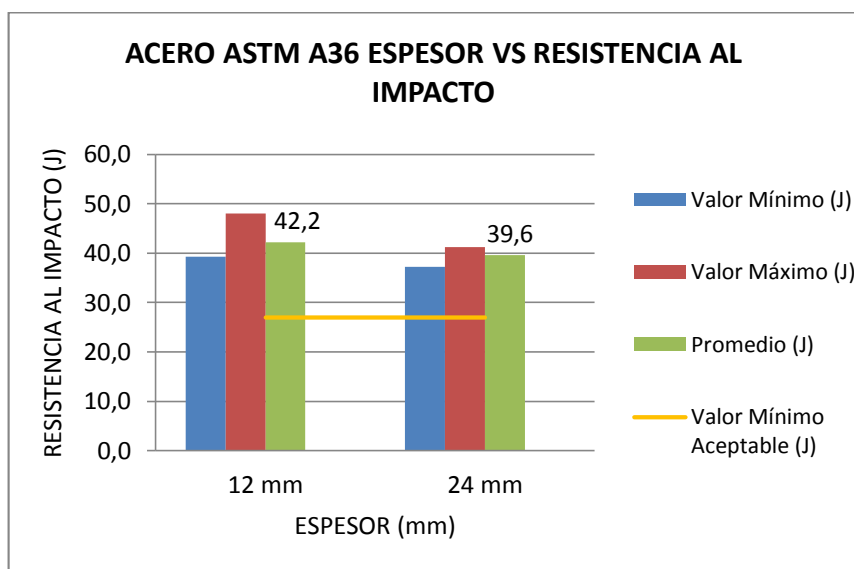
#### 4.3.1 RESULTADOS

En la siguiente tabla se muestra los resultados del ensayo de impacto realizado sobre las probetas, para mayor detalle en los resultados dirigirse al informe técnico de dicho ensayo en el Anexo No. 10

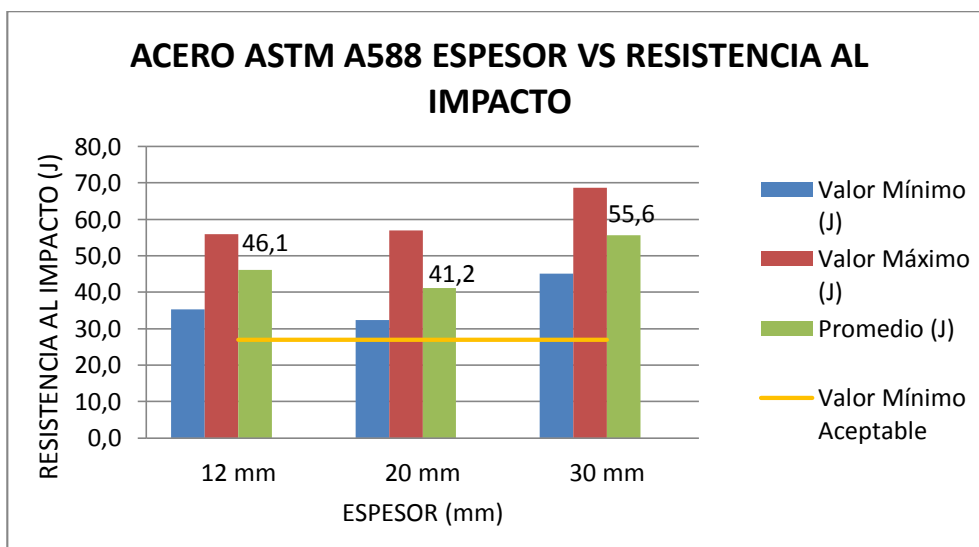
**Tabla. No. 9. Resultados de los ensayos de impacto.**

Tipo de Material	Espesor (mm)	Valor Mínimo (J)	Valor Máximo (J)	Promedio (J)	Mínimo Aceptable (J)
ASTM A36	12 mm	39,2	48,1	42,2	27
	24 mm	37,3	41,2	39,6	27
ASTM A588	12 mm	35,3	55,9	46,1	27
	20 mm	32,4	56,9	41,2	27
	30 mm	45,1	68,7	55,6	27

En las siguientes figuras (79 y 80) se muestran los resultados por cada material en función de su espesor.



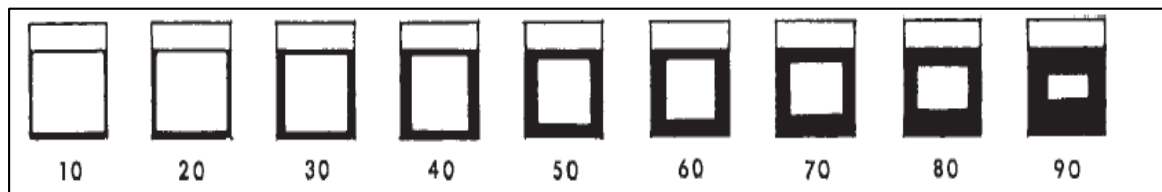
**Figura. No. 79. Espesor de material vs Resistencia al impacto para acero ASTM A36.**



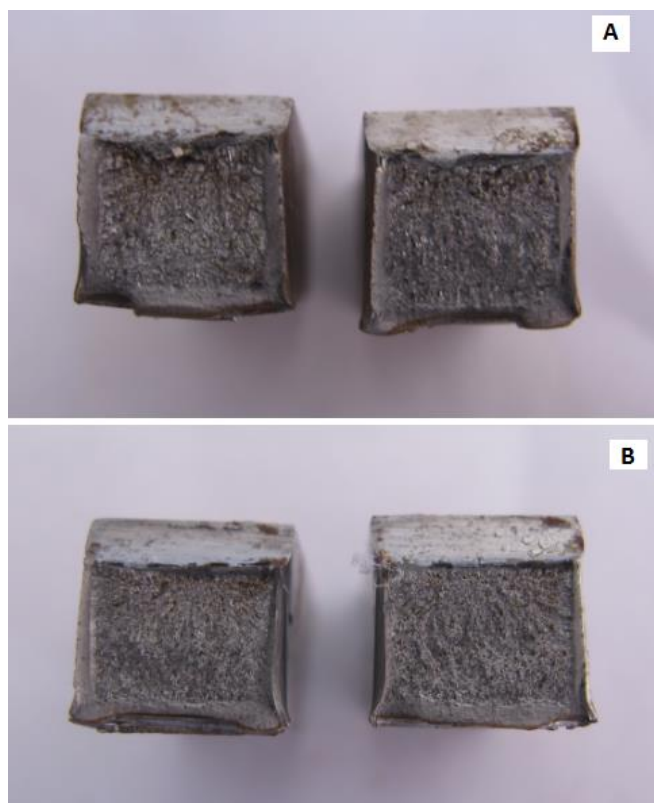
**Figura. No. 80. Espesor de material vs Resistencia al impacto para acero ASTM A588.**

Además de esto se analizó las probetas después de los ensayos para conocer el tipo de fractura, así como el porcentaje de ductilidad que estas presentan, guiándose en la gráfica que da la norma ASTM E23, en la cual el número que presenta en la parte de abajo indica el porcentaje de absorción

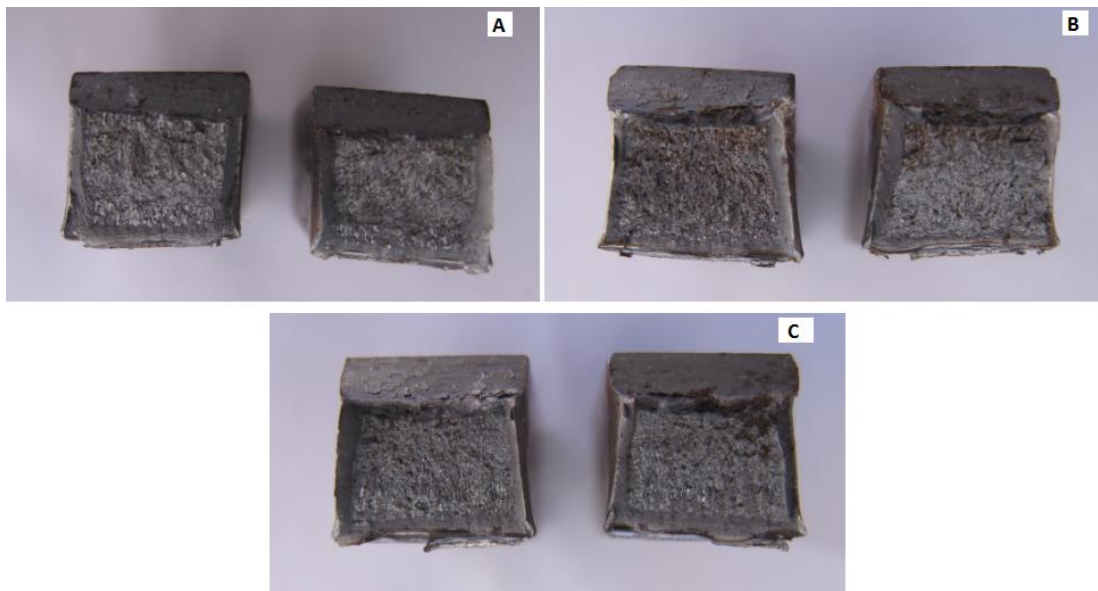
que presenta el material, con valores que van desde el 10 % (menor absorción de energía) al 90 % (mayor absorción de energía).



**Figura. No. 81. Guía para estimar el porcentaje de absorción de energía, según la apariencia de la fractura.**  
Fuente: (Norma ASTM E23.)



**Figura. No. 82. Probetas de impacto acero A36. A. 12 mm B. 24 mm.**



**Figura. No. 83. Probetas de impacto acero A588. A. 12 mm. B. 20 mm. C. 30 mm.**

#### **4.3.2 ANÁLISIS**

Como se muestra en la figura 82 para el acero ASTM A36, no existe una variación significativa de la resistencia al impacto de un espesor a otro, el valor promedio de absorción de energía para este material fue de 40.9 J para los dos espesores analizados, sin presentar variaciones significativas entre valores máximos y mínimos.

Mientras que para el acero ASTM 588 se tiene un valor promedio de 47.6 J entre todos los espesores analizados, se observa que los valores máximos y mínimos para este acero difieren ampliamente de un espesor a otro, dado esto se puede decir que este acero tiene un comportamiento más sensible frente a una discontinuidad o variación en la geometría del espécimen ensayado. Por ello es necesario realizar un control metrológico a la muesca de la probeta, de esta forma se podrían evaluar de mejor manera estos comportamientos variables, a pesar de esto todos los especímenes ensayados sobrepasan las especificaciones mínimas para ensayo de tenacidad de la norma AWS D1.5.

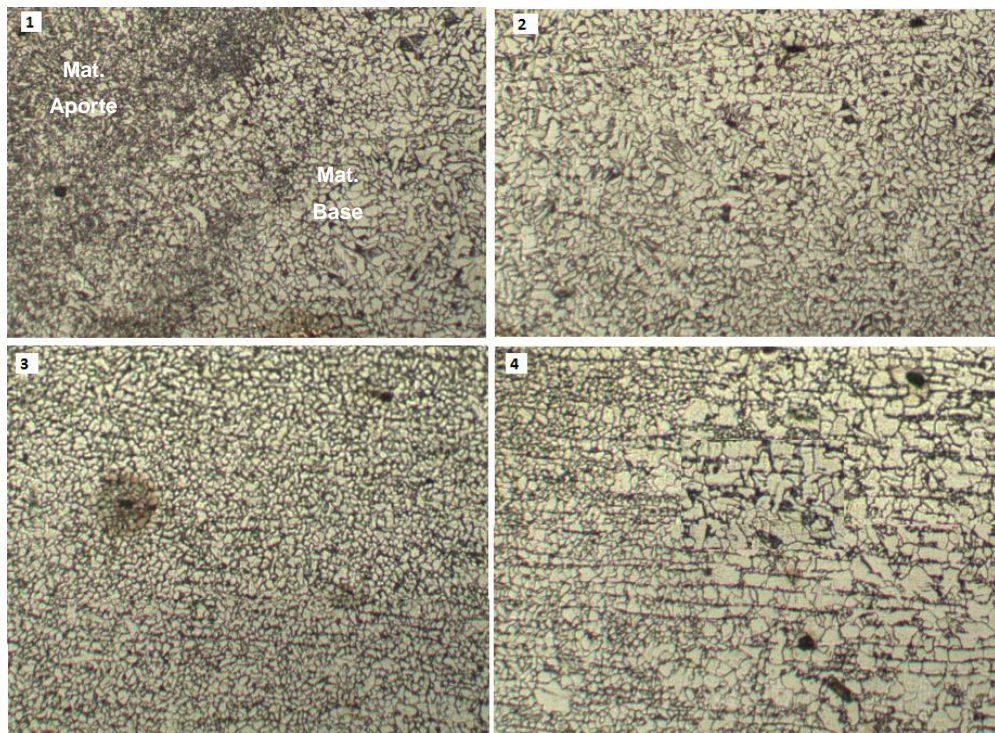
De manera general las juntas realizadas con acero ASTM A36 tuvieron una menor tenacidad que las juntas de acero ASTM A588, específicamente un 16.38% menos. Con la visualización de la fractura se puede observar que las probetas de acero ASTM A36 tienen una absorción de energía del 30 % aproximadamente para los espesores de 12 y 24 milímetros, para el caso del acero ASTM A588 en el caso del espesor de 12 milímetros se observa una absorción del 40%, mientras que para el de 20 milímetros es de 30% y el de 30 milímetros tiene valores entre el 50 y 60% lo que concuerda con los datos obtenidos y la variabilidad que estos presentaron el momento de realizar el ensayo.

Adicionalmente no se puede relacionar directamente la resistencia al impacto en función del espesor, pues no se presentó una relación directa para cada material, estudios similares han demostrado que la resistencia al impacto aumenta, conforme se aumenta la cantidad de calor aportado (Morales , Naranjo, & Sánchez, 2013), lo cual podría explicar el por qué no existen cambios significativos en la resistencia a diferentes espesores, ya que el calor aportado es el mismo, indistintamente del espesor seleccionado.

#### **4.4 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE METALOGRAFÍA**

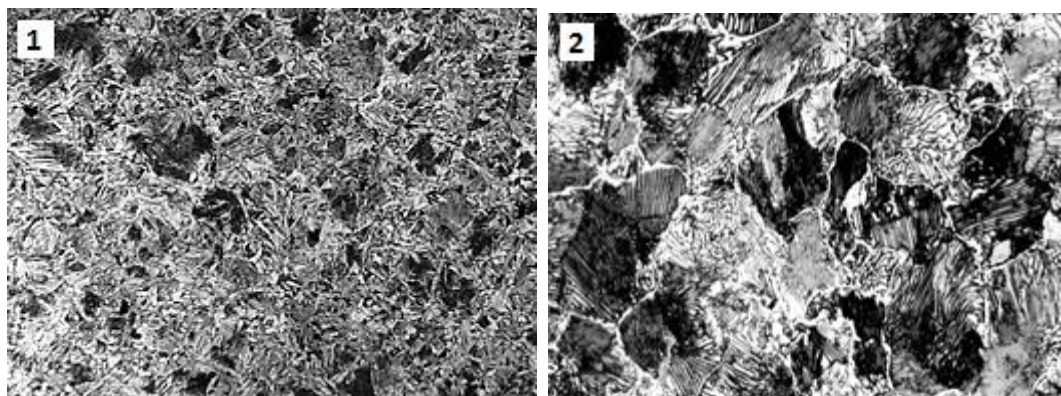
##### **4.4.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS**

A continuación se muestran las figuras de las metalografías correspondientes a cada material, dado que sin importar el espesor analizado, la naturaleza de cada material se mantiene, se presentará la metalografía general de cada material y posteriormente se expondrá las particularidades encontradas en cada espesor.



**Figura. No. 84. Metalografías del acero A36. 1) Zona de límite de fusión (material de aporte y material base). 2) Zona de grano grueso. 3) Zona de grano fino 4) Transición, recrystalización de grano fino a material base.**

Se observa que en las diferentes zonas de la soldadura, la matriz común a formar de este acero es de tipo perlítica (zonas oscuras) y ferrítica (zonas claras) (ASM Internacional, 1992). A continuación se muestran los hallazgos en el acero A36.

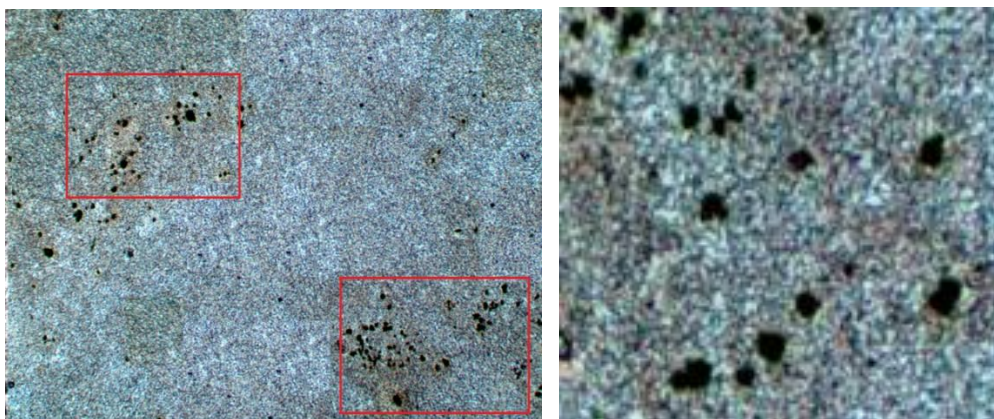


**Figura. No. 85. 1. Bainita hallada en la parte superior de la junta, entre el material de aporte y el límite de fusión. Acero ASTM A36 / 12 mm. 2. Metalografía de Bainita Superior.**  
Fuente 2: (Facultad de Ingeniería UNLP)

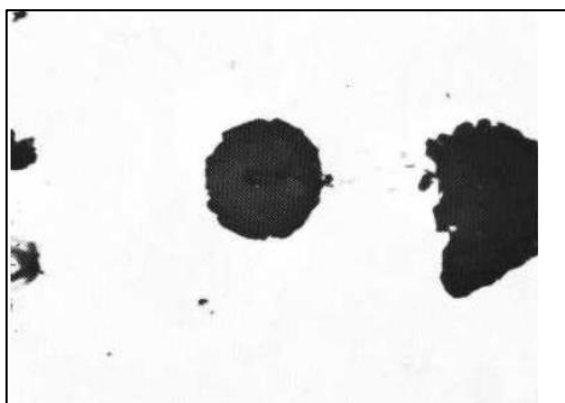
La microestructura encontrada en la parte superior de la junta, entre el límite de fusión y el material de aporte, tiene como característica formar una especie de agujas en su estructura, haciéndola parecer martensita, para descartar que sea este tipo de estructura se midió la micro- dureza, dando un resultado promedio de 17.5 HRC, con lo cual se descarta que sea martensita ya que esta presenta una dureza de 50 a 68 HRC. (Facultad de Ingeniería Universidad Tecnológica Nacional de Argentina)

Una vez descartada la presencia de martensita, se determinó que esta microestructura es bainita de tipo superior, esta suele formarse alrededor de los 400°C. En algunos aceros, especialmente los que contienen silicio, se retarda la formación de la cementita. Como resultado, la austenita enriquecida en carbono entre las láminas de ferrita es bastante estable y es retenida durante la transformación y a temperatura ambiente, dando como resultado bainita superior. (Facultad de Ingeniería UNLP). Debido a esto es probable que exista la formación de esta microestructura en el acero ASTM A36, dado su contenido de Silicio (0.40% Máx.), además el material de aporte (E81T1Ni1) presenta en su composición química una concentración de Silicio del 0.55% (Soldexa, 2007) y adicionalmente la parte superior de la junta es la que se encuentra expuesta al medio ambiente, por lo cual tienden a enfriarse más rápido, dando consigo la formación de esta microestructura.

En la figura 86 se muestran particulares manchas negras en el material de aporte y muy cerca al límite de fusión.



**Figura. No. 86. Inclusiones de SiO<sub>2</sub> en metalografías. Acero A36 12mm y 24mm.**



**Figura. No. 87. Inclusiones de SiO<sub>2</sub>. Ampliación 1000 X.**  
Fuente: (Facultad de Ingeniería Universidad Tecnológica Nacional de Argentina)

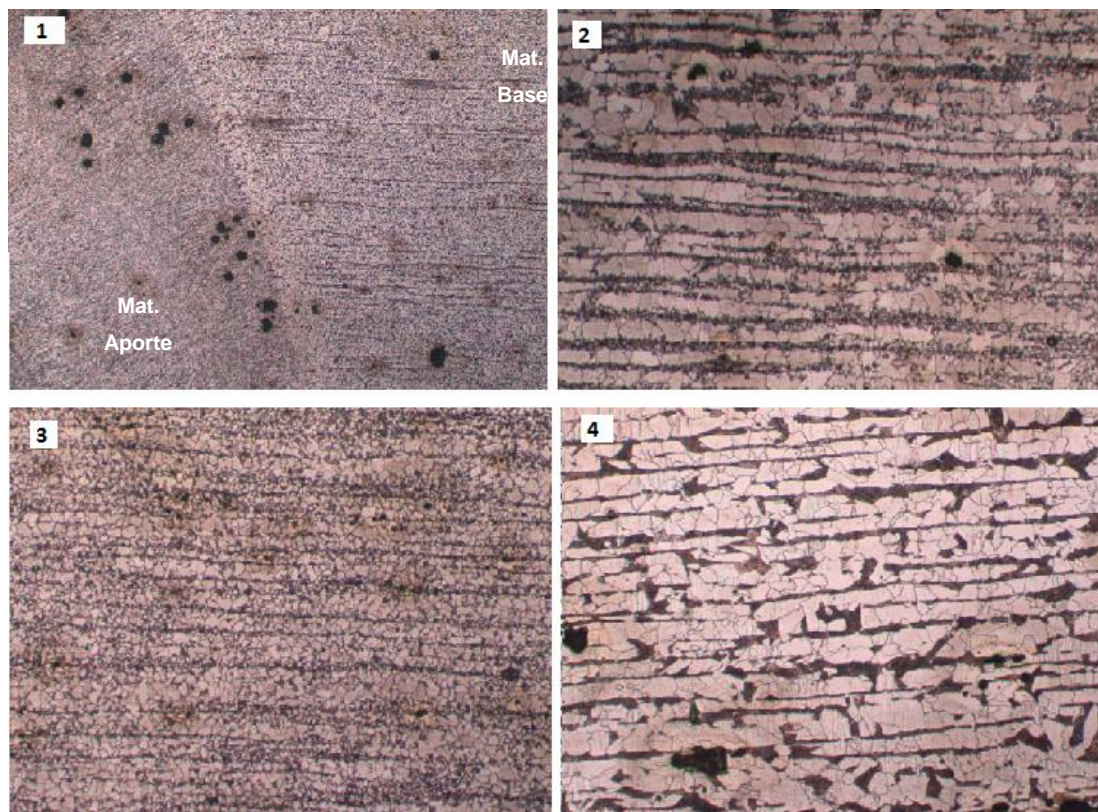
Como se observa, estas manchas están presentes en el material de aporte, con tendencia al límite de fusión del material, en un principio se sospechó de posibles formaciones de carburos así que se midió la micro dureza en esta zona y se determinó que tanto en el acero A36 de 12 mm y 24 mm, estas islas presentaron una dureza de 18 HRC, con lo cual se descarta la posibilidad de que sean carburos, ya que estos usualmente presentan una dureza superior a 68 HRC. (Solá Molera)

Comparándolos con otras investigaciones, estas manchas se asemejan a inclusiones de óxido de silicio, además en tasas alrededor del 0.30%, se encontró que el silicio se disuelve completamente en ferrita, pudiendo incrementar la resistencia del acero, sin necesariamente disminuir su ductilidad. Aunque si la tasa es cerca del 0.40% la disminución de ductilidad



se hace bastante notoria (Totten, 2007), dado que este acero presenta un porcentaje de silicio del (0.40% máx.) y el material de aporte un 0.55%, podría ser la razón para que las partículas de Silicio no sean completamente disueltas en la ferrita y tiendan a formar estos puntos negros llamados óxidos de silicio.

A continuación en la figura 88 se muestran las metalografías para el acero ASTM A588.



**Figura. No. 88. Metalografías del acero A588. 1) Zona de límite de fusión (material de aporte y material base). 2) Zona de grano grueso. 3) Zona de grano fino 4) Material base.**

### Hallazgos en acero ASTM A588



**Figura. No. 89. Perlita fina hallada en la parte superior de la junta, entre el material de aporte y el límite de fusión. Acero ASTM A588 / 12 mm y 20 mm. 2. Metalografía de Perlita gruesa**

Fuente 2: (Facultad de Ingeniería Universidad Tecnológica Nacional de Argentina)



**Figura. No. 90. Inclusiones de SiO<sub>2</sub> en probetas de acero A588 /12mm, 20mm y 30 mm.**

En el acero ASTM A588 en los espesores de 12 y 20 mm se encontró perlita fina en el material de aporte y el límite de fusión con el material base, en la parte superior del cordón, se descarta que sea martensita ya que en las mediciones de dureza esta micro – estructura no superó los 18.5 HRC. También se encontraron las mismas inclusiones de SiO<sub>2</sub>, pero en mayor intensidad que las encontradas en el acero ASTM A36, esto dado que como se mencionó anteriormente el material de aporte, presenta un porcentaje de

Silicio del 0.55% y para el caso del acero ASTM A588 grado A presenta un porcentaje del 0.30 al 0.65 % de Silicio en su composición química.

Adicionalmente cabe notar que en este acero la estructura desde su material base hasta empezar la recristalización y la zona de grano fino tiene una marcada disposición laminar en bandas de perlita y ferrita (Fig.92, 2, 3, 4), la cual es una diferencia micro-estructural en relación al acero ASTM A36.

#### **4.5 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE MICRODUREZA.**

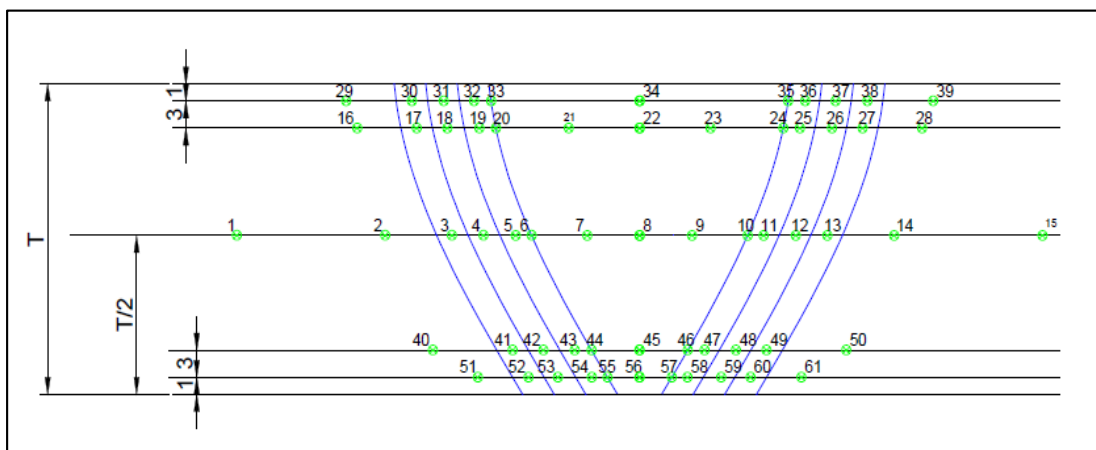
##### **4.5.1 RESULTADOS**

Los resultados presentados a continuación están en escala de dureza Vickers (HRV).

Para el análisis de dureza se hizo un mapeo de las mediciones que se realizaron, para ello se tomó en cuenta las zonas que se presentan en una junta soldada, siendo estas el material de aporte, zona afectada térmicamente y el material base.

Además se consideró las zonas críticas como lo son, el borde superior de la soldadura ya que este está en contacto directo con el medio ambiente y por este motivo se pierde calor más rápido, pudiendo provocar la presencia de microestructuras negativas para la soldadura, como por ejemplo martensita.

A continuación en la figura. No. 91 se muestra la distribución de las indentaciones en la junta.



**Figura. No. 91. Distribuciones de indentaciones en la junta soldada.**

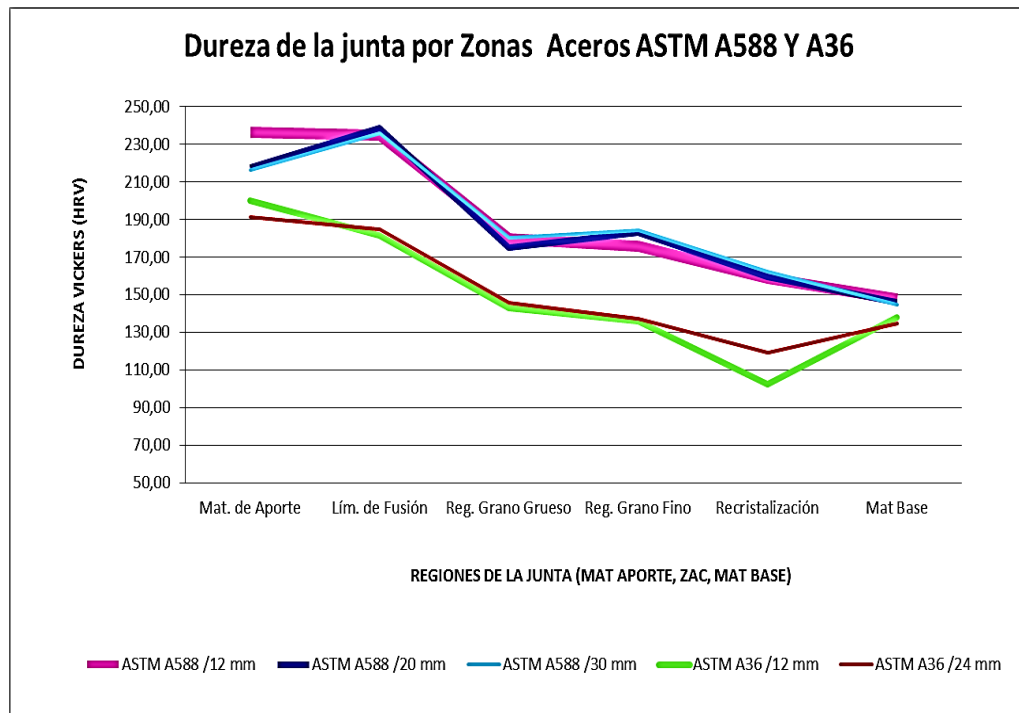
En la tabla. No. 10 se presentan los resultados de los valores promedio de la micro dureza en cada zona, por material.

**Tabla. No. 10. Valores promedios de dureza por zonas para acero ASTM A588 y A36.**

	Mat. de Aporte	Lím. de Fusión	Reg. Grano Grueso	Reg. Grano Fino	Recristalización	Mat Base
ASTM A588 /12 mm	236,44	235	179,6	176	159	147,83
ASTM A588 /20 mm	217,44	238,50	175,00	182,90	159,70	146,00
ASTM A588 /30 mm	216,56	235,80	180,10	184,50	162,30	144,83
ASTM A36 /12 mm	200,33	181,7	143,2	135,9	102,4	137,83
ASTM A36 /24 mm	191,11	184,7	145,6	137,2	119,3	134,67

#### 4.5.2 ANÁLISIS

En la figura. No. 92 se muestra la variación de la dureza según las zonas de la junta soldada para cada material y espesor.



**Figura. No. 92. Dureza por zonas para acero ASTM A588 y A36.**  
Fuente: Propia.

En la figura No. 92 se observa que para los dos aceros, los valores de dureza más altos se encuentran entre el material de aporte y el límite de fusión (236.43 HRV acero A588 y 195.72 HRV acero A36), esto debido a la alta resistencia que tiene el material de aporte y la criticidad de la zona del límite de fusión por el encuentro de dos materiales distintos, es necesario mencionar la diferencia de durezas en la misma zona para cada acero, para el caso del acero A36 se tiene un aumento de dureza de 136.35 HRV en el material base a 195.72 HRV en la zona del límite de fusión con lo que se tiene un aumento del 69.66 % en dureza. Para el caso del acero A588 la dureza pasa de 146.22 HRV en el material base a 236.43 HRV en el límite de fusión con lo que se tiene un aumento de 61.69 %, con lo cual se puede decir que el acero A36 presenta un incremento en el endurecimiento de la junta más alto que el acero A588.

Adicionalmente existe una tendencia decreciente de dureza para los dos aceros conforme las mediciones se van alejando de la ZAC, hasta terminar en el material base. El acero A36 para los dos espesores presenta una caída en

la dureza en la zona de recristalización, debido al cambio significativo en el tamaño de grano que en esta zona existe, es decir el tamaño de grano aumenta abruptamente, por lo que se dureza se ve disminuida en esta zona, para luego aumentar y estabilizarse hasta el material base.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS FINANCIERO

#### 5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS COSTOS.

El análisis financiero del proyecto se basa en una descripción general de los costos de materiales, insumos, mano de obra, servicios y logística a lo largo de la ejecución del mismo.

#### 5.2 COSTOS DE MATERIAL BASE Y MATERIAL DE APORTE.

##### 5.2.1 MATERIAL BASE

En el caso del costo del costo del material base, el cual es el acero ASTM A588 Y A36 se establece un costo por kilogramo de material, que dependiendo del tipo varía su precio.

A continuación se detallan los costos de cada acero, según la cantidad de kilogramos utilizados para cada espesor.

**Tabla. No. 11. Costos de acero ASTM A36 utilizado en el proyecto.**

Nro.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (usd)	Costo Total (usd)
1	Acero ASTM A36 espesor 12 mm	Kg	9,42	2,25	21,20
2	Acero ASTM A36 espesor 24 mm	Kg	18,84	2,25	42,39
3	Acero ASTM A36 espesor 15 mm	Kg	11,775	2,25	26,49
4	Acero ASTM A36 espesor 10 mm	Kg	7,065	2,25	15,90
				Costo Total Acero A36	105,98

Nota: En esta tabla se incluyen los costos correspondientes a todos los cupones de soldadura de acero ASTM A36 para el proyecto, incluyendo el cupón de pruebas adicional el cual fue de 15 milímetros de espesor, que se necesitó para calibrar los parámetros de la máquina y la velocidad del soldador.

**Tabla. No. 12. Costos del acero ASTM A588 utilizado en el proyecto.**

Nro.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (usd)	Costo Total (usd)
1	Acero ASTM A588 espesor 12 mm	Kg	17,898	4,75	85,02
2	Acero ASTM A588 espesor 20 mm	Kg	15,7	4,75	74,58
3	Acero ASTM A588 espesor 30 mm	Kg	23,55	4,75	111,86
Costo Total Acero A588					271,45

Nota: En esta tabla se incluyen los costos correspondientes a todos los cupones de soldadura de acero ASTM A588 para el proyecto.

**Tabla. No. 13. Costos totales del material base**

Nro.	Descripción	Costo Total
1	Acero ASTM A36	105,98
2	Acero ASTM A588	271,45
COSTO TOTAL MATERIAL BASE		377,43

### 5.2.2 MATERIAL DE APORTE.

El material de aporte es alambre tubular para el proceso FCAW, este se comercializa en forma de carretes, los cuales generalmente tienen un peso de 15 Kg, por lo tanto, pese a que se utilizó una menor cantidad que la que viene en el carrete para soldar los cupones, es necesario comprar el carrete completo, el cual su precio se detalla a continuación.



**Tabla. No. 14. Costo total del Material del Aporte.**

Nro.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Total (usd)
1	Alambre tubular E81T1Ni1/ Marca Indura	Kg	15	146,50

### 5.2.3 COSTOS TOTALES DE MATERIAL

Los costos totales de material base y material de aporte se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla. No. 15. Costo total de materiales.**

Nro.	Descripción	Costo Total
1	Costo total Material base	377,43
2	Costo total Material de aporte	146,50
	<b>COSTO TOTAL MATERIALES</b>	<b>523,92</b>

### 5.3 COSTOS DE INSUMOS.

Los costos de insumos detallados en la siguiente tabla corresponden a los costos de todos los materiales adicionales utilizados durante y para la ejecución del proyecto.

**Tabla. No. 16. Costos totales de los insumos utilizados.**

Nro.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (usd)	Costo Total (usd)
1	Electrodo para corte de plasma	u	1	12,66	12,66
2	Tobera Para corte de Plasma	u	1	9,29	9,29
3	Grata Plana	u	1	15,28	15,28
4	Tobera para Soldadora MIG	u	1	25,7	25,7
5	Contactos para soldadora MIG	u	4	2,8	11,2
6	Marcador para metal	u	1	9	9
7	Disco de desbaste 7/8" pequeño	u	1	3,19	3,19
8	Disco de corte 7/8" pequeño	u	1	1,232	1,232
9	Aerosol Penetrante (Tintas penetrantes)	u	1	29,12	29,12
10	Aerosol Limpiador (Tintas penetrantes)	u	1	22,4	22,4
11	Aerosol Revelador (Tintas penetrantes)	u	1	29,12	29,12
12	Disco de desbaste 7/8" mediano	u	7	4,1	28,7
13	Disco de corte 7/8" mediano	u	10	2,78	27,8
14	Guantes de soldadura	par	1	10,2	10,2
15	Tizas para metal	u	2	0,75	1,5
16	Tapones auditivos desechables	par	3	0,5	1,5
17	Lijas	u	15	0,69	10,35
18	Hielo Seco	Kg	5	1,6	8
19	Alcohol Industrial	Lt	1	2	2
				<b>TOTAL</b>	<b>221,01</b>

#### 5.4 COSTOS DE MANO DE OBRA.

El costo de la mano de obra se define como una retribución económica a un trabajo sea este físico o mental.

En estos costos está tomado en cuenta el valor de retribución de cada una de las personas que intervienen en la preparación de las juntas, proceso de soldadura, además de la retribución al tiempo de los docentes que guían el proyecto.

#### 5.4.1 COSTOS POR SOLDADURA.

Estos costos corresponden únicamente al proceso de llevar a cabo la soldadura, más adelante se describirá los costos correspondientes a la preparación de las juntas y preparación de los cupones posterior al proceso.

A continuación se detallan los costos de mano de obra correspondientes al proceso de soldadura.

**Tabla. No. 17. Costos de mano de obra del proceso de soldadura.**

Nro.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (usd)	Costo Total (usd)
1	Inspector	día	1	125	125
2	Soldador	día	1	70	70
3	Ayudante del Inspector	día	1	50	50
4	Ayudante del Soldador	día	1	25	25
				Total Proceso soldadura	270,00

#### 5.4.2 COSTOS POR PREPARACIÓN DE JUNTAS Y ADECUACIÓN DE CUPONES.

Estos costos hacen referencia al tiempo y trabajo que toma el dar la forma de la junta al material base, así como la adecuación posterior del cupón de soldadura, una vez soldado, que se refiere a la extracción de la placa de respaldo y los puentes de soldadura.

**Tabla. No. 18. Costos de mano de obra de preparación de juntas y cupones.**

Nro.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (usd)	Costo Total (usd)
1	Preparación de las juntas	día	2	25	50
2	Extracción de placas de respaldo y puentes	día	2	25	50
				<b>Total</b>	<b>100</b>

### 5.4.3 COSTOS DE ASESORAMIENTO Y LABOR ESTUDIANTIL.

Los siguientes costos corresponden a la labor que el estudiante realiza durante la ejecución del proyecto de grado, así como la retribución a sus guías docentes, en este caso el Director del proyecto y el Co- Director.

**Tabla. No. 19. Costos de Labor estudiantil y Asesoramiento del Proyecto.**

Nro	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (usd)	Costo Total (usd)
1	Labor Estudiantil	hora	720	5	3600
2	Asesoramiento Director	hora	20	20	400
3	Asesoramiento Co-Director	hora	20	20	400
<b>Total Costos Asesoramient L. Estudiantil</b>					<b>4400</b>

### 5.5 COSTOS TOTALES DE MANO DE OBRA.

Los costos totales de mano de obra muestran a continuación en la siguiente tabla.

**Tabla. No. 20. Costos totales de mano de obra.**

Nro.	Descripción	Costo Total
1	Costo total proceso de soldadura	270
2	Costo total Preparación de juntas y cupones	100
3	Costo de Asesoramiento y Labor estudiantil	4400
<b>COSTO TOTAL MANO DE OBRA</b>		<b>4770,00</b>

### 5.6 COSTOS DE SERVICIOS.

Los costos por servicios comprenden el costo por la fabricación de las probetas para los ensayos, los costos por la ejecución de los ensayos, así como el transporte e imprevistos, ya que son costos de diferente naturaleza, se los clasifica de la siguiente manera:

### 5.6.1 COSTOS DE SERVICIOS DIRECTOS.

Estos costos se ven reflejados en el proyecto, como lo es la preparación de las probetas, así como el costo del servicio del ensayo. Se muestran a continuación en la siguiente tabla.

**Tabla. No. 21. Costos de servicios directos.**

Nro.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (usd)	Costo Total (usd)
1	Corte de probetas por chorro de agua	min	730	1	730
2	Ensayos de Tracción	u	10	25	250
3	Ensayos de Doblado Lateral	u	20	20	400
4	Ensayos de Impacto	u	25	25	625
5	Ensayos de Dureza	u	20	20	400
6	Metalografías	u	20	20	400
Total costos de servicios directos					2805,00

### 5.6.2 COSTOS DE SERVICIOS INDIRECTOS.

Dentro de estos costos se toma en cuenta gastos que no son muy evidenciables a lo largo de la realización del proyecto. Se muestran a continuación.

**Tabla. No. 22. Costos de servicios indirectos.**

Nro.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (usd)	Costo Total (usd)
1	Transporte de Material	flete	8	20	160
2	Transporte Estudiante	viajes	50	0,25	12,5
3	Imprevistos - Gastos varios	u	1	150	150
Total costos de servicios indirectos					322,50

## 5.7 COSTOS TOTALES FINALES.

De acuerdo a los costos detallados anterior mente, tenemos un resumen de gastos detallado en la siguiente tabla.

**Tabla. No. 23. Detalle General Final de gastos del proyecto.**

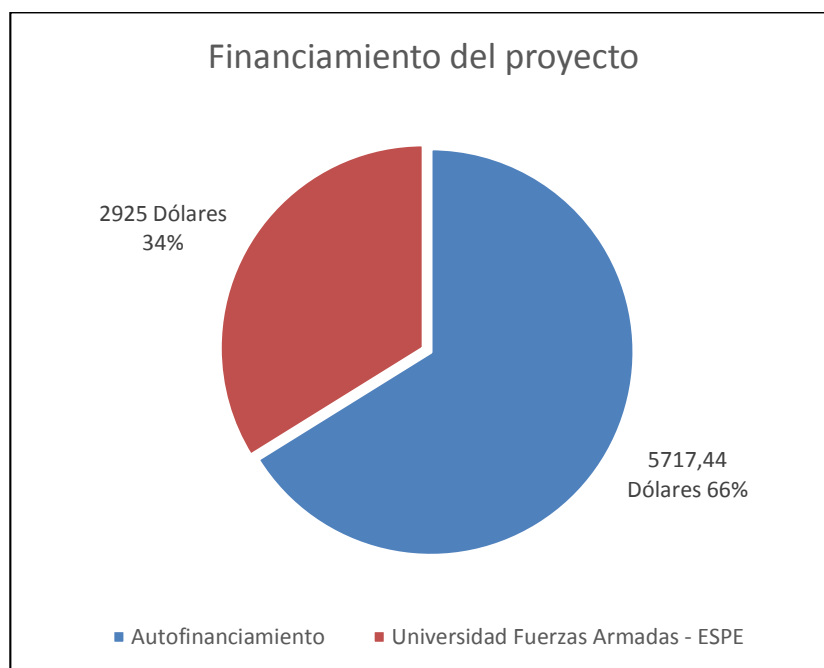
Nro.	Descripción	Costo Total Final (usd)
1	Costo Total Materiales (Base + De aporte)	523,92
2	Costo Total Insumos	221,01
3	Costo Total Mano de Obra Proceso de soldadura	270
4	Costo Total de Preparación de juntas y cupones	100
5	Costo Total de Asesoramiento y Labor Estudiantil	4400
6	Costo Total de Servicios Directos	2805
7	Costo Total de Servicios Indirectos	322,5
		<b>8642,44</b>

Dando un total de 8642.44 dólares el costo del proyecto realizado.

De estos valores es necesario especificar de donde proviene el financiamiento y en qué porcentaje. Los valores se obtuvieron de fuentes como autofinanciamiento, financiamiento por parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, a través de la prestación de sus servicios como por ejemplo los diferentes laboratorios utilizados y el asesoramiento al estudiante

**Tabla. No. 24. Financiamiento del proyecto**

Nro.	Descripción del Gasto	Valor	Entidad Financiada
1	Costo de Materiales	523,93	Autofinanciamiento
2	Insumos	221,01	Autofinanciamiento
3	Inspector	125	Universidad Fuerzas Armadas - ESPE
4	Soldador	70	Autofinanciamiento
5	Ayudante del Inspector	50	Autofinanciamiento
6	Ayudante del Soldador	25	Autofinanciamiento
7	Mano de obra por preparación de juntas y cupones	100	Autofinanciamiento
8	Corte en frío de probetas	730	Autofinanciamiento
9	Ensayos realizados en Universidad Fuerzas Armadas - ESPE	2000	Universidad Fuerzas Armadas - ESPE
10	Ensayo realizado externamente	75	Autofinanciamiento
11	Servicios Indirectos	322,5	Autofinanciamiento
12	Labor Estudiantil	3600	Autofinanciamiento
13	Asesoramiento Director y Co-Director	800	Universidad Fuerzas Armadas - ESPE
<b>Total</b>		<b>8642,44</b>	

**Figura. No. 93. Porcentaje de financiamiento del proyecto.**

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Se determinó que no existe una variación considerable ni negativa de las propiedades mecánicas y estructura metalográfica que pueda afectar al desempeño de una junta soldada con un mismo procedimiento de soldadura en dos aceros, (ASTM A36 y A588) de diferentes espesores, con lo cual se garantiza la efectividad de la utilización de un solo procedimiento que abarque varios materiales y espesores y de esta manera mejorar la productividad de una empresa dedicada a la actividad de soldadura.
- El acero ASTM A36 posee una mayor ductilidad que el acero ASTM A588, en contraposición a la tenacidad, en la cual el acero A588 presenta una tenacidad más alta (47.6 J) en relación al acero ASTM A36 (40.9 J), específicamente un 16.38 % mayor teniendo en cuenta una aportación de calor de 17 KJ/ cm en los dos aceros.
- La dureza de las juntas soldadas presentaron su punto más alto entre el material de aporte y el límite de fusión de la junta. Siendo la dureza del acero ASTM A588 en esta zona un 61.69% mayor que el material base (236.43 HRV vs 146.22 HRV). Mientras que para el acero ASTM A36 un 69.66% más duro en la misma zona que en el material base (195.72 HRV vs 136.35 HRV). Por lo que el acero ASTM A36 tiende a presentar mayor endurecimiento que el acero ASTM A588 en la zona del límite de fusión de la junta. Adicionalmente el acero ASTM A588 es un 17.22% más duro que el ASTM A36 en la zona del límite de fusión y un 6.75% más duro que en el material base.



- En una junta soldada existe una mayor probabilidad de formación de microestructuras adversas en la parte superior del cordón de soldadura, entre el material de aporte y el límite de fusión dado que es una zona crítica por la unión de dos materiales diferentes y además el contacto con el medio ambiente hace que se pierda calor de manera más rápida, se descartó la existencia de martensita en todas las juntas soldadas, pero se encontró bainita en el acero ASTM A36 (12 mm) y perlita fina en el acero ASTM A588 (12, 20 mm) , con lo cual la junta soldada no mantiene una estructura homogénea a lo largo ZAC, aunque esto no afecte de manera adversa al comportamiento mecánico de la junta soldada.
- Cuando existe una mayor concentración de Silicio en los materiales sean estos de aporte o base, (mayor al 0.30%), es muy posible que este no alcance a disolverse completamente en la ferrita y forme inclusiones de este material en forma de óxidos, que se ven reflejados en la metalografía y pueden confundirse con posibles carburos.
- Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos para cada uno de los materiales y espesores utilizados, están dentro de los valores que exigen las normativas AWS D1.5 utilizadas para el correcto desempeño de la soldadura realizada.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda para futuras investigaciones utilizar un mayor número de espesores para el análisis de cada material, de esta manera se puede obtener más datos que ayuden a establecer de mejor manera el

comportamiento de los materiales en los diferentes ensayos mecánicos realizados.

- Se recomienda realizar los diferentes ensayos y pruebas en un mismo laboratorio y con las mismas máquinas, ya que de esta forma se tendrá la certeza de que cada espécimen fue ensayado bajo las mismas condiciones y los datos obtenidos se pueden relacionar entre sí más fácilmente. Ya que existe variabilidad de una máquina de ensayos a otra.
- Se debe realizar un control metrológico de las probetas de impacto, haciendo énfasis en la muesca, ya que ciertos materiales como por ejemplo el acero ASTM A588 muestran sensibilidad y presentan variación en sus resultados debido a cambios o diferencias longitudinales o de discontinuidades que puedan estar presentes en el material, lo cual hace que los datos varíen en rango muy altos y se haga más complicado el análisis.
- En investigaciones de este tipo se sugiere que se realicen los mismos ensayos mecánicos que se hacen en una junta soldada al mismo material pero sin soldar. De esta manera se puede tener una idea más clara de cómo es el comportamiento del material base frente a las mismas pruebas mecánicas y así lograr una comparación más real de la variación de las propiedades.

## BIBLIOGRAFÍA

- AHMSA. (2014). *Altos Hornos de Mexico*. Recuperado el 09 de Noviembre de 2014, de AHMSA: <http://www.ahmsa.com/construccion-con-acero/ventajas-de-uso>
- American Standard Testing Materials. (2002). *Norma para ensayo de impacto [E23]* (Vol. E 23). Estados Unidos: ASTM.
- American Standards Test Materials. (2004). *Standard Practice for Liquid Penetrant Examination*. ASTM Internacional.
- American Welding Society. (2008). *Código de Soldadura AWS sección D1.5*. Miami, Estados Unidos: AWS.
- Arqhys. (2014). *Arqhys*. Recuperado el 01 de Agosto de 2014, de <http://www.arqhys.com/arquitectura/acero-composicion.html>
- Arquitectura en Acero / Alacero. (2013). *Arquitectura + Acero*. Recuperado el 01 de Julio de 2014, de <http://www.arquitecturaenacero.org/historia>
- Askeland, D., & Phulé, P. (2003). Ensayo de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria. En D. Askeland, & P. Phulé, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (págs. 260-261). CENGAGE Learning.
- ASM. (2000). *ASM Metals Handbook Vol. 6*. En *ASM Metals Handbook Vol. 6*. The Materials Information Company.
- ASM Internacional. (1992). *Metals Handbook Vol 9 Metallography and Microstruct* (Vol. 09). Estados Unidos: ASM. Recuperado el 06 de Enero de 2015
- Avner, S. (1995). *Introducción a la metalurgia física*. Nueva York : Mc Graw Hill.

- BONNET. (2012). *BONNET Suministros y Maquinaria*. Recuperado el 09 de Noviembre de 2014, de <http://www.bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>
- Calle, G., & Henao, E. (2012). *Universidad Tecnológica de Pereira*. Recuperado el 02 de Agosto de 2014, de <http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAROCKWELL.pdf>
- Calle, G., & Henao, E. (2012). *Universidad Tecnológica de Pereira*. Recuperado el 02 de Agosto de 2014, de <http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAROCKWELL.pdf>
- Catherine, P. (2007). *Revolución Industrial. Blog Personal*.
- de Vedia, L. A., & Svoboda, H. G. (2004). *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura*.
- Departamento de Física Aplicada "Universidad de Sevilla". (s.f.). *Repositorio Digital*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2014, de <http://www.esi2.us.es/IMM2/Pract-html/microsconstituyentes.html>
- Facultad de Ingeniería Universidad Tecnológica Nacional de Argentina. (s.f.). *Repositorio Digital Universidad Tecnológica Nacional de Argentina*. Recuperado el 10 de Marzo de 2015, de [http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/5-\\_Estructuras\\_del\\_acero\\_v2.pdf](http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/5-_Estructuras_del_acero_v2.pdf)
- Facultad de Ingeniería UNLP. (s.f.). *Repositorio Digital de la Universidad Nacional de La Plata Argentina*. Recuperado el 12 de Marzo de 2015, de [http://docsetools.com/articulos-enciclopedicos/article\\_88543.html](http://docsetools.com/articulos-enciclopedicos/article_88543.html)
- Facum inspsold Blogspot. (24 de Julio de 2007). *Facum inspsold Blogspot*. Recuperado el 08 de Diciembre de 2014, de <http://facuminspsold.blogspot.com/2007/07/variables-de-gmaw.html>
- FLOW WATER JET. (2015). *FLOW*. Recuperado el 01 de Febrero de 2015, de <http://www.flowwaterjet.com/es-MX/waterjet-technology/how-waterjets-work.aspx>

- Formación de Soldadores Blogspot. (2013). *Formación de Soldadores Blogspot*. Recuperado el 08 de Diciembre de 2014, de <http://formacionsoldadores.blogspot.com/2011/10/efecto-de-las-variables-en-el-proceso.html>
- Giachino, J., & Weeks, W. (2007). *Técnica y Práctica de la Soldadura*. (Quinta ed.). Chicago, Estados Unidos: Reverté.
- Grote, K. H., & Feldhusen, J. (2014). *DUBBEL Manual para la construcción de maquinaria*. Aachen, Alemania: Springer Vieweg.
- INEC. (12 de Diciembre de 2012). *INEC*. Recuperado el 09 de Noviembre de 2014, de INEC: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Infoeconomia/info10.pdf>
- InfoAcero. (1 de Julio de 2000). *InfoAcero Chile*. Recuperado el 01 de Julio de 2014, de <http://www.infoacero.cl/acero/historia.htm>
- IPLOCA. (2013). *IPLOCA*. Recuperado el 20 de Enero de 2015, de <http://wiki.iploca.com/display/rtswiki/9.10+Mainline+construction+stages>
- ISOTEC. (2010). *www.isotec.com.co*. Recuperado el 26 de Agosto de 2014, de <http://www.isotec.com.co/portal2/index.php?id=56>
- Jaramillo Jiménez, J. O. (2013). *Universidad Nacional de Colombia sede Manizales*. Recuperado el 01 de Julio de 2014, de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%203/ACERO%20ESTRUCTURAL.htm>
- Kansert. (2010). *Kansert*. Recuperado el 02 de Agosto de 2014, de <http://www.kansert.es/Knoop.swf>
- Larre, V. (2013). *UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL DE ARGENTINA*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de *BLOG DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA:*

[http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5\\_anio/metalografia/5-\\_Estructuras\\_del\\_acero\\_v2.pdf](http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/5-_Estructuras_del_acero_v2.pdf)

Martínez , O., Porrúa, R., & Altshuler, E. (2012). *Universidad de La Habana*. Recuperado el 29 de Julio de 2014, de <http://www.fisica.uh.cu/Documentos/EXAF/Metalografia2011.pdf>

Morales , J., Naranjo, C., & Sánchez, X. (2013). Diseño de un procedimiento de soldadura para el AISI 4130 sin Post-calentamiento bajo normas API 6A y ASME Sección IX. *Congreso de Ciencia Y Tecnología Universidad de las Fuerzas Armadas* , 6.

PACKSYS ACADEMY. (26 de Mayo de 2013). Recuperado el 08 de Noviembre de 2014, de <http://www.packsys.com/blog/historia-del-acero/>

Pérez Arroyo, S. (2014). *TECTONICA*. Recuperado el 09 de Noviembre de 2014, de [http://www.tectonica.es/arquitectura/acero/proyecto\\_de\\_futuro.html](http://www.tectonica.es/arquitectura/acero/proyecto_de_futuro.html)

PhiOneLimited. (2013). *PhiOneLimited The Steel Specialist*. Recuperado el 01 de Julio de 2014, de <http://www.spanish.phione.co.uk/tools-resources/astm-explained>

REVISTA TOPE. (2012). Artículos técnicos / Corte. *REVISTA TOPE*, [http://www.revistatope.com/156\\_art\\_KMT\\_CORTE.html](http://www.revistatope.com/156_art_KMT_CORTE.html).

Scrib . (2013). *Scrib*. Recuperado el 02 de Agosto de 2014, de <http://es.scribd.com/doc/2469674/Ensayos-de-Dureza>

Sepúlveda Bello, A. (s.f.). *ACEDEMIA.EDU*. Recuperado el 10 de Marzo de 2015, de [http://www.academia.edu/4702629/LA\\_SOLDADURA\\_DE\\_ARCO](http://www.academia.edu/4702629/LA_SOLDADURA_DE_ARCO)

Solá Molera, P. (s.f.). *Soldadura Industrial: clases y aplicaciones*. Barcelona, España: PRODUCTICA.

- Soldexa. (2007). /Ficha Técnica Material de Aporte FCAW E81T1-Ni1. Perú.
- Takeuchi, C. P. (2006). *Conexiones en Estructuras Metálicas*. Bogotá, Colombia.
- Tecnoficio. (s.f.). *Tecnoficio*. Recuperado el 08 de Diciembre de 2014, de [http://www.tecnoficio.com/soldadura/soldadura\\_electrica4.php](http://www.tecnoficio.com/soldadura/soldadura_electrica4.php)
- Totten, G. (2007). Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies. En T. George, *Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies* (págs. 2-8). New York: Taylor and Francis Group.
- Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas". (2013). *Repositorio Universitario*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2014, de <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2013.pdf>
- Universidad de Buenos Aires. (2010). *Micrositio de ingeniería*. Recuperado el 04 de Agosto de 2014, de [http://190.105.160.51/~material/materiales/lab/guia\\_metalograf%EDa.pdf](http://190.105.160.51/~material/materiales/lab/guia_metalograf%EDa.pdf)
- Universidad Tecnológica de Pereira. (2014). *Blog de Metalografía UTP*. Recuperado el 12 de Enero de 2015
- Varona, J., Gutiérrez Solana, F., & González, J. (Julio de 1992). Comportamiento en Fatiga de Puentes Metálicos Antiguos de Ferrocarril. 9.
- Zalazar, M., Ramini, M., Surian, E., Bruna , R., & Baralla , E. (2009). *Efecto del procedimiento de soldadura sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros microaleados para cañería*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina., Sao Paulo.

# ANEXOS