

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**TESIS**

**“SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A607 GRADO 50 CON EL ACERO  
ASTM A36 POR EL PROCESO SMAW EN EL ALARGUE DEL CHASIS  
PARA EL ENSAMBLE DE CARROCERIAS DE BUSES”  
(Investigación Tecnológica)**

**Tesis presentado por los Bachilleres:**

**Br. CHAUPI QUISPE, YOVANA**

**Br. YUCRA HUAMANI, ALEX ANDY**

**Para optar al Título Profesional de  
INGENIERO METALÚRGICO**

**Asesor:**

**ING. GUILLERMO BARRIOS RUIZ**

**CUSCO – PERÚ**

**2019**

## DEDICATORIA

### **A Dios,**

Por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón, mi mente y apostar de nuevo en mi misma y haber puesto en mi camino a esas personas que han sido mi soporte.

### **A mi padre Higidio Chaupi**

Por darme los consejos y por creer en mí siempre. Papá gracias por darme siempre un gran apoyo emocional y económico en el transcurso de toda mi vida universitaria, y enseñarme a luchar, sobre todo, por los caminos difíciles, dejándome claro que “el que quiere ser, es”, con conocimiento empatía y liderazgo, como lo hiciste, y “vamos por más”.

### **A mi Mamita Juana Quispe**

Por ser una guerrera y transmitirme esa fuerza que me impulsa a seguir mis sueños. Gracias por siempre apoyarme, aconsejarme y alentarme con un “si puedes”, sin ti no llegaba hasta este punto de mi vida. Lo que soy te lo debo y también mi papa y hermanos te lo deben, ya que tú eres el motor para lograrlo todo con sacrificio.

**A mis Hermanos Kevin y Luz del cielo,** que son una motivación grande para lograr mis objetivos y levantarme cada día.

**A mis abuelitos Raymunda, Casiano Antonia y a mis tíos, primos y a toda mi familia y amigos** que valoro mucho .gracias por sus grandes consejos y la forma de ver la vida con optimismo y alegría.

### **A una maravillosa persona,**

Por apoyarme incondicionalmente, por preocuparse por mí, por su paciencia y transmitirme sus ganas de superación te admiro, no dejes de arriesgar y luchar siempre por tus sueños.

Chaupi Quispe, Yovana

Dedico esta tesis **a Dios**

Por brindarme salud, sabiduría y perseverancia en el logro de mis objetivos.

**A mis padres.**

A mi mamá Timotea Huamani Ramos, que aunque no esté presente fue una gran amiga y madre y porque su deseo más profundo fue que yo sea profesional. A mi papá Eladio Yucra Paccori, que está siempre a mi lado a pesar de las dificultades.

**A mis familiares**

A mi abuelita Vicentina Ramos Huamani, a mis tíos, a mis primos y a toda mi familia, por brindarme su apoyo en los momentos más difíciles de mi carrera profesional, y también luego de haber egresado, espero poder retribuirles en gran medida.

**A mis amigos y compañeros,**

Por los bonitos momentos que pasamos en la universidad y en el trabajo, también por los fracasos y frustraciones, siempre se aprende de las caídas.

**A mi segunda mamá,**

Delia Mamani Roque por apoyarme incondicionalmente, y por ser pilar emocional en la conclusión de la tesis, no lo hubiese logrado sin su ayuda.

**A una persona especial,**

Milagros Mendivil Mamani, por estar a mi lado y por bríndame su apoyo en todo momento, dedico este trabajo con mucho cariño.

**Yucra Huamani, Alex Andy**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios por todo lo otorgado, por la protección diaria y por permitirnos alcanzar nuestros sueños.

A la Tricentenaria Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por ser nuestra casa de estudios superiores, por ende nuestra alma mater.

A la Facultad de Ingeniería Geología, Minas y Metalúrgica, en particular a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

A todos los Docentes, por ser parte de nuestra formación universitaria.

Al Ing. Guillermo Barrios Ruiz, por ser nuestro asesor y por apoyarnos en la elaboración y culminación de la tesis. De la misma forma, agradecemos al: Ing. Julio Farfán Yépez por permitirnos el acceso al laboratorio de metalurgia física y compartir su conocimiento; también al Ing. Alfredo Paucará M. por permitirnos acceder al laboratorio de control de calidad del instituto superior SENATI; y al Ing. Raúl Allauca Sierra por colaborar con el laboratorio de la prueba de dobles y de Charpy.

Y por último, a nuestros padres, amigos y compañeros que de todas formas contribuyeron para que este trabajo sea finalizado.

**Chaupi Quispe, Yovana**

**Yucra Huamani, Alex Andy**

## **PRESENTACIÓN**

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

SEÑORES MIEMBROS DEL JURADO

En cumplimiento al Reglamento para Optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica, ponemos a vuestra disposición el trabajo de investigación intitulado:

**“SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A607 GRADO 50 CON EL ACERO  
ASTM A36 POR EL PROCESO SMAW EN EL ALARGUE DEL CHASIS  
PARA EL ENSAMBLE DE CARROCERIAS DE BUSES”  
(Investigación Tecnológica)**

El presente trabajo de investigación de carácter explicativo – experimental es el resultado de la recopilación minuciosa de información respecto al tema y de la experiencia que se obtuvo en la empresa carrocera INTRAMET S.R.L., con el que esperamos cumplir con las exigencias requeridas. Así mismo, sirva de material de investigación y apoyo para personas que lo requieran.

**Chaupi Quispe, Yovana**

**Yucra Huamani, Alex Andy**

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar el nivel de soldabilidad del acero ASTM A 607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW, con el fin de obtener uniones por soldadura de calidad en el alargue de chasis para el ensamble de carrocerías para buses. En ese sentido, se formuló la siguiente hipótesis: la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW es óptimo cuando está sustentado en las condiciones de soldabilidad. La metodología empleada es de tipo experimental y de carácter explicativo. En consecuencia, se determinó las condiciones de soldabilidad a través de las siguientes variables: Tipo de electrodo, Intensidad de corriente y Ángulo de avance del electrodo, variables que se utilizaron en las pruebas experimentales empleando el diseño factorial  $2^3$ . Y también se consideró los procedimientos de soldadura recomendados por el código de soldadura AWS D1.1.

Se realizó el ensayo de dureza a un total de dieciséis probetas unidas por soldadura, del acero ASTM A607 grado 50 con el acero ASTM A36, con el fin de determinar su soldabilidad. Además, se realizó el ensayo de impacto Charpy y el ensayo Metalográfico, para complementar el estudio; y también el ensayo de dobles para la inspección de la resistencia del cordón de soldadura.

En el ensayo de dureza, aplicado a la ZAC de una probeta soldada, se obtuvo un valor de 27 HRC, en comparación a la dureza de los aceros del metal base de 25 HRC, es decir no hubo endurecimiento elevado de la ZAC producto de los cambios microestructurales de la soldadura, cuando se cumplieron las siguientes condiciones de soldabilidad: Tipo de electrodo: E 7018 (supecito), Intensidad de corriente: 125 A, ángulo de avance del electrodo:  $10^\circ$ . Finalmente, se utilizó el software estadístico Minitab, mediante el cual se estableció el siguiente modelo matemático:  $Dureza\ HRC = -208.9 + 1.825\ B + 11.74\ C - 0.0875\ BC$ . Demostrando que la variable más influyente en la soldabilidad es la Intensidad de corriente, seguido del ángulo de avance del electrodo y tipo de metal de aporte. De la misma forma, los resultados del ensayo de impacto de Charpy y del ensayo metalográfico, junto con los resultados del cálculo del ancho de la ZAC y de la dilución, comprobaron la buena soldabilidad del acero ASMT A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36.

### **PALABRAS CLAVE:**

Soldabilidad, acero ASTM A607 GRADO 50, acero ASTM A36, proceso SMAW

## ABSTRACT

The purpose of this research work is to determine the weldability level of ASTM A607 GRADE 50 steel with ASTM A36 steel by the SMAW process, in order to obtain quality welding joints in the chassis extension for the body assembly for buses. In that sense, the following hypothesis was formulated: the weldability of ASTM A607 GRADE 50 steel with ASTM A36 steel by the SMAW process is optimal when it is supported under weldability conditions. The methodology used is experimental and explanatory. Consequently, the weldability conditions were determined through the following variables: Type of electrode, Current intensity and Angle of advance of the electrode, variables that were used in the experimental tests using the factorial design 23. And the procedures were also considered. Welding recommended by welding code AWS D1.1.

The hardness test was carried out on a total of sixteen welded test specimens, of ASTM A607 grade 50 steel with ASTM A36 steel, in order to determine its weldability. In addition, the Charpy impact test and the Metallographic test were performed to complement the study; and also the double test for the inspection of the resistance of the weld bead.

In the hardness test, applied to the ZAC of a welded specimen, a value of 27 HRC was obtained, compared to the hardness of the base metal steels of 25 HRC, when the following weldability conditions were met: Type of electrode : E 7018 (supecito), Current intensity: 125 A, electrode advance angle: 10 °. Finally, the Minitab statistical software was used, through which the following mathematical model was established:  $HRC \text{ hardness} = -208.9 + 1.825 B + 11.74 C - 0.0875 BC$ . Demonstrating that the most influential variable in weldability is the current intensity, followed by the angle of advance of the electrode and type of input metal. In the same way, in the Charpy impact test and in the metallographic test, together with the doubles test and with the results of the calculations of the ZAC width and dilution, the good weldability of ASMT A607 steel was verified. GRADE 50 with ASTM A36 steel.

### KEYWORDS:

Weldability, ASTM A607 GRADE 50 steel, ASTM A36 steel, SMAW process

## INDICE

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTO .....	iii
PRESENTACIÓN .....	iv
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
INDICE.....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE TABLAS .....	xv
SIGLAS Y ABREVIATURAS .....	xvii
INTRODUCCION.....	xviii
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.2.1. PROBLEMA GENERAL .....	2
1.2.2. PROBLEMAS ESPECIFICOS .....	2
1.2.2.1. PROBLEMA ESPECÍFICO 1 .....	2
1.2.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICO 2 .....	2
1.2.2.3. PROBLEMA ESPECÍFICO 3 .....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3.1. JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA.....	2
1.3.2. JUSTIFICACIÓN SOCIAL.....	2
1.3.3. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA .....	2
1.3.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL.....	3
1.4. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
1.5. OBJETIVOS.....	3
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.5.2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 1 .....	3
1.5.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 2 .....	3
1.5.2.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 3 .....	3
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO .....	9

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
2.1.1.	ANTECEDENTES INTERNACIONALES .....	9
2.1.2.	ANTECEDENTES NACIONALES .....	9
2.2.	BASES TEÓRICAS .....	10
2.2.1.	SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO .....	10
2.2.1.1.	SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW).....	10
2.2.1.2.	ELECTRODO O MATERIAL DE APORTE DE LA SOLDADURA .....	11
2.2.1.2.1.	Funciones del revestimiento del electrodo.....	12
2.2.1.2.2.	Composición química del revestimiento del electrodo.....	13
2.2.1.2.3.	Clasificación de los electrodos de acuerdo al tipo de revestimiento.....	14
2.2.1.2.4.	Clasificación de los electrodos según la Sociedad Americana de la Soldadura (AWS) .....	15
2.2.1.3.	VARIABLES OPERACIONALES DEL PROCESO SMAW .....	19
2.2.1.3.1.	Diámetro del electrodo .....	19
2.2.1.3.2.	Intensidad de corriente o amperaje.....	19
2.2.1.3.3.	Longitud de arco.....	20
2.2.1.3.4.	Ángulo de inclinación del electrodo.....	20
2.2.1.3.5.	Velocidad de avance.....	21
2.2.1.4.	PREPARACIÓN DE JUNTAS DE LA SOLDADURA .....	22
2.2.1.4.1.	Junta a tope.....	23
2.2.1.4.2.	Junta a traslape .....	25
2.2.1.4.3.	Junta de borde o unión de canto .....	25
2.2.1.5.	POSICIONES DE SOLDADURA .....	26
2.2.1.5.1.	Soldadura eléctrica en posición vertical.....	26
2.2.1.6.	ENSAYOS DESTRUCTIVOS EN UNIONES SOLDADADAS .....	27
2.2.1.6.1.	Ensayo de tracción .....	27
2.2.1.6.2.	Ensayo de doblado .....	28
2.2.1.6.3.	Ensayo de impacto .....	28
2.2.1.6.4.	Ensayo de dureza .....	29
2.2.1.7.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	31
2.2.1.7.1.	Inspección Visual.....	31
2.2.1.7.2.	Líquidos Penetrantes.....	32
2.2.1.7.3.	Partículas Magnéticas .....	32
2.2.1.7.4.	Radiografía Industrial .....	33
2.2.1.7.5.	Ultrasonido Industrial.....	33

2.2.1.8.	CODIGO DE SOLDADURA ESTRUCTURAL ANSI/ AWS D1.1 .....	33
2.2.1.8.1.	Precalificación de las WPS.....	34
2.2.1.8.2.	Calificación .....	35
2.2.2.	METALURGIA DE LA SOLDADURA.....	37
2.2.2.1.	ZONAS METALÚRGICAS DE LA SOLDADURA .....	37
2.2.2.1.1.	Zona de fusión.....	37
2.2.2.1.2.	Zona afectada por el calor (ZAC).....	38
2.2.2.1.3.	El metal base .....	39
2.2.2.2.	CICLO TÉRMICO DE LA SOLDADURA .....	39
2.2.2.2.1.	Imput térmico o energía de la soldadura.....	41
2.2.2.2.2.	Ecuación de la temperatura máxima en cada punto de la ZAC .....	42
2.2.2.3.	SOLDABILIDAD.....	43
2.2.2.3.1.	Soldabilidad operatoria.....	44
2.2.2.3.2.	Soldabilidad metalúrgica.....	44
2.2.2.3.3.	Soldabilidad constructiva .....	44
2.2.2.4.	SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS AL CARBONO Y DE BAJA ALEACION.....	45
2.2.2.4.1.	Carbono equivalente .....	46
2.2.2.4.2.	Dilución.....	47
2.2.2.5.	TRANSFORMACIONES DE FASE DEL ACERO EN LA SOLDADURA .....	48
2.2.2.5.1.	Transformaciones de fase en la fase solida durante el calentamiento.....	50
2.2.2.5.2.	Transformaciones de fase en el enfriamiento .....	51
2.2.2.6.	SOLIDIFICACIÓN DE LA SOLDADURA .....	52
2.2.2.6.1.	Solidificación inicial del poso de soldadura.....	52
2.2.2.6.2.	Crecimiento competitivo.....	52
2.2.2.7.	MICROESTRUCTURA .....	53
2.2.2.7.1.	La ferrita alotriomórfica .....	54
2.2.2.7.2.	La ferrita acicular.....	54
2.2.2.7.3.	La ferrita de Widmanstaetten .....	54
2.2.2.7.4.	Microfases .....	54
2.2.3.	ENSAMBLE DE CARROCERÍAS.....	55
2.2.3.1.	CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL ENSAMBLE DE CARROCERÍAS .....	55
2.2.3.1.1.	Chasis.....	55
2.2.3.1.2.	Carrocerías .....	55

2.2.3.2.	PROCESO DE ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA DE CARROCERÍAS .....	55
2.2.3.2.1.	Preparación del chasis.....	56
2.2.3.2.2.	Armado de la estructura de la carrocería .....	57
2.2.3.2.3.	Montaje.....	58
2.2.3.3.	TIPOS DE ACEROS EMPLEADOS EN EL ENSAMBLE DE CARROCERÍAS .....	59
2.2.3.3.1.	Acero DIN S355MC o ASTM A607 GRADO 50.....	59
2.2.3.3.2.	Acero ASTM A36 y acero ASTM A500 .....	61
2.2.3.3.3.	Diagrama Esfuerzo – Deformación del acero ASTM A607 grado 50 y del acero ASTM A36.....	62
2.3.	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	63
2.3.1.	HIPÓTESIS GENERAL .....	63
2.3.2.	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS .....	63
2.3.2.1.	HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1 .....	63
2.3.2.2.	HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2 .....	63
2.3.2.3.	HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3 .....	63
2.4.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES .....	63
2.4.1.	VARIABLE DEPENDIENTE .....	63
2.4.2.	VARIABLES INDEPENDIENTES .....	64
2.4.3.	VARIABLES INTERVINIENTES .....	64
2.4.4.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	64
CAPÍTULO III		
	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	66
3.1.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN .....	66
3.2.	SISTEMAS Y PROCESOS IDENTIFICADOS .....	66
3.3.	PROTOCOLO DE DESARROLLO DE EXPERIMENTOS.....	67
3.4.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	68
3.4.1.	ANÁLISIS Y NIVELES DE LAS VARIABLES.....	68
3.4.1.1.	VARIABLES INDEPENDIENTES .....	68
3.4.1.2.	VARIABLE DEPENDIENTE .....	69
3.4.2.	DISEÑO FACTORIAL 2 <sup>3</sup> CON DOS RÉPLICAS.....	69
3.5.	EQUIPAMIENTO E INSTRUMENTACIÓN .....	72
3.5.1.	MÁQUINA DE SOLDAR ELÉCTRICA .....	72
3.5.2.	DURÓMETRO ROCKWELL .....	72

3.5.3.	EQUIPO DE DOBLES DE PROBETAS .....	73
3.5.4.	PÉNDULO DE CHARPY .....	73
3.5.5.	DESBASTADOR METALOGRÁFICO .....	73
3.5.6.	PULIDOR METALOGRÁFICO .....	74
3.5.7.	MICROSCOPIO ÓPTICO .....	74
3.5.8.	HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS .....	75
3.6.	MATERIALES DE LA INVESTIGACION .....	75
3.6.1.	MATERIAL BASE.....	75
3.6.1.1.	Análisis químico .....	76
3.6.1.2.	Propiedades mecánicas .....	78
3.6.2.	MATERIAL DE APORTE.....	78
3.7.	POBLACIÓN Y MUESTRA .....	79
3.7.1.	POBLACIÓN.....	79
3.7.2.	MUESTRA .....	79
3.8.	PROCEDIMIENTO DE LA SOLDADURA .....	79
3.8.1.	REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO (PQR) .....	79
3.8.1.1.	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PARA EL ELECTRODO E 7018 .....	80
3.8.1.2.	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PARA EL ELECTRODO E 8018 .....	80
3.8.2.	PREPARACIÓN DE LA JUNTA DE SOLDADURA .....	82
3.8.2.1.	DIMENSIONES DE LA JUNTA DE SOLDADURA .....	82
3.8.2.2.	CONFIGURACIÓN DE LA JUNTA .....	82
3.8.2.3.	BISELADO DE LAS PROBETAS DE SOLDADURA .....	83
3.8.2.4.	ENSAMBLE DE LA JUNTA DE SOLDADURA.....	83
3.8.3.	PROCESO DE SOLDEO .....	84
3.8.3.1.	PASE RAÍZ .....	84
3.8.3.2.	PASE DE RELLENO .....	86
3.8.3.3.	PASE DE ACABADO.....	87
3.9.	TÉCNICAS DE RECOLECCION DE DATOS PARA LA INVESTIGACIÓN ....	87
3.9.1.	INSPECCION VISUAL .....	87
3.9.2.	ENSAYO DE DOBLES .....	89
3.9.3.	ENSAYO DE DUREZA .....	90
3.9.4.	ENSAYO DE CHARPY .....	92
3.9.5.	ENSAYO METALOGRÁFICO .....	94
3.9.6.	CÁLCULOS DE SOLDADURA .....	98

3.9.6.1.	VELOCIDAD DE AVANCE .....	98
3.9.6.2.	CALOR NETO .....	99
3.9.6.3.	ANCHO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR.....	100
3.9.6.4.	DILUCIÓN .....	103
3.9.6.5.	COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL DEPÓSITO DE SOLDADURA .....	105
CAPÍTULO IV		
RESULTADOS .....		110
4.1. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		110
4.1.1. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN VISUAL ..		110
4.1.2. INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLES .....		110
4.1.2.1. Presentación de resultados del ensayo de dobles.....		110
4.1.2.2. Interpretación del ensayo de dobles.....		111
4.1.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA .....		113
4.1.3.1. Presentación de resultados de dureza.....		113
4.1.3.2. Análisis e interpretación de resultados de dureza en la ZAC para el acero ASTM A607 GRADO 50 .....		113
4.1.4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO DE CHARPY .....		117
4.1.4.1. Presentación de resultados del ensayo de Charpy .....		117
4.1.4.2. Análisis e interpretación del ensayo de Charpy.....		117
4.1.5. INTERPRETACIÓN PARA EL ENSAYO METALOGRÁFICO .....		119
4.1.5.1. Análisis e interpretación para el acero ASTM A36.....		119
4.1.5.2. Análisis e interpretación para el acero ASTM A607 GRADO 50.....		120
4.1.5.3. Análisis e interpretación para la soldadura con el electrodo E 7018 .....		123
4.1.5.4. Análisis e interpretación para la soldadura con el electrodo E8018 .....		125
4.1.6. INTERPRETACION DE RESULTADOS PARA EL CÁLCULO DE ANCHO DE LA ZAC Y PARA EL CÁLCULO DE DILUCIÓN.....		127
4.1.6.1. Interpretación de resultados del ancho de la ZAC .....		127
4.1.6.2. Interpretación de resultados del cálculo de dilución.....		127
4.1.6.3. Interpretación de resultados del cálculo de la composición química del depósito de soldadura. ....		128
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		129
CONCLUSIONES.....		130
RECOMENDACIONES .....		131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		132
ANEXOS .....		135

## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2. 1. Partes del circuito de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) .....	10
Figura N° 2. 2. Fusión del electrodo.....	11
Figura N° 2. 3. Partes de un electrodo.....	12
Figura N° 2. 4. Nomenclatura AWS A5.1 para los electrodos de acero al carbono.....	16
Figura N° 2. 5. Nomenclatura AWS A5.5 para los electrodos de acero de baja aleación... ..	18
Figura N° 2. 6. Tipos de junta .....	23
Figura N° 2. 7. Junta a tope con bordes rectos .....	23
Figura N° 2. 8. Junta a tope con bordes en V .....	24
Figura N° 2. 9. Junta a tope con bordes en doble V .....	24
Figura N° 2. 10. Junta a tope con bordes en U .....	25
Figura N° 2. 11. Juntas a tope con el método ascendente .....	27
Figura N° 2. 12. Ensayo de dobles con dispositivo guiado estándar.....	28
Figura N° 2. 13. Ensayo de impacto Charpy .....	29
Figura N° 2. 14. Penetrador Brinell.....	30
Figura N° 2. 15. Ensayo de dureza Rockwell.....	30
Figura N° 2. 16. Soldadura simple en ranura en V y con junta a tope .....	34
Figura N° 2. 17. Probeta para doblado de raíz y cara.....	36
Figura N° 2. 18. Principales zonas de la soldadura .....	37
Figura N° 2. 19. Regiones de la zona de fusión .....	38
Figura N° 2. 20. Regiones de la zona afectada por el calor.....	38
Figura N° 2. 21. Ciclo térmico de la soldadura .....	39
Figura N° 2. 22. Distribución de temperatura del ciclo térmico .....	40
Figura N° 2. 23. Curvas isométricas de una plancha sometida a soldadura a tope .....	41
Figura N° 2. 24. Temperatura máxima de la ZAC a una distancia Y.....	42
Figura N° 2. 25. Diagrama de Graville para la clasificación de aceros.....	47
Figura N° 2. 26. Dilución para diferentes tipos de junta .....	47
Figura N° 2. 27. Diagrama de hierro – carbono .....	49
Figura N° 2. 28. Estructuras generadas en el calentamiento del proceso de soldadura de un acero al carbono .....	51
Figura N° 2. 29. Diagrama tiempo – temperatura – transformación del acero AISI 1045..	51
Figura N° 2. 30. Continuidad entre los granos de la zona afectada por el calor (ZAC) y de la zona de fusión (ZF) .....	52
Figura N° 2. 31. Crecimiento competitivo entre los granos de la zona fundida.....	53
Figura N° 2. 32. Constituyentes esenciales de la microestructura primaria en un depósito de soldadura de acero .....	53
Figura N° 2. 33. Morfología de la ferrita de Widmanstätten primaria y secundaria .....	54
Figura N° 2. 34. Chasis de un bus urbano Hino .....	55
Figura N° 2. 35. Diagrama general de proceso de ensamblaje.....	56
Figura N° 2. 36. Alineación estructura de alargamiento – chasis .....	57
Figura N° 2. 37. Distribución de placas sobre el chasis .....	57
Figura N° 2. 38. Diagrama de flujo para el montaje de la carrocería.....	58
Figura N° 2. 39. Estructura metálica de la carrocería ensamblada.....	59
Figura N° 2. 40. Larguero del chasis.....	60
Figura N° 2. 41. Diagrama Esfuerzo – Deformación del acero ASTM A607 grado 50 y del acero ASTM A36 .....	62
Figura N° 3. 1. Modelo general del proceso de soldadura SMAW .....	66

Figura N° 3. 2. Protocolo de desarrollo de experimentos.....	67
Figura N° 3. 3. Diseño factorial 23 y su representación geométrica .....	70
Figura N° 3. 4. Sobrantes de chasis.....	75
Figura N° 3. 5. Planchas de 5/16 de acero ASTM A36.....	76
Figura N° 3. 6. Diagrama de Graville para el CE del acero A607 GRADO 50 y del acero A36 .....	77
Figura N° 3. 7. Dimensiones de la junta de soldadura .....	82
Figura N° 3. 8. Configuración de la junta soldadura .....	82
Figura N° 3. 9. Biselado de las probetas del acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36 .....	83
Figura N° 3. 10. Ensamble de la junta de soldadura .....	84
Figura N° 3. 11. Inicio de soldadura en 3G y esmerilado del empalme del cordón.....	85
Figura N° 3. 12. Esmerilado del cordón .....	85
Figura N° 3. 13. Cordón del pase relleno .....	86
Figura N° 3. 14. Cordón del pase de acabado .....	87
Figura N° 3. 15. Probetas soldadas.....	88
Figura N° 3. 16. Ubicación y dimensiones de las probetas para los ensayos.....	88
Figura N° 3. 17. Preparación de probetas para el ensayo de dobles.....	89
Figura N° 3. 18. Matriz de plantilla guía y doblado de las probetas .....	89
Figura N° 3. 19. Probetas después del ensayo de dobles.....	90
Figura N° 3. 20. Superficies de las probetas preparadas para el ensayo de dureza.....	90
Figura N° 3. 21. Accesorios del durómetro Rockwell y equipo energizado .....	91
Figura N° 3. 22. Esquema de barrido de dureza.....	91
Figura N° 3. 23. Dimensiones para probetas de impacto .....	92
Figura N° 3. 24. Probeta preparada para el ensayo de impacto.....	92
Figura N° 3. 25. Probetas rotas después del ensayo de impacto Charpy.....	93
Figura N° 3. 26. Trazado y corte de las probetas para el ensayo metalográfico .....	94
Figura N° 3. 27. Desbaste y pulido de las probetas a analizar metalográficamente.....	95
Figura N° 3. 28. Orden de los materiales e insumos para el ataque químico .....	95
Figura N° 3. 29. Etapas del ataque químico para el ensayo metalográfico .....	96
Figura N° 3. 30. Probetas después del ataque químico .....	97
Figura N° 3. 31. Observación de las microestructuras con el microscopio.....	97
Figura N° 3. 32. Probeta soldada atacada con el reactivo NITAL .....	103
Figura N° 3. 33. Pases de soldadura proyectadas a partir de la probeta soldada.....	103
Figura N° 3. 34. Áreas de las pases de soldadura y de las diluciones presentadas .....	104
Figura N° 4. 1. Probetas que pasaron exitosamente la prueba de dobles .....	112
Figura N° 4. 2. Diagrama de Pareto de efectos estimados .....	115
Figura N° 4. 3. Superficie de dureza vs ángulo de avance, intensidad de corriente.....	116
Figura N° 4. 4. Grafica de cubo y respuesta predicha para la dureza de la ZAC del acero ASTM A607 GRADO 50.....	116
Figura N° 4. 5. Superficies de las probetas rotas por el ensayo Charpy.....	118
Figura N° 4. 6. Microestructura del acero ASTM A36 a 100X y 500X.....	119
Figura N° 4. 7. Imagen binarizada del acero ASTM A36 .....	120
Figura N° 4. 8. Microestructura del acero A607 GRADO 50 a 100X y 500X .....	121
Figura N° 4. 9. Imagen binarizada del acero ASTM A607 GRADO 50.....	122
Figura N° 4. 10. Microestructuras de la probeta soldada con el electrodo E7018 .....	123
Figura N° 4. 11. Binarización de la soldadura con E7018 en la ZF – ZAC .....	124
Figura N° 4. 12. Microestructuras de la soldadura con el electrodo E 8018 .....	125
Figura N° 4. 13. Binarización de la soldadura con E8018 en la ZF – ZAC .....	126

## LISTA DE TABLAS

Tabla N° 2. 1. Funciones de algunos compuestos del revestimiento .....	13
Tabla N° 2. 2. Clasificación de los electrones de acuerdo al tipo de revestimiento.....	15
Tabla N° 2. 3. Normas AWS para electrodos revestidos .....	16
Tabla N° 2. 4. Indicadores de las características conjuntas de los electrodos correspondientes al último dígito en la clasificación AWS A5.1 .....	17
Tabla N° 2. 5. Códigos de designación de la clasificación AWS A5.5.....	18
Tabla N° 2. 6. Rango de intensidad de corriente o amperaje de soldadura .....	19
Tabla N° 2. 7. Posiciones de soldadura de ranura en planchas .....	26
Tabla N° 2. 8. Escalas de dureza Rockwell.....	31
Tabla N° 2. 9. Rendimiento térmico de los procesos de arco.....	42
Tabla N° 2. 10. Composición química del acero ASTM A607 GRADO 50.....	60
Tabla N° 2. 11. Propiedades mecánicas del acero ASTM A607 GRADO 50.....	60
Tabla N° 2. 12. Composición química del acero ASTM A 36 y del acero ASTM A500 .	61
Tabla N° 2. 13. Propiedades mecánicas del acero ASTM A 36 y del acero ASTM A500 .	61
Tabla N° 2. 14. Subvariables dependientes .....	63
Tabla N° 2. 15. Variables independientes .....	64
Tabla N° 2. 16. Variables intervinientes .....	64
Tabla N° 2. 17. Operacionalización de variables .....	65
Tabla N° 3. 1. Análisis y niveles de las variables independientes	68
Tabla N° 3. 2. Niveles de prueba de los factores del diseño experimental	70
Tabla N° 3. 3. Planteamiento del diseño factorial 2 <sup>3</sup> con dos replicas (orden de las pruebas experimentales)	71
Tabla N° 3. 4. Características técnicas de la máquina de soldar eléctrica	72
Tabla N° 3. 5. Características técnicas del equipo del durómetro Rockwell	72
Tabla N° 3. 6. Características técnicas del equipo de dobles	73
Tabla N° 3. 7. Características técnicas del péndulo de Charpy	73
Tabla N° 3. 8. Características técnicas del desbastador metalográfico	74
Tabla N° 3. 9. Características técnicas del pulidor metalográfico	74
Tabla N° 3. 10. Características técnicas del microscopio óptico	74
Tabla N° 3. 11. Características técnicas de herramientas e instrumentos	75
Tabla N° 3. 12. Composición química del acero ASTM A607 y del acero ASTM A36	76
Tabla N° 3. 13. Propiedades mecánicas del acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36	78
Tabla N° 3. 14. Propiedades químicas de los electrodos E6011, E7018 y E8018	78
Tabla N° 3. 15. Propiedades mecánicas de los electrodos E6011, E7018 y E8018	78
Tabla N° 3. 16. Características de soldeo de los electrodos E6011, E7018 y E8018	79
Tabla N° 3. 17. Procedimiento de soldadura para el electrodo E7018	80
Tabla N° 3. 18. Procedimiento de soldadura para el electrodo E8018	81
Tabla N° 3. 19. Determinación de velocidad de avance en las etapas de soldeo	98
Tabla N° 3. 20. Velocidades de avance para las diferentes intensidades de corriente	99
Tabla N° 3. 21. Resumen de resultados para hallar el ancho de la ZAC	102
Tabla N° 3. 22. Composición química de los materiales para el pase raíz	106
Tabla N° 3. 23. Composición química los materiales para el pase relleno con el electrodo E7018	107

Tabla N° 3. 24. Composición química de los materiales para el acabado con el electrodo E7018	107
Tabla N° 3. 25. Composición química de los materiales para el acabado con el electrodo E7018	108
Tabla N° 3. 26. Composición química del metal base y de aporte para el acabado	109
Tabla N° 4. 1. Resultados de la inspección visual	110
Tabla N° 4. 2. Resultados del ensayo de dobles	111
Tabla N° 4. 3. Resultados del ensayo de dureza	113
Tabla N° 4. 4. Resultados de dureza para la ZAC en el acero A607 grado 50	114
Tabla N° 4. 5. ANOVA para los datos de dureza de la ZAC en el acero A607 grado 50	114
Tabla N° 4. 6. Resultados del ensayo de impacto Charpy	117
Tabla N° 4. 7. Análisis químico del acero ASTM A36	119
Tabla N° 4. 8. Resultado del análisis de imagen del acero ASTM A36	120
Tabla N° 4. 9. Análisis químico del acero A607 GRADO 50	121
Tabla N° 4. 10. Resultado del análisis de imagen del acero ASTM A607 grado 50	122
Tabla N° 4. 11. Resultados del análisis de imagen con E7018 en la ZF y en la ZAC	124
Tabla N° 4. 12. Resultados del análisis con E8018 en la ZF y en la ZAC	126
Tabla N° 4. 13. Resultados del cálculo del ancho de la ZAC	127
Tabla N° 4. 14. Resultados del cálculo de dilución	127
Tabla N° 4. 15. Resultados de la composición química del depósito de soldadura con el electrodo E7018	128
Tabla N° 4. 16. Resultados de la composición química del depósito de soldadura con el electrodo E8018	128

## SIGLAS Y ABREVIATURAS

<b>ASTM</b>	: American Society for Testing Materials (Sociedad americana para la prueba de materiales)
<b>A.A.E.</b>	: Ángulo de avance del electrodo
<b>AWS</b>	: American Welding Society (Sociedad americana de soldadura)
<b>CE</b>	: Carbono equivalente
<b>CJP</b>	: Junta de ranura de penetración completa
<b>DIN</b>	: Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán para la Normalización)
<b>GMAW</b>	: Gas metal Arc Welding (Soldadura por arco con gas de protección y metal)
<b>GTAW</b>	: Gas Tungsten Arc Welding (soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas)
<b>HSLA</b>	: High strength low alloy Steel (acero de alta resistencia y baja aleación)
<b>I.C.</b>	: Intensidad de corriente
<b>MB</b>	: Metal Base
<b>PJP</b>	: Junta de ranura de penetración parcial
<b>PQR</b>	: Procedure Qualification Records (Registro de Calificación de procedimiento)
<b>SAW</b>	: Submerged Arc Welding (Soldadura de arco sumergido)
<b>SMAW</b>	: Shielded Metal Arc Welding (Soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido)
<b>TIG</b>	: Tungsten Inert Gas (Soldadura con gas inerte y tungsteno)
<b>T.E.</b>	: Tipo de electrodo
<b>WPS</b>	: Welding Procedure Specification (Especificación del Procedimiento de Soldadura)
<b>ZAC</b>	: Zona Afectada por el Calor
<b>ZF</b>	: Zona Fundida

## INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación se refiere al tema de la Soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW, el cual se aplica en el alargue de chasis para el ensamble de carrocerías para buses. Donde el acero ASTM A607 GRADO 50 corresponde al chasis y el acero ASTM A36 corresponde a la estructura de alargue. Se define la soldabilidad como la capacidad de un metal para ser soldado, produciendo una soldadura sana, de calidad y válida para el servicio. La finalidad de la soldabilidad es conseguir la continuidad metálica de la unión, es decir, que la junta soldada debe poseer la misma composición química y las mismas propiedades mecánicas a lo largo de todo el metal base.

Las causas del presente trabajo de investigación parten de la diferencia en composición química y en propiedades mecánicas, del acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36. Tomando en cuenta que para el caso del acero ASTM A607 se trata de un acero de alta resistencia y de baja aleación, mientras que para caso del acero ASTM A36 se trata de un acero de bajo carbono. La investigación de ésta problemática se realizó con el interés de obtener soldaduras de calidad en el alargue de chasis que se realiza en el proceso de ensamble de carrocería para buses.

De esta manera, se realizó las pruebas experimentales aplicando el diseño factorial 2<sup>3</sup>. Asimismo, se realizó ensayos de control de calidad a las probetas soldadas con la finalidad de determinar su soldabilidad. Estos ensayos incluyeron el ensayo de dureza, el ensayo de impacto Charpy, el ensayo metalográfico y el ensayo de dobles. De esta manera, se hizo un estudio de tipo experimental y de nivel explicativo.

El presente trabajo se divide en cuatro capítulos: *el primer capítulo* trata del planteamiento y formulación del problema junto con la proposición de los objetivos de la investigación; en *el segundo capítulo* se describieron los antecedentes, las bases teóricas, y también, se enunció las hipótesis junto con la identificación de variables; en *el tercer capítulo* se explicó con detalle la metodología de la investigación; y por último, en *el capítulo cuarto* se analizó e interpreto los resultados de la investigación, para finalmente, formular las conclusiones.

# CAPITULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El sector de transporte urbano y turístico presenta un notable crecimiento durante los últimos años, ocasionado principalmente por el crecimiento demográfico. En ese sentido, también crece la demanda de buses que consideren una mayor capacidad de pasajeros, sin dejar de lado la comodidad y seguridad de los mismos. Por tanto, es un reto para las empresas carroceras ensamblar este tipo de buses que se ajusten más a las necesidades actuales.

El proceso de ensamble de carrocerías consiste en tres etapas: alargue de chasis, fabricación de la estructura de la carrocería y montaje. El alargue de chasis consiste en prolongar el chasis con una estructura de acero A36 por el proceso SMAW, con la finalidad de elevar la capacidad del bus. Por lo cual, el alargue del chasis constituye un punto importante en la fabricación de carrocerías para buses, debido a que sobre el chasis recaen todas las solicitudes del vehículo, así como las cargas vivas y muertas.

El problema surge que en el alargue de chasis está involucrado la unión por soldadura del acero ASTM A607 grado 50 con el acero ASTM A36, es decir el acero del chasis con el acero de la estructura de alargue. Estos dos tipos de acero tienen diferencias en cuanto a su composición química y en cuanto a sus propiedades mecánicas. Por un lado se tiene al acero ASTM A607 grado 50, que es un acero de alta resistencia y de baja aleación, y por el otro lado se tiene al acero ASTM A36, siendo este un acero estructural de bajo carbono. En cuanto a las propiedades mecánicas el acero ASMT A607 grado 50 presenta un mayor límite elástico frente al acero ASMT A36, de 355Mpa a 250 Mpa. Es cierto que, las empresas carroceras siguen directivas de montaje recomendados por el fabricante del chasis, sin embargo, no se tiene un protocolo de soldadura del chasis con la estructura de alargue, y especialmente se desconoce el nivel de soldabilidad entre dichos aceros, empleando el proceso SMAW.

En ese sentido, es necesario evaluar las condiciones de soldabilidad que permita obtener una unión por soldadura de calidad, del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36. Es decir, es preciso estudiar el tipo de material de aporte de soldadura, y las variables operacionales del proceso SMAW, con el fin de reducir los efectos negativos de los cambios microestructurales, como es el caso del endurecimiento de la ZAC, ocasionado por el proceso de soldadura.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. PROBLEMA GENERAL**

¿Cómo es la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW en el alargue del chasis para el ensamble de carrocerías de buses?

### **1.2.2. PROBLEMAS ESPECIFICOS**

#### **1.2.2.1. PROBLEMA ESPECÍFICO 1**

¿De qué manera el tipo de electrodo incide en la soldabilidad del acero A607 GRADO 50 con el acero A36?

#### **1.2.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICO 2**

¿De qué manera la intensidad de corriente incide en la soldabilidad del acero A607 GRADO 50 con el acero A36?

#### **1.2.2.3. PROBLEMA ESPECÍFICO 3**

¿De qué manera el ángulo de avance del electrodo incide en la soldabilidad del acero A607 GRADO 50 con el acero A36?

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

### **1.3.1. JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA**

El presente trabajo aporta con una importante investigación tecnológica en el sector de ensamble de carrocerías para buses. Teniendo en cuenta que, existen pocos estudios a nivel nacional que aborden el estudio de la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 en el alargue de chasis para el ensamble carrocerías de buses, empleando el proceso de soldadura de arco eléctrico con electrodo protegido (SMAW).

### **1.3.2. JUSTIFICACIÓN SOCIAL**

El proceso de alargue de chasis aplicado al ensamble de carrocerías para buses tiene como finalidad elevar la capacidad del bus urbano, de esta manera, se genera un ambiente de comodidad y calidad de vida para los pasajeros, con un alto estándar de seguridad. Todo esto, con la finalidad de atender la demanda de buses a nivel nacional y generar más puestos de trabajo en las empresas carroceras.

### **1.3.3. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA**

El estudio de la soldabilidad del acero A607 grado 50 con el acero A36 por el proceso SMAW en el alargue de chasis permite obtener uniones por soldadura de alta calidad. De esta manera, permitirá prevenir fallas en la unión soldada y evitará pérdidas por

mantenimiento y reparación del chasis. Por otro lado, también permite mejorar el ahorro de energía eléctrica al emplear el adecuado valor de intensidad de corriente, esto para mantener menores anchos de la Zona afectada por el calor (ZAC).

#### **1.3.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL**

Durante el proceso de soldadura del acero ASTM A607 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW se emite humos metálicos y gases en pequeñas cantidades, que no generan contaminación significativa, según las normativas ambientales. Sin embargo, el operador tendrá que protegerse con el uso del equipo de protección personal.

#### **1.4. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

No fue posible verificar la composición química de los aceros ASTM A36 y ASTM A607 grado 50, en especial el porcentaje de carbono, porque no se dispone de un microscopio electrónico. Sin embargo, mediante la medida de la dureza Rockwell C de ambos materiales, pudimos tener una idea de la naturaleza de los mismos. Por otra parte, no se realizó el ensayo de resistencia a la tracción, debido a que no se cuenta con el equipo.

#### **1.5. OBJETIVOS**

##### **1.5.1. OBJETIVO GENERAL**

Establecer la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW en el alargue del chasis para el ensamble de carrocerías de buses.

##### **1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

###### **1.5.2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 1**

Encontrar de qué manera el tipo de electrodo incide en la soldabilidad del acero ASTM 607 GRADO 50 con el acero ASTM A36.

###### **1.5.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 2**

Determinar de qué manera la intensidad de corriente incide en la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36.

###### **1.5.2.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 3**

Identificar de qué manera el ángulo de avance del electrodo incide en la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Se encontraron los siguientes trabajos que se relacionan a la soldadura en el chasis:

- Cisneros (2015) en su tesis: “*Calidad de uniones soldadas en la estructura de autobuses*”, presentado a la escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Autónoma de México, el cual buscó identificar las causas de los defectos que surgen en los procesos de soldadura de la empresa Volvo, concluyendo que la no aplicación de parámetros óptimos del proceso de soldadura MIG era la principal causa de defectos.
- Asai y Olvera (2014) en su tesis: “*Análisis mecánico de un prototipo de autobús tipo entrada baja para transporte público*”, presentado a la escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional de México, en el cual buscó desarrollar un prototipo de bus de entrada baja que sea eficiente y que cumpla con los parámetros de seguridad y confort, para lo cual tubo modificar las dimensiones iniciales del chasis (9m), obteniendo, por medio de simulación del método de elementos finitos que los componentes estructurales correspondientes al alargamiento de la estructura del chasis y carrocería, tendrán un desempeño mecánico aceptable.
- Albuja y Ramos (2016) en su tesis: “*Diseño y estudio de la factibilidad de construcción de un bastidor para chasis de bus con fines de producción nacional*”, presentado a la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, cuyo objetivo fue determinar los materiales para la factibilidad de construcción de un bastidor para chasis con fines de producción nacional, llegando a la conclusión de que dichos materiales deben ser aceros con un mínimo de 200 MPa de límite de fluencia.

##### 2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

- Ayma (2015) en su tesis: “*Gestión de la calidad aplicada a los procesos de soldadura para flota de camiones Caterpillar en minera Yanacocha – proyecto de soldadura*”, presentado a la facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, en la cual, pretendió aplicar un control de calidad de las uniones soldadas de camiones en la minera de gran envergadura, concluyendo de esta forma que, un Sistema de Gestión de Calidad Integrado es necesario e importante para el aseguramiento de la calidad de los procesos SMAW, FCAW y barrenado aplicado a la reparación de camiones en el proyecto minero Yanacocha.

## 2.2. BASES TEÓRICAS

### 2.2.1. SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

La soldadura es un procedimiento de unión permanente que produce la coalescencia de materiales calentándolos a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión, y con o sin el uso de material de aportación (Jeffus, 2009). En ese sentido, la soldadura por arco eléctrico se define como aquel proceso de soldadura por fusión en el cual la unión metalúrgica de los metales se obtiene mediante el calor de un arco eléctrico, generado entre un electrodo y la pieza a soldar.

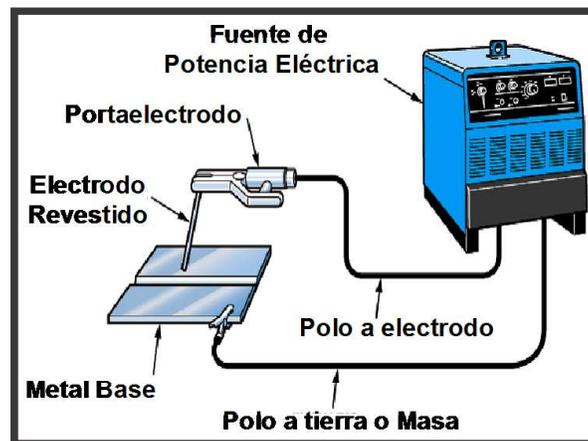
Los principales procesos de soldadura por arco eléctrico son los siguientes:

- Soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico revestido (SMAW),
- Soldadura por arco con núcleo de flujo (FCAW),
- Soldadura por arco sumergido (SAW),
- Soldadura por arco metálico con gas (GMAW)
- y Soldadura por arco de tungsteno con gas – TIG (GTAW)

#### 2.2.1.1. SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

Es un proceso de soldadura que utiliza un fundente cubierto de electrodo de metal para transportar corriente eléctrica. Para lograr la unión, se concentra el calor de un arco eléctrico establecido entre las piezas a soldar y la punta del electrodo o material de aporte, produciendo una zona de fusión que al solidificarse forma la unión permanente (OERLIKON, 2001). En la figura N° 2.1 se observa su circuito de funcionamiento.

**Figura N° 2. 1. Partes del circuito de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW)**



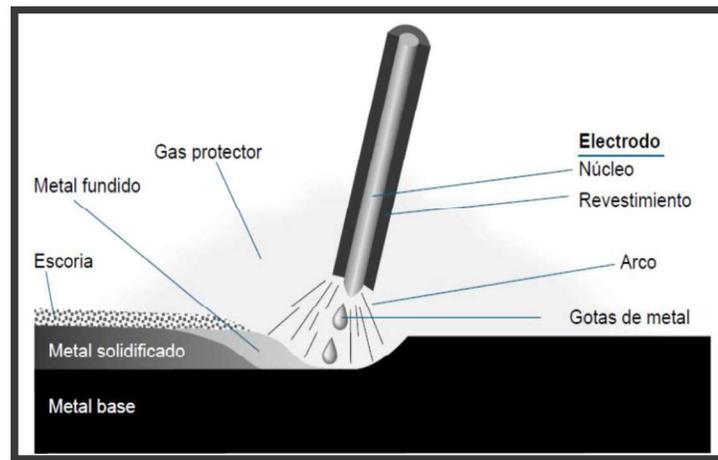
Fuente: <http://procesosdemanufacturaymateriales.blogspot.pe/2014/08/soldadura-por-arco-electrico-proceso-de.html>

(s.f.)

### Descripción del proceso

La corriente forma un arco a través de la abertura entre el extremo del electrodo y la pieza. El arco crea calor suficiente como para derretir ambos. El metal de aporte fundido es transferido al baño fundido del metal base por fuerzas electromagnéticas, en forma de pequeñas gotas metálicas, donde se mezclan. “El extremo del electrodo y el baño fundido de metal están rodeados, purificados y protegidos a medida que el fundente protector del electrodo se quema o se evapora” (Jeffus, 2009, pág. 49). Ver la Figura N° 2.2.

**Figura N° 2. 2. Fusión del electrodo**



Fuente: [http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro\\_ma/17.pdf](http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/17.pdf) (s.f.)

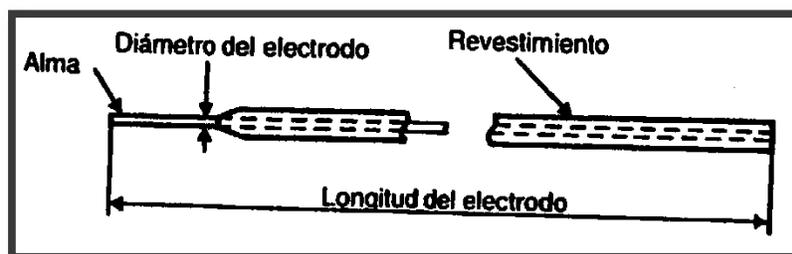
La soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW) es utilizado con más frecuencia debido a:

- **Su bajo coste.** La máquina y los electrodos son más baratos. La máquina puede ser un simple transformador reductor de 110 voltios.
- **Flexibilidad.** En lo que se refiere al espesor del metal base y a la variedad de posiciones en que se puede aplicar.
- **Portabilidad.** Es un proceso muy manejable debido a que el equipo es fácil de mover.
- **Versatilidad.** Se utiliza para casi cualquier metal o aleación.

#### 2.2.1.2. ELECTRODO O MATERIAL DE APORTE DE LA SOLDADURA

El electrodo o material de aporte es el elemento fundamental en el proceso SMAW. Debido a que éste establece el arco eléctrico y protege el baño de fusión. Asimismo, al agotarse, produce la aportación del material que, unido al material fundido del metal base, va a formar la soldadura. El electrodo está compuesto de un núcleo metálico o alma y un revestimiento químico, como se puede ver en la Figura N° 2.3.

Figura N° 2. 3. Partes de un electrodo



Fuente: <http://solysol.com.es/data/documents/soldadura=20electrodo=20rec.doc.pdf> (s.f.)

- ✓ **Núcleo metálico o alma.** Es una varilla metálica de sección circular uniforme que sirve como material de aportación. Tiene una composición química definida para cada metal a la que esté asignado el electrodo. Los diferentes elementos componentes del núcleo, como el hierro, carbono, manganeso, silicio, fósforo, azufre y otros, proporcionan diferentes propiedades a las uniones soldadas. Asimismo, “El núcleo metálico constituye la base del material de aporte, que es transferido a la pieza en forma de gotas, impulsado por la fuerza del arco eléctrico” (OERLIKON, 2001, pág. 27).
- ✓ **Revestimiento.** Es una capa de espesor uniforme que envuelve el núcleo del electrodo. Posee una composición química definida que caracteriza a la tipo de electrodo.

#### 2.2.1.2.1. Funciones del revestimiento del electrodo

El revestimiento cumple funciones indispensables en la ejecución y calidad de la soldadura. Estas funciones se pueden clasificar en funciones eléctricas, metalúrgicas y mecánicas.

- **Funciones eléctricas.** La función eléctrica se refiere a que permite el empleo de corriente alterna. El revestimiento contiene ciertos elementos, que al quemarse en el arco, producen gases especiales ionizados que mantienen la continuidad del arco. Por otra parte, el esta función se refiere que facilita el encendido del arco y mantenerlo con facilidad durante la ejecución de la soldadura.
- **Funciones metalúrgicas** Presenta una serie de funciones metalúrgicas de las cuales destacan las siguientes:
  - **Proteger el metal fundido de los gases dañinos del aire.** Ciertos elementos del revestimiento, al quemarse forman una capa de gases que rodea al arco. Esta capa de gases protege las finísimas gotas de metal de aporte y el baño fundido contra el contacto del aire. El oxígeno y nitrógeno del aire cuando se combinan con el metal fundido forman óxidos y nitruros, los cuales son perjudiciales.
  - **Formar la escoria protectora del metal caliente.** La escoria se forma cuando algunas materias del revestimiento se funden y se mezclan con el metal de la soldadura. Éstas

van recogiendo las impurezas del metal y las hacen flotar en la superficie del metal fundido. Asu vez, las escorias protegen al cordón caliente, retardando su enfriamiento, para que no se temple por el contacto con el aire frio.

- **Compensar la pérdida de los elementos** que, por la acción de la alta temperatura del arco eléctrico, tienden a desaparecer durante el proceso de fusión.
- **Aportar elementos de aleación.** Con el fin de obtener determinadas propiedades y características en el metal depositado.
- **Funciones mecánicas.** El electrodo dirige la fuerza del arco y las gotas del metal fundido en la dirección deseada. El revestimiento forma una concavidad, al fundirse inmediatamente después que el núcleo metálico.

#### 2.2.1.2.2. Composición química del revestimiento del electrodo

En el revestimiento de un determinado tipo de electrodo pueden intervenir 10 o más componentes químicos, como se observa en la Tabla N° 2.1. Cada componente tiene un efecto prefijado en el momento de soldar y en los resultados finales (OERLIKON, 2001).

**Tabla N° 2. 1. Funciones de algunos compuestos del revestimiento**

<b>Compuesto</b>	<b>Función principal</b>	<b>Función secundaria</b>
<b>Minerales</b>		
Óxido de hierro	Agente oxidante.	Estabilizar el arco
Rutilo (TiO <sub>2</sub> )	Forma escoria.	Estabiliza el arco
Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	Forma escoria	-
<b>Fundentes</b>		
Fluorita	Fluidifica la escoria.	-
Caolín	Forma escoria.	Estabiliza el arco.
Feldespatos	Forma escoria.	-
Talco	Forma escoria.	-
Amianto	Forma escoria. Da Resistencia	-
Silicato de potasio	Estabiliza el arco. Aglomera.	-
Silicato de sodio	Forma escoria. Aglomera.	Estabiliza el arco.
Calcita (CO <sub>3</sub> Ca)	Da protección gaseosa.	Da basicidad a la escoria.
	Estabiliza el arco.	Agente oxidante.
Magnesita (CO <sub>3</sub> Mg)	Da protección gaseosa.	Da basicidad a la escoria.
Dolomita (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Mg	Da protección gaseosa.	Da basicidad a la escoria.
<b>Compuestos orgánicos</b>		
Celulosa	Da protección gaseosa.	Reductor. Da resistencia
<b>Metales</b>		
Ferromanganeso	Forma escoria. Reductor.	Repone Mn al baño.
Polvo de hierro	Aumenta el rendimiento.	-
Ferroaleaciones y no ferrosos	Aportan elementos de aleación	

Fuente: OERLIKON, 2001: 28

### **2.2.1.2.3. Clasificación de los electrodos de acuerdo al tipo de revestimiento**

Para cada calidad de acero o metal base existe una extensa variedad de electrodos, entre los cuales se puede elegir. “Estos electrodos son similares en cuanto se refiere a la composición del metal depositado, pero diferentes en cuanto al tipo de revestimiento, características de soldadura, velocidad y cantidad del metal de aportación, calidad, etc.” (Piredda, 1984, pág. 73). Por lo tanto, atendiendo al tipo de recubrimiento se puede clasificar a los electrodos en ácidos, básicos, celulósicos, y rútilicos.

#### **✓ Electrodos ácidos (A)**

Su revestimiento está compuesto de óxidos de hierro y manganeso. Los electrodos ácidos presentan las siguientes características: buena velocidad de soldadura, la escoria es porosa y de fácil remoción y producen cordones lisos y brillosos. Los electrodos ácidos sin contenido de polvo de hierro, presentan un encendido de arco más fácil que los electrodos básicos. Sin embargo, han sido sustituidos por los electrodos rútilicos en aplicaciones de cordones en posición plana, y por los electrodos básicos para aplicaciones en todas las posiciones (Piredda, 1984).

#### **✓ Electrodos básicos (B)**

Los electrodos básicos tienen un revestimiento compuesto principalmente de carbonato cálcico, carburo cálcico, fluoruro cálcico y otros carbonatos cálcicos. No contienen celulosa, por lo que no aportan hidrogeno a la soldadura. Por tal motivo, sus cordones se caracterizan por poseer una buena resistencia y tenacidad.

La escoria que forman es densa y más difícil de remover que con los electrodos rútilicos y ácidos. Pero una vez solidificada, se separa fácilmente y asciende a la superficie. En ese sentido, “Este tipo de escoria ofrece una mayor protección térmica al magma metálico que hay debajo, por lo que se enfría mucho más lentamente y así impide que aparezcan fisuras o grietas debidas a una velocidad de enfriamiento excesiva” (Segovia, 2012, pág. 129).

#### **✓ Electrodos celulósicos (C)**

El revestimiento de los electrodos celulósicos está compuesto principalmente de sustancias orgánicas que generan gran cantidad por el calor, tal es el caso de la celulosa. Debido a su alto contenido de celulosa produce una alta potencia del arco, lo que se traduce en una alta penetración. La escoria formada por este tipo de electrodos es escasa y se separa con facilidad. Los gases forman una gran envoltura gaseosa en torno al arco e imprimen a las gotas gran velocidad de deposición. Sin embargo, produce muchas proyecciones y a la superficie de la soldadura es irregular.

### ✓ **Electrodos rútilicos (R)**

La composición del revestimiento contiene rutilo, óxido de titanio, y otras materias como el polvo de hierro, el sodio o el potasio. Estos electrodos se ceban fácilmente, se funden con suavidad y de un modo uniforme. Además, el arco no se interrumpe y tampoco se produce chisporroteo, lo que facilita su manejo. El cordón resultante es uniforme, y de aspecto pulcro.

En la Tabla N° 2.2 se resume todos los puntos más importantes de la clasificación de los electrodos de acuerdo al tipo de revestimiento.

**Tabla N° 2. 2. Clasificación de los electrodos de acuerdo al tipo de revestimiento**

<b>Electrodos</b>	<b>Composición del revestimiento</b>	<b>Características de la escoria</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Posición</b>	<b>Tipo de corriente</b>
<b>Ácidos (A)</b>	Óxidos de hierro y de manganeso	Bastante fluida y de aspecto porosa.	Alta velocidad de fusión y de penetración	Plana	D.C. y C.A.
<b>Básicos (B)</b>	Carbonato cálcico y otros carbonatos básicos	Densa, y fácil de remover cuando se enfría	Excelentes propiedades. Alta tenacidad	Todas las posiciones	D.C. y polaridad inversa
<b>Celulósicos (C)</b>	Celulosa y materias orgánicas	Escasa y se separa con gran facilidad	Alta penetración	Todas	D.C y C.A.
<b>Rútilicos (R)</b>	Rutilo (TiO <sub>2</sub> )	Muy densa y viscosa	Excelente acabado	Todas	D.C y C.A.

*Fuente: elaboración propia*

#### **2.2.1.2.4. Clasificación de los electrodos según la Sociedad Americana de la Soldadura (AWS)**

La AWS es una organización sin ánimos de lucro, entre cuyos fines está el fomento del avance científico, tecnológico y práctico de la soldadura. Esta asociación fue fundada en Estados Unidos en el año de 1919, después de la primera guerra mundial.

El sistema de clasificación AWS utiliza una serie de letras y números en un código que brindan la información necesaria sobre el metal de aportación. La numeración de los electrodos tiene que ver directamente con sus características de aplicación, tipo de corriente con que se deben emplear, así como el tipo de depósito. En ese sentido, las normas AWS ofrecen la clasificación de los electrodos para diversas aplicaciones, ver la figura N° 2.3.

Tabla N° 2. 3. Normas AWS para electrodos revestidos

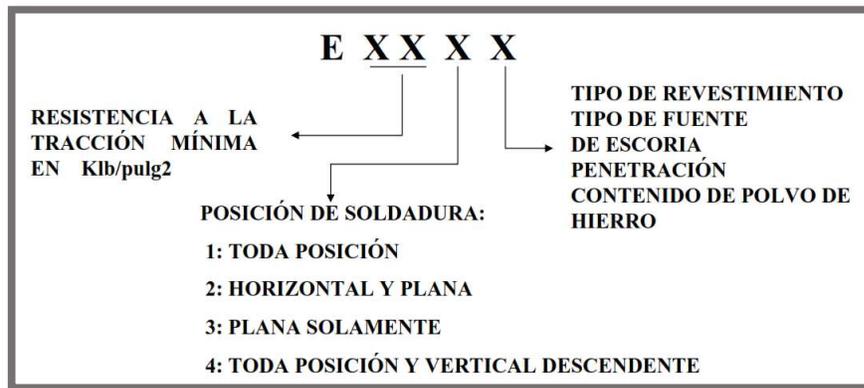
NORMAS AWS PARA ELECTRODOS REVESTIDOS	OFW	SMAW	GTAW GMAW PAW	FCAW	SAW	ESW	EGW	Brazing
	•AWS A5.1: ACEROS AL CARBONO •AWS A5.5: ACEROS DE BAJA ALEACION •AWS A5.4: ACEROS RESISTENTES A LA CORROSION •AWS A5.15: FUNDICIONES DE HIERRO •AWS A5.3: ALUMINIO Y SUS ALEACIONES •AWS A5.6: COBRE Y SUS ALEACIONES •AWS A5.11: NIQUEL Y SUS ALEACIONES •AWS A5.13 y A5.21: RECUBRIMIENTOS							
Aceros al C	A5.2	A5.1	A5.18	A5.20	A5.17	A5.25	A5.26	A5.8, A5.31
Aceros de baja aleación	A5.2	A5.5	A5.28	A5.29	A5.23	A5.25	A5.26	A5.8, A5.31
Aceros inoxidables		A5.4	A5.9, A5.22	A5.22	A5.9	A5.9	A5.9	A5.8, A5.31
Fundición de hierro	A5.15	A5.15	A5.15	A5.15				A5.8, A5.31
Aleaciones de níquel		A5.11	A5.14		A5.14			A5.8, A5.31
Aleaciones de aluminio		A5.3	A5.10					A5.8, A5.31
Aleaciones de cobre		A5.6	A5.7					A5.8, A5.31
Aleaciones de titanio			A5.16					A5.8, A5.31
Aleaciones de zirconio			A5.24					A5.8, A5.31
Aleaciones de magnesio			A5.19					A5.8, A5.31
Electrodos de tungsteno			A5.12					
Aleaciones y fundentes para brazing								A5.8, A5.31
Aleaciones para recarque	A5.13, A5.21	A5.13, A5.21	A5.13, A5.21					
Gases de protección			A5.32	A5.32			A5.32	

Fuente: <https://sites.google.com/site/construyetuingenio2013/5-procesos-de-soldadura-y-corte/5-1-soldadura-por-arco-de-metal-protegido-smaw> (s.f.)

Se observa que, las normas AWS A5 clasifican y ordenan todo tipo de electrodos y fundentes empleados en soldadura. Sin embargo, en el caso del proceso SMAW, las especificaciones de AWS para los electrodos de acero al carbono están en la norma AWS A5.1 y para el electrodo de acero de baja aleación están en la norma AWS A5.5.

Por lo tanto, en la Figura N° 2.4 se ilustra la nomenclatura de la norma AWS A5.1

Figura N° 2. 4. Nomenclatura AWS A5.1 para los electrodos de acero al carbono



Fuente: [https://procesosunefa.wikispaces.com/file/view/Proceso\\_SMAW.pdf](https://procesosunefa.wikispaces.com/file/view/Proceso_SMAW.pdf) (s.f.)

La resistencia a la tracción está dada en libra por pulgada cuadrada (psi). La fuerza real se obtiene añadiendo tres ceros a la derecha del número proporcionado, es decir en kilolibras por pulgada cuadrada (Klb/pulg<sup>2</sup>). Por ejemplo, E60XX es 60 000 psi o 60 Klb/pulg<sup>2</sup>.

Adicionalmente, en la Tabla N° 2.4 se enumeran las correspondencias del último dígito de la codificación, con valores de composición, corriente y polaridad.

**Tabla N° 2. 4. Indicadores de las características conjuntas de los electrodos correspondientes al último dígito en la clasificación AWS A5.1**

Códigos AWS para tipo de revestimiento, corriente y polaridad				
N°	Composición del revestimiento	Corriente	Polaridad	Ejemplo
0	Celuloso – Sodio (0-10% Polvo de hierro)	CC	EP	E-XXX0
1	Celuloso – Potasio (0% de Polvo de hierro)	CA o CC	EP	E-XXX1
2	Titanio – Sodio (0 – 10% de Polvo de hierro)	CA o CC	EN	E-XXX2
3	Titanio – Potasio (0 – 10% de Polvo de hierro)	CA o CC	EP o EN	E-XXX3
4	Titanio – Polvo de hierro (25 – 40 % Polvo de hierro)	CA o CC	EP o EN	E-XXX4
5	Bajo Hidrogeno – Sodio (0% Polvo de hierro)	CC	EP	E-XXX5
6	Bajo Hidrogeno – Potasio (0% Polvo de hierro)	CA o CC	EP	E-XXX6
7	Óxido de hierro – Polvo de hierro 50%	CA o CC	EP o EN	E-XXX7
8	Bajo hidrogeno – Polvo de hierro 25 – 40%	CA o CC	EP	E-XXX8
Códigos AWS para tipo de revestimiento, corriente y polaridad				
CC: Corriente Continua		CA: Corriente Alterna		
EP: Electrodo Positivo		EN: Electrodo Negativo		
Nota: el porcentaje de polvo de hierro está calculado sobre el peso del alma del electrodo				

*Fuente: Segovia, 2012: 139*

Por tanto, se toma una aplicación de esta norma en el electrodo celulósico **E 6011**. Donde:

**E:** indica que se trata de un electrodo de varilla

**60:** indica que el electrodo tiene una resistencia mínima a la tracción de 60000 lb/pulg<sup>2</sup>

**1:** indica que el electrodo se aplica en todas las posiciones.

**1:** según la Tabla N° 2.3 indica que el revestimiento contiene celulosa y potasio; que el electrodo admite tanto la corriente alterna como continua, y que debe ser conectado al polo positivo.

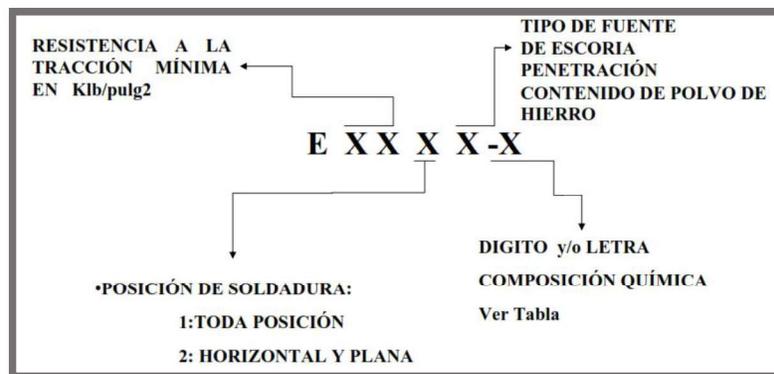
Los electrodos que contienen bajo hidrogeno están compuestos de minerales de caliza en alto porcentaje y de otros elementos secundarios como la fluorita. Los electrodos que contienen bajo hidrogeno presentan las siguientes propiedades: No produce inclusiones de hidrogeno ni agrietamientos debajo del cordón en los aceros de alto y mediano carbono; Son excelentes para soldaduras de calidad; Requieren menos precalentamiento que otros

electrodos; y Se obtienen excelentes pasadas múltiples en soldaduras verticales y en posición elevada

Por otra parte, se utiliza la especificación AWS A5.5 para la clasificación de electrodos de composición más compleja. Como es el caso de los aceros de baja aleación, como se puede ver en la Figura N° 2.5.

La especificación AWS A5.5 contiene un índice o par de dígitos adicionales para señalar la composición química del material que aporta el electrodo. En la Tabla N° 2.5 se explica el significado del último par de dígitos de esta nomenclatura.

**Figura N° 2. 5. Nomenclatura AWS A5.5 para los electrodos de acero de baja aleación**



Fuente: [https://procesosunefa.wikispaces.com/file/view/Proceso\\_SMAW.pdf](https://procesosunefa.wikispaces.com/file/view/Proceso_SMAW.pdf) (s.f.)

**Tabla N° 2. 5. Códigos de designación de la clasificación AWS A5.5**

Designación del último par de dígitos de la especificación AWS A5.5	
Grupo identificativo	Composición de la aleación de aporte
A1	0.5% Molibdeno
B1	0.5% Cromo y 0.5% Molibdeno
B2	1.25% Cromo y 0.5% Molibdeno
B3	2.25% Cromo y 1% Molibdeno
B4	2% Cromo y 0.5% Molibdeno
B5	0.5% Cromo y 1% Molibdeno
C1	2.5% Níquel
C2	3.25% Níquel
C3	1% Níquel; 0.35% Molibdeno y 0.15% Cromo
D1	0.25 – 0.45% Molibdeno y 1.25 – 1.33% Manganeso
D2	0.25 – 0.45% Molibdeno y 1.65 – 2.00% Manganeso
G	≤0.5% Ni; ≤0.3% Cr; ≤0.2% Mo; ≤0.1% V; ≤1% Mn

Fuente: Segovia, 2012: 141

### 2.2.1.3. VARIABLES OPERACIONALES DEL PROCESO SMAW

#### 2.2.1.3.1. Diámetro del electrodo

El tamaño del electrodo tiene una notable influencia en las demás variables del proceso de soldadura. La selección del tamaño del electrodo lo determina el espesor del metal a soldar.

El uso de electrodos de diámetro pequeño requiere menos destreza que los de diámetro grande. La velocidad de deposición, o la velocidad a la que se agregan el metal a la soldadura, es menor cuando se utilizan electrodos de diámetro pequeño. En cambio, los electrodos de diámetro grande pueden sobrecalentar el metal, cuando se utilizan con piezas de metal delgadas o pequeñas (Jeffus, 2009).

#### 2.2.1.3.2. Intensidad de corriente o amperaje

La regulación de la intensidad de corriente es decisiva en la obtención de buenas juntas de soldadura. Asimismo, “Cada electrodo de soldadura se debe operar en un rango (amperaje) en particular” (Jeffus, 2009, pág. 67)(p.67). En este sentido, a cada diámetro de los electrodos le corresponde una determinada escala de amperaje, desde un amperaje mínimo hasta un amperaje máximo. El rango de intensidad de corriente es señalado por el fabricante del electrodo, como se puede ver la Tabla N° 2.6.

**Tabla N° 2. 6. Rango de intensidad de corriente o amperaje de soldadura**

Diámetro (in)	Clasificación AWS del electrodo					
	E6010	E6011	E6012	E6013	E7016	E7018
3/32	40-80	50-70	40-90	40-85	75-105	70-110
1/8	70-130	85-125	75-130	70-120	100-105	90-165
5/32	110-165	130-160	120-200	140-190	140-190	125-220

*Fuente: Jeffus, 2009: 67*

Por otra parte, Piredda (1984) afirma que: “En soldadura el amperaje se elegirá con base al tipo de junta, espesor del material base, posición de la junta a soldar y diámetro del electrodo” (p.126). Entonces, se deduce que para la misma clase y diámetro de electrodo habrá algunas diferencias entre los rangos recomendados.

En consecuencia, se puede observar dos casos:

- ✓ **Amperaje insuficiente.** Ocasiona una deficiente fusión y estabilidad del arco. La soldadura puede tener inclusiones de escoria o gas, porque el baño de fusión no ha estado fluido el tiempo suficiente como para que el fundente reaccione. En consecuencia, esta asignación de corriente evidencia una poca o nula penetración de la soldadura.

- ✓ **Amperaje excesivo.** El cordón de soldadura es ancho y plano, con porosidades y con penetración profunda. La salpicadura es excesiva y en la mayoría de los casos difícil de eliminar. Las intensidades de corriente demasiado altas pueden causar que el electrodo se decolore, se agriete o que se quemé.

#### **2.2.1.3.3. Longitud de arco**

La longitud de arco es la distancia que el arco debe saltar desde el extremo del electrodo a la superficie del baño de fusión de la soldadura. Dicha longitud no es posible determinarla en milímetros, pero se estima de acuerdo a la forma del cordón y por el comportamiento del arco (OERLIKON, 2001).

A medida que la soldadura avanza, el electrodo se acorta conforme se va consumiendo. Por tanto, para mantener una longitud de arco constante, es necesario bajar el electrodo continuamente. Es importante mantener una longitud constante, porque un cambio demasiado grande en ella perjudica a la soldadura. En tal sentido, se puede describir los siguientes fenómenos:

- ✓ **Longitud de arco muy corta.** En ésta, el metal que se transfiere a través de la abertura podría producir un corto circuito desde el electrodo, lo que provocaría que se éste se pegue al metal base. La soldadura resultante es estrecha, irregular, de poca penetración y además es abultada.
- ✓ **Longitud de arco muy larga.** Ésta produce más salpicadura, debido a que a que el metal que se transfiere se depositará fuera del baño de fusión. La soldadura es más ancha y tiene poca concentración. Además, la penetración de la soldadura es insuficiente y en muchos casos el cordón resulta poroso.

Encontrar la longitud de arco correcta requiere entrenamiento y ajustes. Por tanto, (1984): “La separación (longitud) entre la pieza que se va a soldar y el electrodo debe ser aproximadamente igual al diámetro del electrodo” (Piredda, 1984, pág. 126). La mayoría de los trabajos de soldadura requieren una longitud de arco de 1/8 pulgadas a 3/8 pulgadas, pero esta distancia varía (Jeffus, 2009). Sin embargo, es posible que sea necesario cambiar la longitud de arco cuando se suelda, para ajustarla a las condiciones variables de soldadura.

#### **2.2.1.3.4. Ángulo de inclinación del electrodo**

El ángulo de inclinación se mide desde el electrodo a la superficie del metal base. “El ángulo relativo es importante debido a que existe un golpe de fuerza que lanza metal y fundente desde el extremo del electrodo a la placa” (Jeffus, 2009, pág. 70).

El ángulo de inclinación del electrodo es afectado por la dirección de desplazamiento. En tal sentido, existen dos tipos:

- **Ángulo de ataque.** En éste se empuja el metal fundido y la escoria por delante de la soldadura. Por ejemplo, “se puede utilizar un ángulo de ataque para minimizar la penetración o para ayudar a sostener el metal fundido en su lugar en las soldaduras verticales” (Jeffus, 2009, pág. 71).
- **Ángulo de arrastre.** En éste se jala el metal fundido hacia atrás, fuera del borde delantero de baño de fusión, donde se solidifica. En el ángulo de arrastre el arco funde más metal, produciendo una penetración más profunda.. Es por este motivo, que es recomendable utilizar el ángulo de arrastre, especialmente en posiciones planas.

Otra norma muy importante que se debe respetar en soldadura, particularmente en soldadura de ángulo y juntas con biseles, es mantener el ángulo correcto del electrodo. En soldadura de ángulo el electrodo se debe colocar con una inclinación de 45° con relación al vertical; en uniones a tope, con o sin bisel, el electrodo se debe mantener perpendicular a la línea de soldadura formando un ángulo de 90° (Piredda, 1984, pág. 127).

Sin lugar a duda, es importante trabajar con un ángulo de inclinación correcto. Debido a que ésta influye sobre la forma y el aspecto del cordón, y también sobre su penetración. Como consecuencia, se pueden evidenciar los siguientes casos:

- ✓ **Ángulo demasiado cerrado.** Produce una deposición excesiva de metal de aporte, mala conformación del cordón y penetración inadecuada.
- ✓ **Ángulo demasiado abierto.** Produce ondulaciones pronunciadas en el cordón con formación de crestas. El cordón resulta irregular y la escoria no cubre bien la soldadura.

#### **2.2.1.3.5. Velocidad de avance**

La velocidad de avance es la velocidad a la cual el electrodo se mueve a lo largo de la junta. Ésta debe ajustarse de manera que adelante ligeramente al baño de fusión. Una lenta o excesiva velocidad de avance produce defectos en la soldadura, como puede evidenciarse en los siguientes casos:

- ✓ **Velocidad de avance muy lenta.** Se produce abultamiento del metal de deposición y el cordón queda con ribetes rectos, y además es de un ancho indeseable. En muchos casos, también se presenta porosidad en el cordón.

- ✓ **Velocidad de avance excesiva.** En este caso el baño no tiene el tiempo necesario para formar una fusión homogénea con el metal base, lo que conlleva a una falta de fusión. También, se impide que los gases e impurezas se disuelvan quedándose aprisionados al enfriarse. Todos estos aspectos hacen que el cordón sea de menor anchura, fibrosa, con bordes puntiagudas y con muchas porosidades.

Normalmente conviene avanzar a la misma velocidad de manera que el cordón tenga el doble de ancho que el diámetro del electrodo. Ejemplo: un electrodo de 3 mm de diámetro deberá dejar un cordón de 6 mm de ancho. Naturalmente, dichas disposiciones pueden variar según las necesidades o posiciones de la soldadura. (Piredda, 1984, pág. 127).

Por tanto, se puede decir que la velocidad de avance está condicionada por el espesor de la pieza, la posición de la soldadura y el tipo de pasada que queremos realizar.

#### **2.2.1.4. PREPARACIÓN DE JUNTAS DE LA SOLDADURA**

Se entiende por junta de soldadura o junta de unión como la forma en que están dispuestos los bordes de las piezas a unir. La preparación de juntas tiene como finalidad asegurar la penetración deseada en la soldadura y facilitar la operación de soldar, con miras a obtener una unión de excelente calidad.

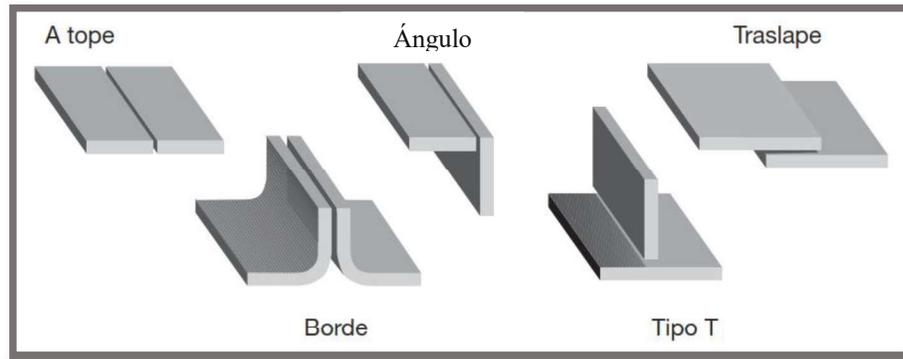
En el diseño de las juntas deben tenerse en cuenta algunos factores como son: facilitar la fusión de metales (bordes y núcleo) y con ello asegurar la eficacia de la técnica de soldadura empleada, el espesor de la unión, la posición de soldeo y el coste de la preparación de la junta y coste total de la soldadura. Además debe conjugarse lo anterior con el tipo de carga a que va estar sometida la pieza (Rodríguez, 2010, pág. 5).

Por tanto, se puede decir que para la preparación de juntas de debe tomar en cuenta los factores:

- ✓ Facilidad de fusión de los metales.
- ✓ Espesor de la unión.
- ✓ Posición de soldadura.
- ✓ La carga y sus características.
- ✓ La forma en que la carga es aplicada.
- ✓ Coste de la preparación de juntas y el coste total de la soldadura.

Los principales tipos de junta son: unión a tope, unión a traslape, unión en ángulo, unión en T y unión de borde, como se puede apreciar en la Figura N° 2.6. Es importante conocer cada una de ellas, debido a que la calidad final de la soldadura dependerá no solo de la técnica y habilidad para realizar la soldadura sino también del tipo de junta.

**Figura N° 2. 6. Tipos de junta**



Fuente:

<http://www.indura.com.pe/Descargar/Manual%20de%20Electrodos%20de%20Mantenimiento%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fpe%2Fbiblioteca%2F88b5e916117e44998a73030487259a53.pdf> (s.f.)

#### 2.2.1.4.1. Junta a tope

La unión a tope es la que se realiza entre dos piezas en un mismo plano, tal como se observa en la figura 2.6. Según la forma de los bordes, o del tipo de bisel, se distinguen soldadura de tope con bordes rectos, en V, en doble V, en U, etc.

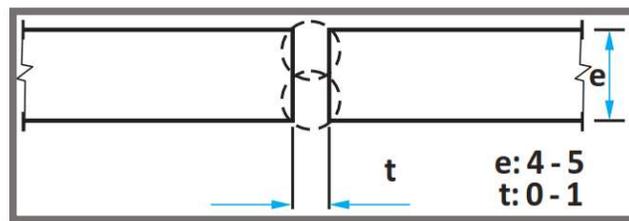
##### a) Unión a tope con bordes rectos.

Este tipo de unión presenta las siguientes características:

- ✓ Es la unión con menor coste de preparación de juntas.
- ✓ Es recomendable para espesores menores a 6 mm.
- ✓ Requiere de fusión completa y total
- ✓ Son resistentes a cargas de tipo estático.

En la Figura N° 2.7 se puede ver la junta tope con bordes rectos, en donde “e” significa espesor y “t” distancia de separación, ambos están en milímetros.

**Figura N° 2. 7. Junta a tope con bordes rectos**



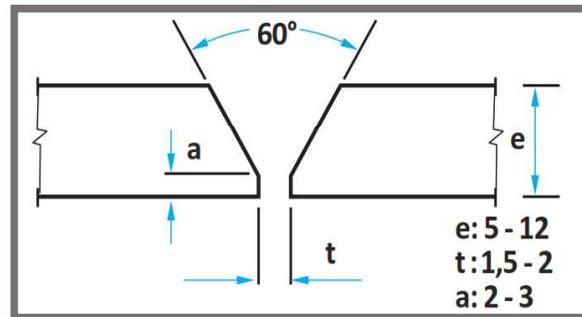
Fuente: [http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual\\_de\\_bolsillo.pdf](http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.pdf) (s.f.)

**b) Unión a tope con bordes en V.**

Presenta las siguientes características:

- ✓ Apropriada para todas las condiciones de carga.
- ✓ Aplicable en planchas de 5 a 12 mm, no siendo muy corriente aplicarla en espesores menores.
- ✓ El ángulo de la junta es de  $60^\circ$ . Como se muestra en la figura N° 2.8.

**Figura N° 2. 8. Junta a tope con bordes en V**



Fuente: [http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual\\_de\\_bolsillo.pdf](http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.pdf) (s.f.)

Sin embargo, la preparación de la junta es más costosa que para la junta a tope simple.

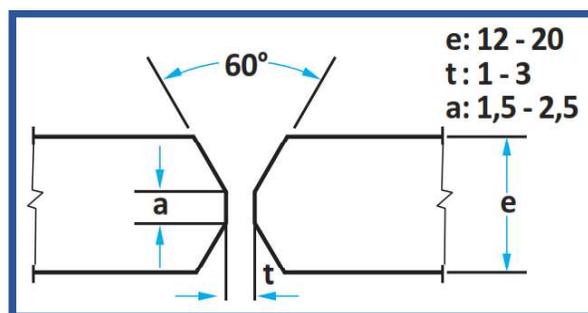
**c) Unión a tope con bordes en doble V**

A diferencia de las anteriores tipos de unión, tiene las siguientes características:

- ✓ Para piezas de un espesor mayor de 12 hasta 20 mm, siempre y cuando sea posible soldar por ambos lados.
- ✓ La junta en X consume más o menos la mitad de electrodos que la junta a tope en V, pero en cambio es más costosa su preparación.

La junta a tope con bordes en doble V se puede apreciar en la Figura N° 2.9 donde “e” es espesor, “t” es la separación de los bordes y “a” es el talón.

**Figura N° 2. 9. Junta a tope con bordes en doble V**



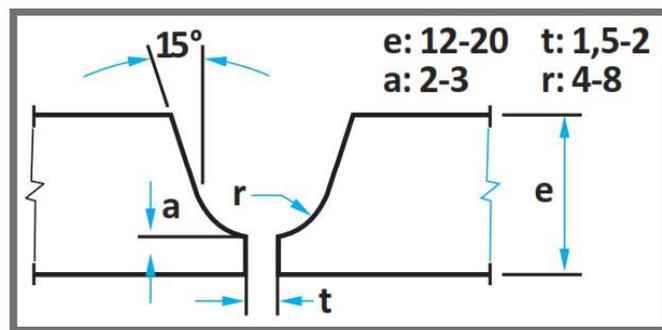
Fuente: [http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual\\_de\\_bolsillo.pdf](http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.pdf) (s.f.)

#### d) Uniones a tope con bordes en U

Este tipo de unión presenta las siguientes características:

- ✓ Es aplicada para trabajos de la más alta calidad.
- ✓ Apropriada para todas las condiciones de carga.
- ✓ Sustituye a las juntas en V o X en la unión de piezas de un espesor entre 12 a 20 mm.  
Como se puede ver en la Figura N° 2.10.
- ✓ Esta junta consume menos electrodos que la junta en V o X, pero su costo de preparación es mucho más elevado.
- ✓ La soldadura se realiza por un solo lado, con excepción de un único cordón que se aplica al final por el lado opuesto.

**Figura N° 2. 10. Junta a tope con bordes en U**



Fuente: [http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual\\_de\\_bolsillo.pdf](http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.pdf) (s.f.)

#### 2.2.1.4.2. Junta a traslape

La junta de traslape se hace superponiendo los bordes de las piezas. Este tipo de uniones se pueden realizar mediante uno o dos cordones.

En ese sentido, “Como se hace una soldadura de filete en la junta de solape, la concentración debería ser igual al espesor de la placa” (Jeffus, 2009, pág. 89). Para este tipo de juntas se necesita fusión completa de la raíz de soldadura de filete para obtener una buena soldadura.

#### 2.2.1.4.3. Junta de borde o unión de canto

Las uniones de borde están conformadas por los bordes de aquellas piezas que han sido dispuestas de forma paralela una contra otra.

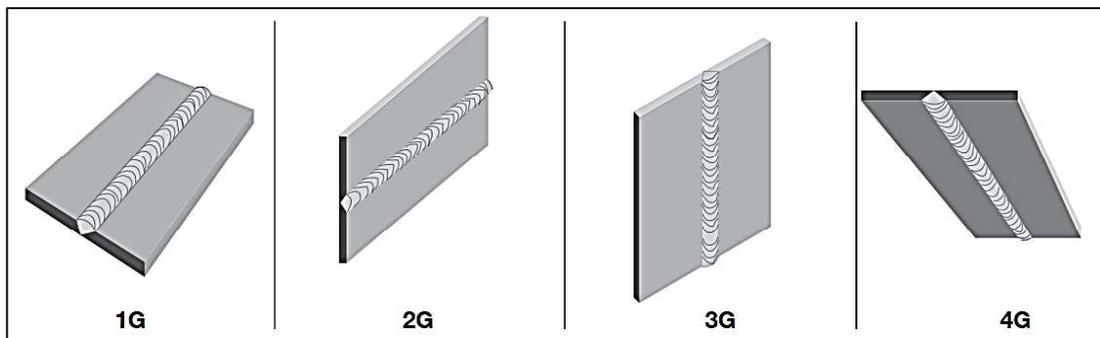
El tamaño de la soldadura debería ser igual al espesor de la placa que se está uniendo. “Una buena indicación de que la soldadura se está haciendo lo suficientemente grande es que la anchura del cordón de soldadura sea igual a la anchura de la junta” (Jeffus, 2009, p.82). El cordón de soldadura debe tener una baja concentración.

### 2.2.1.5. POSICIONES DE SOLDADURA

Dependiendo de la posición espacial en que debe colocar el electrodo, se puede aplicar una u otra técnica de soldeo para realizar correctamente la soldadura. Las posiciones de ranura en planchas, ver la Figura N° 2.7 que se pueden dar son las siguientes:

- ✓ Posición plana = 1G
- ✓ Posición horizontal = 2G
- ✓ Posición vertical = 3G
- ✓ Posición sobre cabeza, bajo techo o invertida = 4G

**Tabla N° 2. 7. Posiciones de soldadura de ranura en planchas**



Fuente:

<http://www.indura.com.pe/Descargar/Manual%20de%20Electrodos%20de%20Mantenimiento%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fpe%2Fbiblioteca%2F88b5e916117e44998a73030487259a53.pdf> (s.f.)

#### 2.2.1.5.1. Soldadura eléctrica en posición vertical

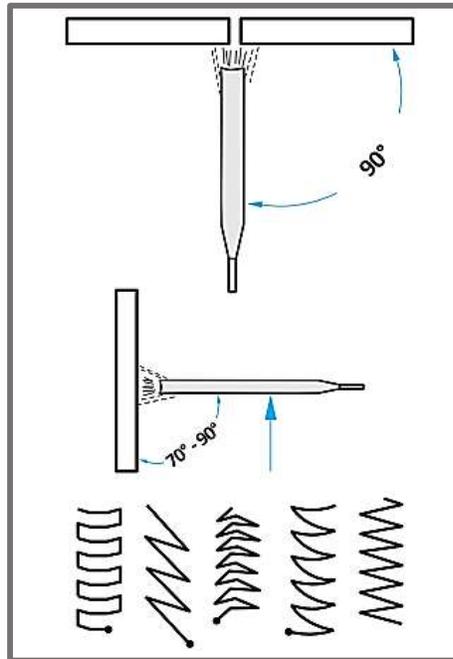
Factores que deben considerarse en la posición vertical:

- ✓ Regulación del amperaje, ligeramente menor que en la posición plana.
- ✓ Ángulo del electrodo, de 70° a 90°.
- ✓ Velocidad de avance. El avance será lento y el movimiento oscilatorio debe ser más ligero.

#### Métodos de soldadura en posición vertical

- a. **Método ascendente.** El cordón de soldadura se forma ascendiendo, es decir se empieza de la parte inferior y se termina en la parte superior de la junta, como se observa en la Figura N° 2.11. “Por este método se logra una mejor penetración y mejor depósito de material por pasada” (OERLIKON, 2001, pág. 49).
- b. **Método descendente.** El cordón de soldadura se realiza desde arriba hacia abajo. Este método se emplea para soldar planchas delgadas, de menor espesor de 5 mm, por ende la penetración y el depósito es menor.

**Figura N° 2. 11. Juntas a tope con el método ascendente**



Fuente: [http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual\\_de\\_bolsillo.pdf](http://www.soldexa.com.pe/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.pdf) (s.f.)

#### **2.2.1.6. ENSAYOS DESTRUCTIVOS EN UNIONES SOLDADADAS**

Los ensayos destructivos consisten en verificar las propiedades mecánicas de las uniones soldadas, con el objetivo de asegurar la calidad del conjunto respecto a su diseño.

Se tienen los siguientes tipos de ensayos destructivos: ensayo de tracción, ensayo de doblado, ensayo de impacto y ensayo de dureza.

##### **2.2.1.6.1. Ensayo de tracción**

Este ensayo consiste en estirar una probeta hasta su rotura, en una maquina especial y los resultados obtenidos nos proporcionan la siguiente información importante:

- ✓ Resistencia a la tensión máxima.
- ✓ Esfuerzo de cedencia.
- ✓ Porcentaje de elongación.
- ✓ Porcentaje de reducción de área.

En cuanto al equipo de ensayo, este debe estar debidamente calibrado, de lo contrario los resultados obtenidos no tienen ninguna validez.

Para probar soldaduras, es necesario que la muestra incluya la zona afecta por el calor. Por tanto, “Si el metal de soldadura es más resistente que la placa, se producen fallas en la placa; si la soldadura es débil, se producen fallas en la soldadura” (Jeffus, 2009, pág. 516).

#### **2.2.1.6.2. Ensayo de doblado**

Se encuentran tres tipos de ensayos de doblez, dependiendo de su orientación, de la soldadura respecto al doblado: Doble de cara; Dobles de raíz y Dobles lateral.

Cabe señalar que el ensayo de dobles también es denominado ensayo de plegado. En ese sentido, “las muestras de plegado de cara se deberán colocar con la cara de la soldadura hacia la abertura. Las muestras de plegado de raíz se deberán colocar de modo que la raíz de la soldadura se dirija hacia la abertura...” (Jeffus, 2009, pág. 522).

El dispositivo de dobles guiado estándar es el más empleado en el ensayo de doblez, como se observa en la Figura N° 2.12.

**Figura N° 2. 12. Ensayo de dobles con dispositivo guiado estándar**



*Fuente: <https://es.scribd.com/document/308674686/1-Estudio-de-La-Soldabilidad-de-Acero-Astm-a-36-Con-Acero-Vcl-Mediante-El-Proceso-Smaw-y-Pos> (s.f.)*

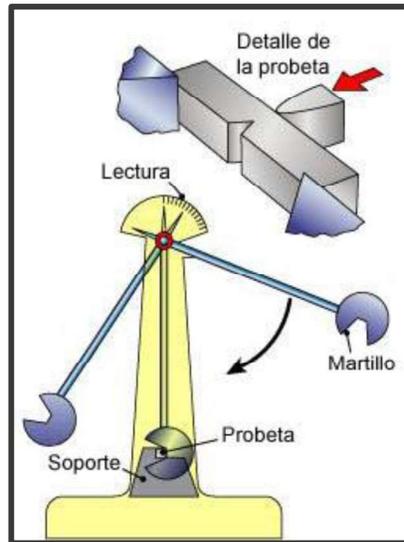
El dispositivo de doblez guiado estándar consiste en un punzón y una matriz en forma de “u” para realizar el ensayo de doblez. El espécimen se coloca sobre los hombros de la matriz con el lado que se va a ponerse en tensión hacia la parte interior de la matriz. El punzón se coloca sobre el área de interés y se aplica la fuerza para doblar hasta ocupar la forma de la matriz, posteriormente el espécimen es removido y evaluado.

#### **2.2.1.6.3. Ensayo de impacto**

Una propiedad importante de los metales es la tenacidad que se define como la habilidad de un metal para absorber energía. “Cuando se habla de la capacidad de un metal para absorber energía, se debe entender que el metal absorbe la energía por etapas: primero hay una cierta cantidad de energía requerida para iniciar la fractura. Después, es necesaria energía adicional para que la fractura se propague” (Jeffus, 2009, pág. 525).

Aunque existen numerosos tipos de pruebas de impacto, el más comúnmente utilizado es la prueba Charpy “V”, es espécimen estándar usado, es una barra cuadrada de 55mm de longitud por 10mmX10mm. Como se observa en la Figura N° 2.13.

**Figura N° 2. 13. Ensayo de impacto Charpy**



Fuente: [http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/15\\_ensayo\\_de\\_resiliencia.html](http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/15_ensayo_de_resiliencia.html)  
(s.f)

#### **2.2.1.6.4. Ensayo de dureza**

La dureza es la habilidad que presentan los metales para resistir a ser penetrados. Consecuentemente el ensayo de dureza utilizando un tipo de penetrador el cual es forzado a penetrar la superficie del objeto a ensayar.

Dependiendo del tipo de ensayo de dureza utilizado, se puede medir, ya sea el diámetro o profundidad de la indentación realizada (Jeffus, 2009). Existen tres grupos básicos de ensayos de dureza: Dureza Brinell, Dureza Rockwell y Micro dureza.

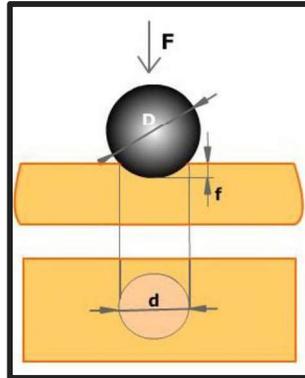
#### **A. Dureza Brinell.**

El ensayo de dureza Brinell se realiza forzando el penetrador sobre la superficie de objeto a ensayar a una carga establecida. Posteriormente se elimina la carga y se mide el diámetro de indentación producida, utilizando un dispositivo magnificador. “El número de dureza Brinell (BHN), corrientemente se obtiene a partir de tablas que expresan los valores y los correspondientes números Brinell” (Morrall, Jimeno, & Molera, 1985, pág. 847). Sin embargo, se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde P es la carga en Kilogramos; D es el diámetro de la bola en milímetros, y d es el diámetro de la impresión en milímetros, ver la Figura N° 2.14.

**Figura N° 2. 14. Penetrador Brinell**

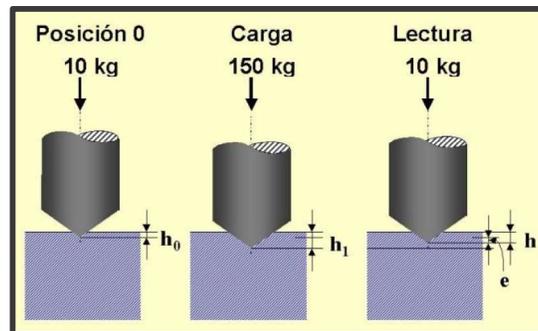


Fuente: [http://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema03/121\\_ensayo\\_brinell.html](http://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema03/121_ensayo_brinell.html) (s.f.)

### B. Dureza Rockwell

Este grupo encierra diferentes variaciones del mismo principio básico. Se puede modificar el ensayo básico utilizado, usando diferentes indentadores y con diferentes cargas. “La dureza Rockwell produce indentaciones más pequeñas que la dureza Brinell. Esto permite realizar el ensayo en áreas muy pequeñas del metal a ensayar” (Jeffus, 2009, pág. 533). Hay dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido, y un penetrador cónico de diamante con un ángulo de 120°, observar la figura N° 2.15.

**Figura N° 2. 15. Ensayo de dureza Rockwell**



Fuente: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/pfcm2\\_7\\_3.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/pfcm2_7_3.html) (s.f.)

La máquina de dureza Rockwell mide la diferencia e y se expresa de la siguiente manera:

$$HRB = 130 - e$$

$$HRC = 100 - e$$

Nomenclatura

Las durezas Rockwell y Rockwell Superficial vienen dadas por la siguiente fórmula:

$$nHRletra$$

Dónde:

- **n** es el valor de dureza obtenido.
- **HR** es el identificador del ensayo Rockwell.
- **letra** va a continuación de HR y es la letra correspondiente a la Escala usada.

Un ejemplo para un material en el que se obtiene en el ensayo una dureza de 60 y se ha usado la escala B sería: 60HRB. En la tabla N° 2.8 se observa las escalas de dureza Rockwell

**Tabla N° 2. 8. Escalas de dureza Rockwell**

Escala	Indentador	Carga Total	Color de escala	Aplicaciones
A	Cono diamante	60	Negro	Metales duros, superficies templadas, chapa fina (<0,4 mm)
D	Cono diamante	100	Negro	Piezas con superficies templada de dureza media, chapas
C	Cono diamante	150	Negro	Aceros templados
F	Bola de $\varnothing$ 1/16"	60	Rojo	Aleaciones cobre recocido. Chapa fina metálica (>0,6 mm)
B	Bola de $\varnothing$ 1/16"	100	Rojo	Aceros blandos, de construcción, metales no ferrosos
G	Bola de $\varnothing$ 1/16"	150	Rojo	Bronce, cobre-berilio, cobre-níquel, fundición maleable

Fuente: <http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/durezarockwell.pdf> (s.f.)

### C. Microdureza

El ensayo de micro dureza toma el nombre debido a que durante su aplicación la impresión que deja en la pieza a analizar es tan pequeñas que es necesario el uso de altas magnificaciones con un microscopio para poder realizar la medición de la impresión. Existen principalmente 3 tipos de ensayos de micro dureza:

- Micro dureza Vickers
- Micro dureza Knoop
- Micro dureza Shore

#### 2.2.1.7. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos (END) son pruebas utilizadas para detectar discontinuidades internas y/o superficiales en materiales, soldaduras y componentes, usando técnicas que no alteren el estado físico o composición química de los mismos. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada (Jeffus, 2009). Los principales ensayos no destructivos son: inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas. radiografía industrial y ultrasonido industrial.

##### 2.2.1.7.1. Inspección Visual

Una inspección visual eficiente es producto de una observación antes, durante el trabajo y al término de la junta soldada.

Una de las primeras tareas del inspector de soldadura en el comienzo de un nuevo trabajo es revisar toda la documentación referida a la soldadura que va a ser realizada. Estos documentos contienen información que es muy valiosa para el inspector de soldadura. En esencia describen que, cuando, dónde y cómo la inspección tendrá que ser realizada.

Durante el proceso de soldadura comprende la comprobación de los siguientes aspectos: preparación de las juntas, tipo de electrodo usado, diámetro del electrodo, amperaje de la corriente y velocidad de avance del electrodo (OERLIKON, 2001). También es importante la inspección visual de las pasadas de soldadura a medida que son depositadas.

La inspección visual luego de la soldadura consiste de la observación de la apariencia de la soldadura terminada. Este examen visual va a detectar discontinuidades superficiales en el metal base y en el metal de soldadura. Irregularidades superficiales agudas pueden provocar fallas prematuras del componente en servicio, estos aspectos visuales son evaluados de acuerdo con el código aplicable, que va a describir el valor permisible de un cierto tipo de discontinuidad. Para una soldadura con bisel, se está pendiente si el bisel de la soldadura está lleno a ras con la superficies del metal base sin un sobre espesor excesivo.

#### **2.2.1.7.2. Líquidos Penetrantes**

La prueba por líquidos penetrantes es un método efectivo para detectar discontinuidades las cuales están abiertas a la superficie, en materiales sólidos y no porosos.

El procedimiento consiste en aplicar un líquido coloreado a la superficie en estudio, el cual penetra en cualquier discontinuidad que pudiera existir debido al fenómeno de capilaridad. Después de un determinado tiempo se elimina el exceso de líquido y se aplica un revelador, el cual absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa del revelador se delinea el contorno de éstas.

#### **2.2.1.7.3. Partículas Magnéticas**

La prueba de partículas magnéticas puede aplicarse para grietas y otras discontinuidades próximas a los materiales ferromagnéticos. La sensibilidad es mayor para discontinuidades superficiales y disminuye rápidamente al incrementarse la profundidad de las discontinuidades sub superficiales (Jeffus, 2009). Este método implica la magnetización de un área y la aplicación de partículas de hierro (como medio de ensayo) sobre dicha superficie. Luego, las partículas son atraídas por la distorsión del campo magnético que causen las grietas o discontinuidades. Los equipos de magnetización empleados para este método son: yugo magnético, bobina o solenoide, y puntas y cabezales.

#### **2.2.1.7.4. Radiografía Industrial**

“Los ensayos con radiaciones penetrantes se caracterizan por la exposición de los materiales a la acción de haces de radiaciones penetrantes, tales como rayos X, gamma y haces de neutrones, iones y electrones...” (Morrall, Jimeno, & Molera, 1985, pág. 886)

Dentro de las limitaciones de la prueba se entran las siguientes: se requiere tener acceso a dos superficies opuestas de la pieza, poca sensibilidad para la detección de una discontinuidad laminar y requiere mayores medidas de protección personal. Sin embargo, la prueba de radiografía permite detectar discontinuidades internas, y también se puede aplicar a todo tipo de materiales. En ese sentido, proporciona un registro permanente de los resultados; y proporciona el tamaño y forma de las discontinuidades internas.

#### **2.2.1.7.5. Ultrasonido Industrial**

El examen por ultrasonido utiliza la transmisión de ondas de sonido de alta frecuencia dentro de un material para detectar discontinuidades o cambios dentro de este. Las ondas ultrasónicas se propagan dentro de un medio elástico como es el sólido, un líquido o un gas, pero no en el vacío. Presenta las siguientes ventajas:

- Alto poder de penetración, detecta discontinuidades varios metros de profundidad.
- Alta sensibilidad, permite detectar discontinuidades extremadamente pequeñas.
- Se puede aplicar en cualquier tipo de materiales.

#### **2.2.1.8. CODIGO DE SOLDADURA ESTRUCTURAL ANSI/ AWS D1.1**

Los principales códigos de soldadura de la AWS son:

**AWS D1.1** Código de Soldadura Estructural – Acero

**AWS D1.2** Código de Soldadura Estructural – Aluminio

**AWS D1.3** Código de Soldadura Estructural – Láminas

**AWS D1.4** Código de Soldadura Estructural – Acero de Refuerzo

**AWS D1.5** Código de Soldadura de Puentes

**AWS D1.6** Código de Soldadura Estructural – Acero Inoxidable

El código ANSI/ AWS D1.1 es una norma aprobada por el Instituto Nacional Estadunidense de Normalización (ANSI), aplicada a cualquier tipo de estructura soldada realizada con aceros al carbono y de baja aleación utilizados comúnmente en la construcción. Cabe señalar que, este código se desarrolló específicamente para estructuras de acero soldadas que utilizan aceros al carbono o de baja aleación de 1/8 pulgadas (3 mm) de espesor o más gruesos, y con un límite elástico mínimo de 100 ksi (690 Mpa) o menos. (AWS D1.1, 2015)

Éste código consta de nueve secciones, que constituyen un conjunto de reglas para la regulación de la soldadura en la construcción con acero. Por otra parte, también incluyen nueve anexos normativos y once anexos informativos. Las secciones son las siguientes:

**Sección 1.** Requisitos generales

**Sección 2.** Diseño de conexiones soldadas

**Sección 3.** Precalificación de las WPS

**Sección 4.** Calificación

**Sección 5.** Fabricación

**Sección 6.** Inspección

**Sección 7.** Soldadura de pernos

**Sección 8.** Refuerzo y reparación de estructuras existentes

**Sección 9.** Estructuras tubulares

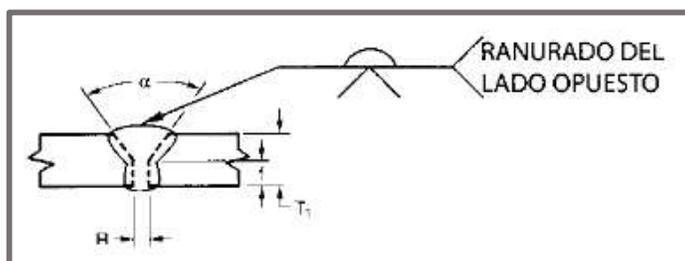
#### 2.2.1.8.1. Precalificación de las WPS

Esta sección contiene los requisitos para eximir una WPS (Especificación del procedimiento de soldadura) de los requisitos de calificación de la WPS de este código.

Entre otros requisitos, “Los procesos de soldadura SMAW, SAW, GMAW (excepto GMAW-S) y FCAW que cumplan con todas las disposiciones, de la sección 3 del código, deben considerarse precalificadas y están, en consecuencia, aprobadas para su uso sin realizar los ensayos de calificación de WPS para el proceso” (AWS D1.1, 2015, pág. 45).

Entre otros requisitos se señala que, la variación máxima de la abertura de la raíz para soldadura en ranura con CJP (penetración completa de la junta) y PJP (penetración parcial de la junta) no debe exceder de 1/8 pulg. (3 mm). Las soldaduras en ranura con CJP que pueden utilizarse sin realizar el ensayo de calificación de WPS descrito en la Sección 4 deben cumplir con los detalles de la Figura N° 2.16.

**Figura N° 2. 16. Soldadura simple en ranura en V y con junta a tope**



ANSI/ AWS D1.1, 2015: 95

Para el proceso SMAW los detalles de la junta toman los siguientes valores:

R (Apertura de raíz) = 0 a 3 mm, con tolerancia de +2, -0

f (Cara de raíz) = 0 a 3 mm, con tolerancia de +2, -0

$\alpha$  (Ángulo de ranura) = 60°, con tolerancia de +10°, -0

T<sub>1</sub> (Espesor del metal base) = U (ilimitado)

#### **2.2.1.8.2. Calificación**

Esta sección contiene los requisitos para la calificación de la WPS y las pruebas de calificación de rendimiento que debe aprobar todo el personal de soldadura (soldadores, operadores de soldadura y soldadores punteadores) para realizar soldaduras de conformidad con este código.

Por su parte esta sección se divide en cuatro partes:

**Parte A.** Requisitos generales

**Parte B.** Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)

**Parte C.** Calificación del desempeño

**Parte D.** Requisitos para los ensayos con el péndulo de Charpy (CVN)

#### **Calificación de la WPS**

Las posiciones calificadas de soldadura en ranura se describen de la siguiente forma:

- 1G: soldadura en ranura de placa en posición plana.
- 2G: soldadura en ranura de placa en posición horizontal.
- 3G: soldadura en ranura de placa en posición vertical.
- 4G: soldadura en ranura de placa en posición sobre cabeza.

Los tipos de ensayos de calificación que incluyen ensayos mecánicos y NDT son los siguientes:

- (1) Inspección visual
- (2) NDT
- (3) Doblado de cara, raíz y lado
- (4) Tracción en sección reducida
- (5) Tracción en todo el metal de soldadura
- (6) Macro – ataque

Por su parte los tipos de soldadura para la calificación de WPS se clasifican en:

- (1) Soldaduras en ranura con CJP para conexiones no tubulares
- (2) Soldaduras en ranura con PJP para conexiones no tubulares
- (3) Soldaduras en filete

- (4) Soldaduras en ranura con CJP para conexiones tubulares
- (5) Soldaduras en ranura con PJP para conexiones tubulares en T-, Y- y K- y juntas a tope
- (6) Soldaduras de tapón y en ranura

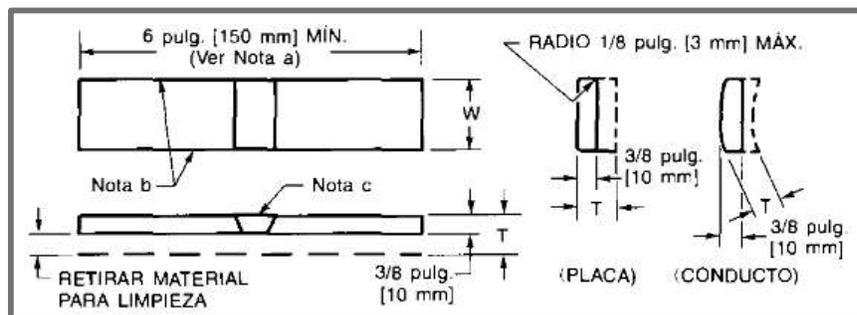
Cabe indicar que, se debe preparar una WPS por escrito que especifique todas las variables esenciales. “Los valores específicos para estas variables de WPS se deben obtener del registro de calificación del procedimiento (PQR) que debe servir como una confirmación escrita de una calificación exitosa de la WPS” (AWS D1.1, 2015, pág. 111).

En cuanto a la inspección visual de soldadura en ranura deben cumplir los siguientes requisitos:

- No se debe aceptar grieta alguna, independientemente del tamaño.
- Se deben rellenar todos los cráteres hasta la sección transversal completa de la soldadura.
- El refuerzo de la soldadura no debe exceder de 1/8 pulg. [3 mm] y debe tener fusión completa.
- La socavación no debe exceder de 1/32 pulg. [1 mm].
- Se debe inspeccionar la raíz de la soldadura de las ranuras con CJP y no deben tener ninguna grieta, fusión incompleta o penetración inadecuada de la junta.
- En el caso de ranuras con CJP soldadas desde un lado sin respaldo, la concavidad de la raíz o perforación por fusión debe cumplir con lo siguiente:
  - (a) La máxima concavidad de la raíz debe ser de 1/16 pulg. [2 mm], siempre que el espesor total de la soldadura sea igual o superior al del metal base.
  - (b) La perforación por fusión máxima debe ser de 1/8 pulg. [3 mm].

Para los ensayos mecánicos y específicamente para el ensayo de doblado de raíz y cara, las probetas deben prepararse de acuerdo a la Figura N° 2.17.

**Figura N° 2. 17. Probeta para doblado de raíz y cara**



ANSI/ AWS D1.1, 2015: 147

Para la aceptación de los ensayos de doblado, la superficie no debe tener discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones:

- 1/8 pulg. (3 mm) medidas en cualquier dirección sobre la superficie.
- 3/8 pulg. (10 mm)-la suma de las dimensiones más grandes de todas las discontinuidades que excedan de 1/32 pulg. (1 mm) pero inferiores o iguales a 1/8 pulg. (3 mm)
- 1/4 pulg. (6 mm)-la grieta máxima de esquina.

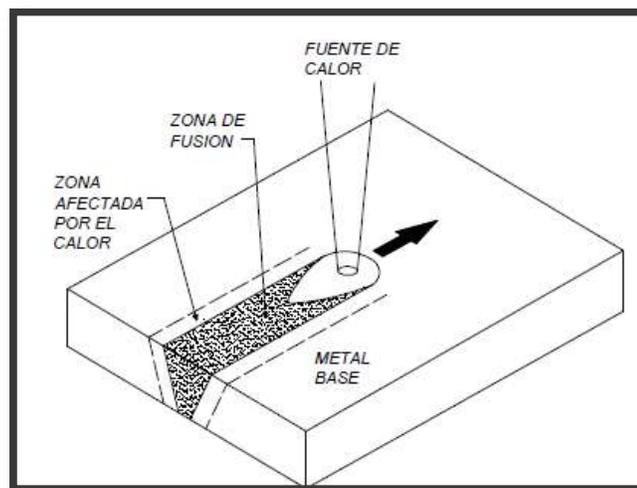
## 2.2.2. METALURGIA DE LA SOLDADURA

En general, “La metalurgia de la soldadura estudia la influencia de los elementos de aleación y los efectos producidos por el calor en las propiedades de los metales” (Rodríguez, 2010, pág. 23). Por tanto, para obtener una soldadura de calidad es preciso conocer los efectos del calor sobre las estructuras de los metales y también se debe evitar la pérdida de elementos de aleación por una elevación excesiva de la temperatura.

### 2.2.2.1. ZONAS METALÚRGICAS DE LA SOLDADURA

En soldadura a medida que la fuente de calor interactúa con el material se puede identificar tres principales zonas, estas son: Zona de Fusión (ZF), también conocida como metal de aporte; Zona afectada por el Calor (ZAC); y Metal Base (MB), ver la Figura N° 2.18.

**Figura N° 2. 18. Principales zonas de la soldadura**

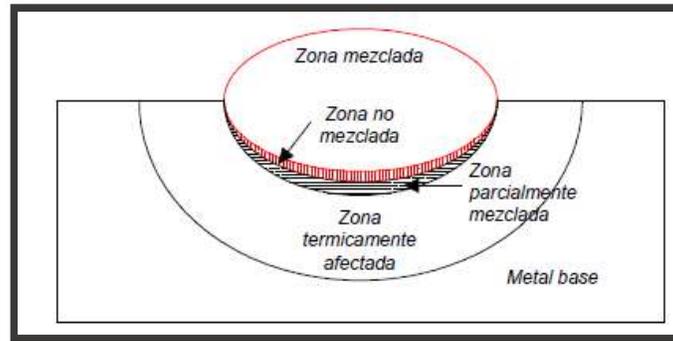


Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

#### 2.2.2.1.1. Zona de fusión

Es la zona formada solamente por el metal que se solidifica desde el estado líquido. Durante la fusión se producen transformaciones químicas, físicas y estructurales. Se diferencian tres regiones en la zona de fusión, ver la figura N° 2.19 (Pérez & Pullas, 2009).

**Figura N° 2. 19. Regiones de la zona de fusión**



Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

**Región mezclada:** Abarca la mayor parte del cordón de soldadura y es el resultado de la combinación completa del metal base con el metal de aporte en el pozo de soldadura.

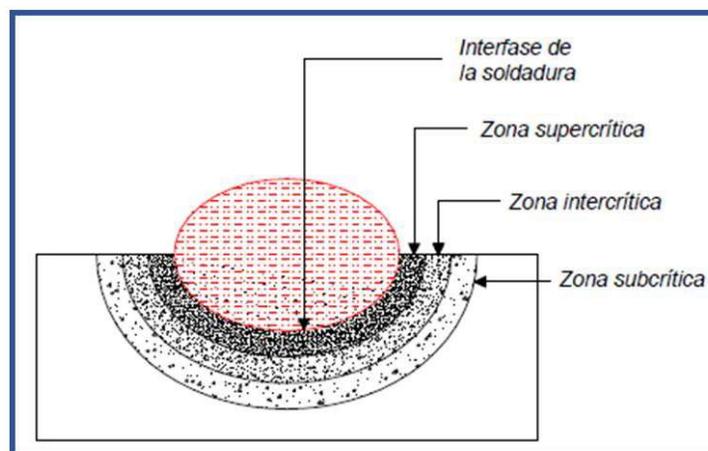
**Región no mezclada:** Es una capa adyacente a la línea de fusión con de 50 a 150  $\mu\text{m}$ . “Es una capa de material base fundido que no se mezcla con el metal de adición y que puede ser revelada metalográficamente por reactivos especiales” (Pérez & Pullas, 2009, pág. 57).

**Región parcialmente fundida:** Se encuentra en el metal base. Esta región corresponde a la transición entre la ZAC y la ZF. (Pérez y Pullas, 2009)

#### 2.2.2.1.2. Zona afectada por el calor (ZAC)

En ésta región se producen cambios microestructurales en estado sólido debido a que experimenta temperaturas suficientemente altas. Estos cambios microestructurales afectan las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la soldadura. La ZAC de la soldadura en un acero se divide en tres regiones: supercrítica, intercrítica y subcrítica, ver la Figura N° 2.20.

**Figura N° 2. 20. Regiones de la zona afectada por el calor**



Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

En ese sentido, el tamaño de la ZAC es una indicación de la magnitud de cambios estructurales. Para predecir las propiedades de esta zona, debe conocerse la cantidad, magnitud y crecimiento del grano y el ciclo térmico de la soldadura (Pérez & Pullas, 2009).

Además la región supercrítica se divide en dos regiones: el de crecimiento de grano y el de refinamiento de grano.

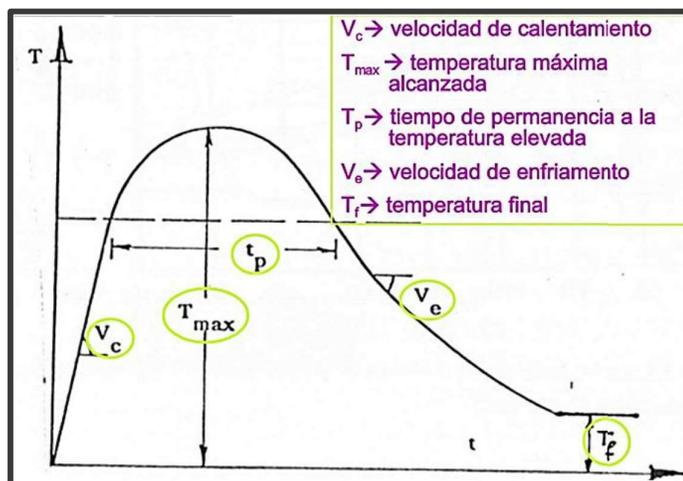
### 2.2.2.1.3. El metal base

Es la región donde no ocurre cambio micro estructural, aunque el ciclo térmico impuesto por la soldadura puede producir tensiones residuales de contracción longitudinal y transversal.

### 2.2.2.2. CICLO TÉRMICO DE LA SOLDADURA

El ciclo térmico representa la variación de la temperatura en función del tiempo para un punto del metal base próxima a la soldadura, como se puede apreciar en la Figura N° 2.21.

Figura N° 2. 21. Ciclo térmico de la soldadura



Fuente: <http://slideplayer.es/slide/85166/> (s.f.)

Los principales parámetros que describen térmico son:

- Temperatura inicial (To). Es la temperatura de partida.
- Velocidad de calentamiento. Es la pendiente de la curva en la subida desde To. Suele ser muy elevada de 300°C por segundo.
- Temperatura máxima o temperatura pico (Tmax). Es la temperatura máxima alcanzada en un punto del metal base.

La temperatura de pico indica la posibilidad de ocurrencia de transformaciones microestructurales en ese punto. Depende de las condiciones de soldadura, de la

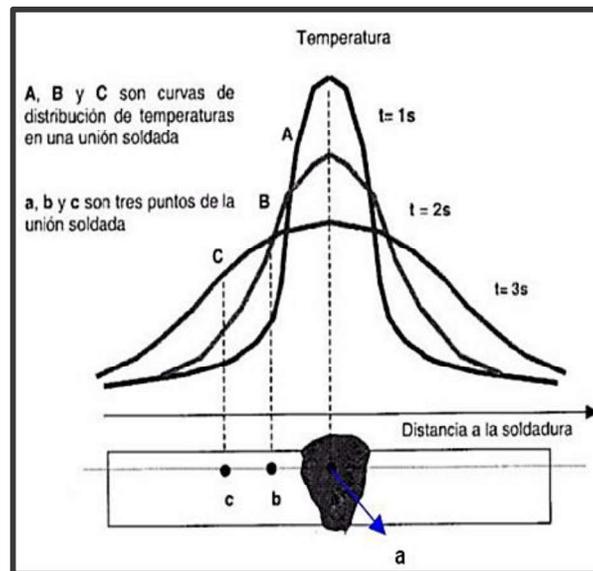
geometría y propiedades térmicas de la pieza, su temperatura inicial y la distancia del punto considerado a la fuente de calor.

- Velocidad de enfriamiento. La velocidad de enfriamiento está dada por la inclinación de la curva del ciclo térmico desde una determinada temperatura. Este parámetro es importante en la determinación de microestructuras en materiales como los aceros estructurales comunes, que pueden sufrir transformaciones de fase durante el enfriamiento.

Es preciso señalar que: “La representación del ciclo térmico es único para cada punto, dada la heterogeneidad térmica existente en el soldeo, que se deriva de la aplicación de una fuente de calor localizada y móvil” (García, 2010, pág. 78). Por tanto, cada punto de la pieza es sometido a un ciclo térmico particular que depende, entre otros factores, de la localización de este punto en relación a la soldadura.

Por otro lado, es posible representar la curva temperatura – distancia, a partir de las curvas del ciclo térmico de varios puntos del metal base, como se observa en la Figura N° 2.22. Estas curvas representan la repartición térmica en un instante de tiempo determinado (García, 2010).

**Figura N° 2. 22. Distribución de temperatura del ciclo térmico**



Fuente: <http://slideplayer.es/slide/85166/> (s.f.)

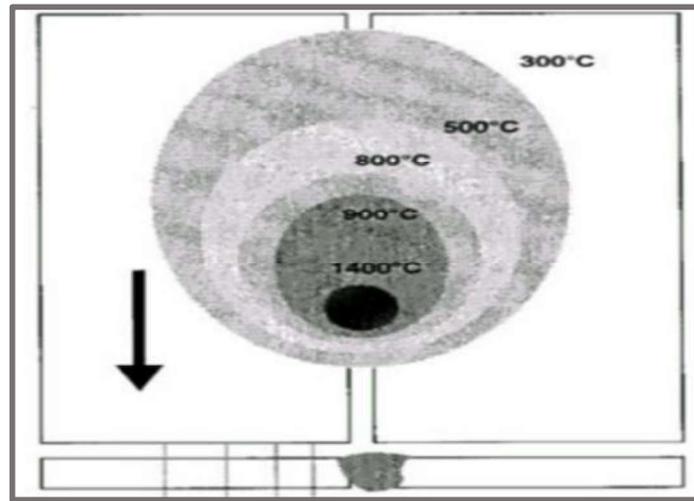
Por tanto, estas curvas reales de distribución de temperaturas son muy importantes pues permiten conocer en un momento determinado cual es la temperatura en diferentes puntos de la pieza que está siendo soldada. Si se conoce la temperatura en cada punto es posible

predecir qué zonas del metal se verán afectadas micro estructuralmente e incluso estimar el grado de distorsión a la que estaría sometida la unión como consecuencia del calor de soldadura.

En la Figura N° 2.23 se observa las curvas isométricas de la soldadura a tope. La curva de distribución de temperatura como las curvas isométricas depende de los siguientes factores:

- ✓ El baño fundido, que actúa como foco de calor más permanente. Aquí los parámetros a tomar en cuenta son la intensidad de la corriente, el voltaje y la velocidad de avance.
- ✓ La masa de metal base, que absorbe el calor. Aquí el factor determinante es el espesor de la pieza a soldar y la configuración del tipo de junta (a tope, en filete, etc.)

**Figura N° 2. 23. Curvas isométricas de una plancha sometida a soldadura a tope**



Fuente: <http://slideplayer.es/slide/85166/> (s.f.)

#### 2.2.2.2.1. Input térmico o energía de la soldadura

El input térmico es la energía aportada por un proceso de soldadura cuando se realiza un cordón por unidad de longitud, es expresado en Joules por milímetro (J/mm). Para procesos de soldadura por arco eléctrico, el input térmico es estimado por la ecuación 2.1.

$$H = \frac{\text{energía}}{\text{longitud}} = \frac{(V)(A)}{(v)} \quad [\text{ec. 2.1}]$$

Donde:

H = energía de soldeo, en J/mm

V = voltaje, en V

A = amperaje, en A

v = velocidad de soldeo, en mm/s

La ec. 2.1 permite conocer la energía bruta aportada por la máquina (H). Sin embargo, parte de ésta se pierde antes de llegar a la soldadura, debido a procesos de radiación, convección y conducción en el arco y en la pieza (García, 2010). En ese sentido, es de interés el cálculo de la energía neta aportada (Hn), que es el producto del input térmico bruto por el rendimiento del proceso de soldadura, como se muestra en la ecuación 2.2.

$$Hn = (H)(f) \quad [ec. 2.2]$$

Donde  $f$  es el rendimiento del proceso de soldadura. En la Tabla N° 2.9 se recogen los rendimientos de los principales procesos de soldadura.

**Tabla N° 2. 9. Rendimiento térmico de los procesos de arco**

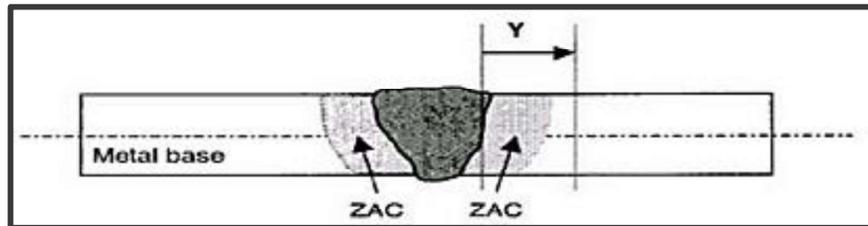
Proceso	F
SMAW	0.60 – 0.70
GMAW	0.70 – 0.85
TIG	0.60 – 0.65
SAW	0.90 – 0.95

Fuente: García, 2010:84

#### 2.2.2.2.2. Ecuación de la temperatura máxima en cada punto de la ZAC

La determinación de la temperatura máxima en cada punto de la ZAC permite analizar la influencia de las variables del ciclo térmico en un proceso de soldadura, ver la Figura N°2.24

**Figura N° 2. 24. Temperatura máxima de la ZAC a una distancia Y**



Fuente: <http://slideplayer.es/slide/85166/> (s.f.)

En ese sentido, la temperatura máxima en cualquier punto de la ZAC se determina mediante la ecuación 2.3.

$$\frac{1}{T_{max} - T_o} = \frac{4.13(\rho)(C)(Y)(t)}{H_{neto}} + \frac{1}{T_{fusión} - T_o} \quad [ec. 2.3]$$

Donde:

$T_{max}$  = Temperatura máxima (°C) a una distancia Y (mm) del extremo o contorno del metal fundido

$T_o$  = Temperatura inicial del material (°C)

$T_{fusión}$  = Temperatura de fusión (°C)

$\rho$  = Densidad del material (g/mm<sup>3</sup>)

$C$  = Calor específico del metal sólido (J/g .°C)

$t$  = Espesor del material (mm)

$H_{neto}$  = Calor neto (J/mm)

Cabe precisar que, la ecuación 2.3 no es aplicable a puntos situados en el metal fundido, sólo es válida para puntos situados en la ZAC.

Una de las aplicaciones más interesantes de la ecuación de la T máx. es la de la estimación del ancho de la ZAC por la soldadura. Sin embargo, para calcular el ancho de la ZAC debe identificarse primero el rango de temperaturas que la delimita. No cabe duda de que el extremo de la ZAC más cercano a la soldadura, está limitado por la temperatura de fusión del metal base ( $T_{fusión}$ ) dado que la ZAC es la región de metal sólido más próxima al baño fundido. El extremo más alejado de la ZAC viene definido por la temperatura mínima, por encima de la cual se producen transformaciones microestructurales en estado sólido en el metal base, que alteran significativamente las propiedades de la unión soldada. Por ejemplo, para el caso de los aceros al carbono, o de baja aleación, tienen un contorno definido por aquellos puntos que han alcanzado una temperatura máxima de 723 °C.

Por tanto, el ancho de la ZAC ( $Y_{max}$ ) está determinado por la ecuación 2.4.

$$Y_{max} = \left[ \left( \frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left( \frac{1}{T_{fusión} - T_o} \right) \right] \times \left[ \frac{H_{neto}}{4.13 \times \rho \times C \times t} \right] \quad [ec.2.4]$$

### 2.2.2.3. SOLDABILIDAD

La soldabilidad es aquella propiedad que describe la facilidad con la cual se puede soldar apropiadamente un metal. En ese entender, “La soldabilidad es la facilidad que presenta un metal para unirse por soldadura con otro de su misma naturaleza” (Rodríguez, 2010, pág. 46). Por tanto, se puede decir que la soldabilidad es la capacidad de un metal para ser soldado, produciendo una soldadura sana, de calidad y válida para el servicio.

La soldabilidad se puede evaluar desde el punto de vista operatorio, metalúrgico y constructivo.

#### **2.2.2.3.1. Soldabilidad operatoria**

La soldabilidad operatoria está relacionada con la elección del tipo de proceso de soldadura y los medios empleados para realizar la soldadura. Asimismo, la soldabilidad está relacionada con el enlace de los átomos o moléculas que forman el material (Rodríguez, 2010). El enlace metálico tiene elevada soldabilidad operatoria.

En ese entender, la soldabilidad operatoria se refiere a la facilidad de ejecutar el cordón y a la elección del proceso de soldadura.

#### **2.2.2.3.2. Soldabilidad metalúrgica**

La soldabilidad metalúrgica se refiere a los cambios microestructurales de la ZAC y a las variaciones fisicoquímicas de la unión soldada, durante el proceso de soldadura. Si los cambios son significativos en la ZAC, existirán modificaciones en el metal base. Asu vez, estas modificaciones producirán variaciones en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la pieza.

La soldabilidad metalúrgica es la que determina hasta qué punto pueden soldarse dos metales. Depende de la elección del material de aportación, fundente, temperatura de soldeo, tratamientos térmicos..., que determinarán en última instancia las características mecánicas y químicas de la unión (Rodríguez, 2010, pág. 46).

La soldabilidad metalúrgica busca conseguir la continuidad metálica de la unión. La continuidad metálica es aquella propiedad que indica que se debe tener la misma composición química a lo largo de todo el metal base. De esta manera, se garantiza que la unión tenga propiedades de resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión, buena tenacidad y un aspecto aceptable.

En general, decimos que un metal o aleación es soldable (metalúrgicamente) si cumple con las siguientes condiciones:

- Que no presenta elevado endurecimiento de la ZAC
- Que tenga una buena tenacidad después de efectuada la soldadura.
- Que su composición química sea tal, que la zona fundida no se haga frágil por dilución con el metal base.

#### **2.2.2.3.3. Soldabilidad constructiva**

La soldabilidad constructiva hace referencia al buen diseño de la unión, con el propósito de evitar problemas derivados de las deformaciones y tensiones de la soldadura. De esta

manera, estudia las condiciones que debe reunir la soldadura para poder entrar en servicio en una construcción determinada. Define las propiedades de conjunto de la construcción, por la sensibilidad de la unión a la deformación y a la rotura bajo el efecto de las tensiones.

#### **2.2.2.4. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS AL CARBONO Y DE BAJA ALEACION**

El acero es básicamente una aleación de hierro, carbono y otros elementos. Siendo “el carbono uno de sus principales elementos químicos, que influye considerablemente sobre sus propiedades y características” (OERLIKON, 2001, pág. 77). Los aceros obtienen sus propiedades específicamente de su contenido de carbono. Según su porcentaje de carbono se clasifican en: aceros de bajo carbono (0.05 – 0.30 %C), aceros de mediano carbono (0.30 – 0.45 %C), aceros de alto carbono (0.45 – 0.90 %C) y aceros de herramientas (0.90 – 1.5 %C). En cambio, se denominan aceros de baja aleación cuando la suma de sus elementos de aleación no supera el 5%. Los factores más importantes que influyen en la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación son:

- Las transformaciones que se producen en la ZAC.
- La composición química de los materiales a unir (metal base y metal de aporte).
- Espesor.

Las transformaciones en la ZAC están influenciadas por el aporte de energía de soldadura y por la velocidad de calentamiento y enfriamiento. Éstas determinarán el tipo de transformaciones microestructurales que experimentará el acero y sus propiedades mecánicas finales.

En cuanto a la composición química, el elemento más influyente es el carbono, sin embargo los otros elementos también la afectan. La influencia de estos elementos se calcula a través del carbono equivalente (CE). La soldabilidad de un acero mejora mientras disminuye su CE y por otro lado también tiene mayor implicancia la dilución.

Por último, a medida que el espesor del metal que va a ser soldado disminuye, la soldabilidad del material mejora. Mientras el espesor de la sección se incrementa, también lo hace la velocidad de enfriamiento. Debido a su mayor masa, en placas gruesas la extracción de calor es más rápida que en las placas delgadas con una soldadura idéntica, lo que produce que progresivamente los constituyentes metalúrgicos sean más duros y menos dúctiles.

#### 2.2.2.4.1. Carbono equivalente

El carbono equivalente (CE) es el índice que permite correlacionar la composición química de un acero con su tendencia a presentar estructuras frágiles cuando este es sometido a un proceso de soldadura, siendo el carbono el elemento que más influye en la templabilidad y en la dureza final de un acero. Por tanto, el CE representa una forma de describir la composición química por medio de un solo número, a fin de analizar como las variaciones de la misma influyen en el comportamiento del material.

El cálculo del carbono equivalente brinda la siguiente información:

- La templabilidad.
- La sensibilidad de los aceros a la fisuración en frío (a fin de estimar la temperatura mínima de precalentamiento recomendada o la tolerancia a la fisuración debida al hidrógeno)
- La evaluación de las propiedades durante el servicio (que permita medir a través del CE, por ejemplo, el agrietamiento a causa de los sulfuros o el agrietamiento por corrosión bajo tensiones).

De acuerdo a la AWS D1.1 (2015) el CE se calcula mediante la ecuación 2.5.

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad [ec. 2.5]$$

El análisis químico puede ser obtenido de:

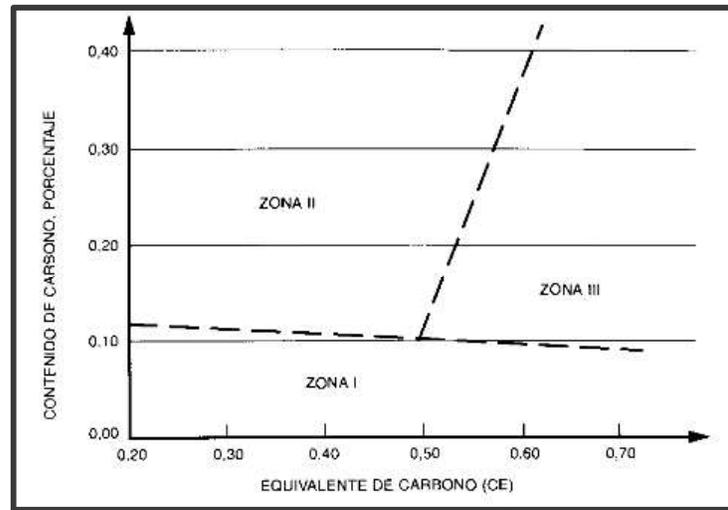
- (1) Certificados de ensayos de la acería
- (2) Composición química típica de producción (acería)
- (3) Composición química de la especificación (con valores máximos)
- (4) Ensayos de los usuarios (análisis químicos)

El criterio que se emplea con el CE es que cuanto más alto sea su valor, el acero tendrá mayor dificultad para ser soldado. Para evitar riesgos de fisuración en frío por la presencia de estructuras frágiles en el cordón de soldadura se recomienda que el CE no sea mayor a 0,35-0,40. Por tanto, se puede clasificar genéricamente la soldabilidad de los aceros en función de su CE:

- Aceros con un CE < 0,2 - 0,3% tienen buena soldabilidad
- Aceros con un CE > 0,4% tienen riesgo de fisuración en frío en la ZAC

Por otro lado, según el código de soldadura estructural ANSI/ AWS D1.1 los aceros se pueden clasificar su posicionamiento en el diagrama de Graville en la Figura N° 2.25.

Figura N° 2. 25. Diagrama de Graville para la clasificación de aceros



ANSI/ AWS D1.1, 2015: 361

Las características de comportamiento de cada zona son las siguientes:

**Zona I.** Según la norma “el agrietamiento es improbable, pero puede ocurrir con hidrógeno alto o restricción alta” (AWS D1.1, 2015, pág. 357).

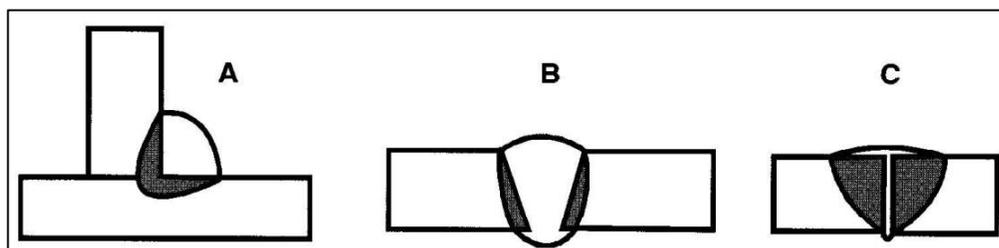
**Zona II.** “El método de control de dureza y la dureza seleccionada deberán ser utilizados para determinar la entrada mínima de calor para soldaduras en filete de pasada única sin precalentamiento” (AWS D1.1, 2015, pág. 357).

**Zona III.** Para esta zona “Deberá usarse el método de control de hidrógeno. Donde se restringe la entrada de calor para preservar las propiedades de la ZAC” (AWS D1.1, 2015, pág. 357).

#### 2.2.2.4.2. Dilución

La dilución se define como el porcentaje de metal base fundido e incorporado a la soldadura. Es decir, es el peso con el que el metal base contribuye a la composición química del cordón. La dilución depende en gran medida del tipo de junta aplicada, ver la Figura N° 2.26.

Figura N° 2. 26. Dilución para diferentes tipos de junta



Fuente: <https://cifpaviles.webcindario.com/U.D%205.pdf> (s.f.)

La dilución se calcula mediante la siguiente formula, tomando en cuenta la figura N° 2.26:

$$\% \text{ Dilución} = \frac{\text{área sombreada}}{\text{área total del cordón de soldadura}} \times 100 \% \quad (\text{ec.2.6})$$

En cuanto a la composición química del cordón de soldadura es preciso conocer las relaciones de dilución y las composiciones químicas del metal base y de aporte. En ese sentido la composición de un elemento de aleación específico en el cordón de soldadura diluido se calcula mediante la ecuación.

$$X_W = (D_A)(X_A) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F) \quad (\text{ec.2.7})$$

Donde:

$X_W$  = Porcentaje promedio del elemento X en el depósito de soldadura

$X_A$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base A

$X_B$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base B

$D_A$  = Porcentaje de dilución del metal base A, expresado en decimal

$D_B$  = Porcentaje de dilución del metal base B, expresado en decimal

$D_T$  = Porcentaje de dilución total, expresado en decimal

#### 2.2.2.5. TRANSFORMACIONES DE FASE DEL ACERO EN LA SOLDADURA

El hierro, componente principal del acero, es un metal alotrópico, es decir, puede existir en más de una estructura cristalina dependiendo fundamentalmente de la temperatura (Avner, 1988). Existen tres clases de estructuras cristalinas: las cubicas centradas en el cuerpo (BCC), las cubicas centradas en las caras (FCC) y las hexagonales compactas (HC). En ese sentido, las formas alotrópicas que presenta el hierro son:

**Hierro  $\alpha$  (Fe- $\alpha$ ):** aparece hasta los 768 °C. Su estructura cristalina es BCC y prácticamente no disuelve carbono.

**Hierro  $\beta$  (Fe- $\beta$ ):** se encuentra entre 768 °C y 910 °C. Cristaliza en FCC. Es similar al hierro  $\alpha$  pero no es magnético.

**Hierro  $\gamma$  (Fe- $\gamma$ ):** se encuentra entre 910 °C y 1394 °C. Cristaliza en BCC. Disuelve fácilmente el carbono hasta el 2,11 % y es diamagnético (débilmente magnético).

**Hierro  $\delta$  (Fe- $\delta$ ):** cristaliza entre 1.394 °C y 1538 °C en la estructura BCC. Puede disolver hasta un 0,1 % de carbono. No tiene aplicaciones siderúrgicas. A partir de 1538 °C, se inicia la fusión del hierro



- **Austenita:** es una solución sólida por inserción de carbono en hierro  $\gamma$  (hasta 2,11% C). Es blando, deformable, tenaz y muy resistente al desgaste. Es el constituyente más denso del acero y es no magnético. Tiene una estructura FCC y comienza a formarse a 727 °C.
- **Ferrita:** solución sólida de carbono en hierro  $\alpha$ . Es el constituyente más blando del acero. Disuelve muy poco carbono (menos de 0,008%).
- **Cementita:** es el carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Es el más duro y frágil (6,67% C).
- **Perlita:** es el microconstituyente eutectoide formado por ferrita (88,7%) y cementita (11,3%). El contenido en carbono de la aleación es de 0,77%.
- **Ledeburita:** es una aleación eutéctica con un contenido en carbono de 4,3% compuesta por austenita y cementita. Es propio de las fundiciones.

Es importante observar que, las transformaciones microestructurales del acero en estado sólido se producen cuando el acero está expuesto a temperaturas superiores a  $AC_1$  (727°C), que es la temperatura eutectoide, y por tanto es un punto crítico.

Sin embargo, cuando el acero es soldado, las propiedades del metal base son alteradas por los ciclos termales localizados generados por la soldadura. En ese sentido, se crean microestructuras “*fuera del equilibrio*” en la zona de fusión de la soldadura y en la zona afectada por el calor. Estas microestructuras son significativamente diferentes en apariencia y propiedades de aquellas encontrados en el metal base, y pueden comprometer la integridad de la junta de soldadura.

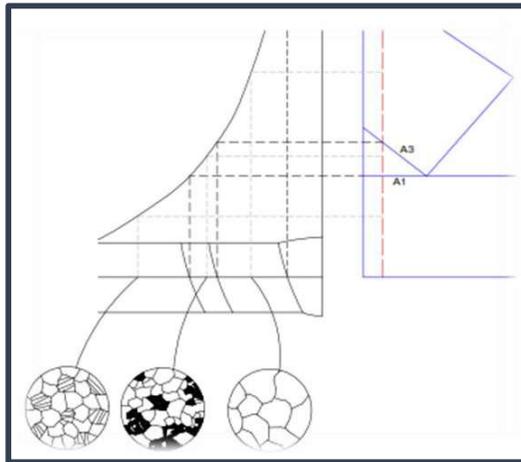
El carbono contenido en los aceros presenta un papel muy importante en la evolución microestructural de la soldadura. Cuando el contenido de carbono se incrementa, los cambios en la microestructura son pronunciados ocasionado por la distribución no uniforme de carbono. Estos cambios son muy prominentes durante el enfriamiento rápido de la soldadura, que intensifica estos efectos, produciendo microestructuras que se desvían del equilibrio (Pérez & Pullas, 2009).

#### **2.2.2.5.1. Transformaciones de fase en la fase solida durante el calentamiento**

La fase de calentamiento es tan importante como la de enfriamiento ya que determina algunos parámetros tales como: recristalización, crecimiento de grano y transformaciones alotrópicas ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ) (Pérez & Pullas, 2009).

La transformación de la microestructura en el calentamiento ocurre rápidamente debido a la alta tasa de calentamiento de la soldadura, de 200-300 °C/s, ver la Figura N° 2.28.

**Figura N° 2. 28. Estructuras generadas en el calentamiento del proceso de soldadura de un acero al carbono**



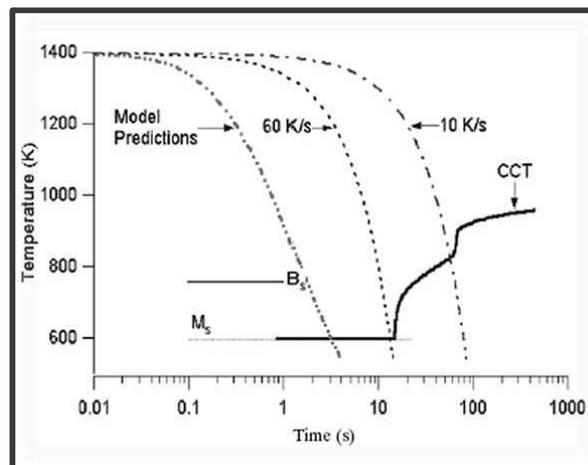
Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

#### 2.2.2.5.2. Transformaciones de fase en el enfriamiento

Las condiciones de enfriamiento normales en un proceso de soldadura suelen estar alejadas de las de equilibrio, lo que afecta las proporciones de los constituyentes del acero (ferrita y perlita) y a la naturaleza de fases metaestables (Pérez & Pullas, 2009).

Debido a la influencia de la velocidad de enfriamiento se utilizan los diagramas de tiempo – temperatura – transformación TTT, que expresan los productos de transformación en enfriamiento realizados a diferentes velocidades (Pérez & Pullas, 2009). Estos diagramas están desarrollados a temperaturas de austenización altas y tiempos cortos de permanencia a estas temperaturas, como se aprecia en la Figura N° 2.29.

**Figura N° 2. 29. Diagrama tiempo – temperatura – transformación del acero AISI 1045**



Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

Con velocidades de enfriamiento altas, la ferrita proeutectoide se nuclea en las juntas de grano austenítico y forma agujas dirigidas hacia el interior de los granos grandes existentes suponen una disminución de la resiliencia y como consecuencia un aumento en la fragilidad, (Pérez & Pullas, 2009).

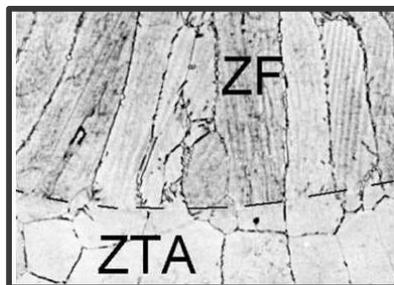
#### **2.2.2.6. SOLIDIFICACIÓN DE LA SOLDADURA**

El acero sufre cambios cuando solidifica desde el estado líquido, hasta alcanzar la temperatura ambiente. En ese sentido, “La formación de los granos ocurre durante la solidificación inicial desde el estado líquido, pero esta estructura granular recristaliza durante el cambio de fases de austenita a ferrita” (Neely, 2000, pág. 245). Por tanto, al recalentar el metal a una temperatura más alta que la temperatura crítica A1 los granos recristalizan de nuevo. Considerando a la zona de fusión como una microfundición, se puede decir que los parámetros que controlan la solidificación de la soldadura son: la razón de crecimiento del grano, el gradiente de temperatura y la composición de la aleación.

##### **2.2.2.6.1. Solidificación inicial del pozo de soldadura**

La solidificación del metal de soldadura ocurre espontáneamente, se inicia en los puntos de máximo espesor del baño de fusión. En ese sentido, “Cuando ocurre la solidificación, el metal de la soldadura empieza a formar una estructura reticular similar a la del metal base. La nucleación tiene lugar en la línea límite entre el metal fundido de la soldadura y el metal base” (Neely, 2000, pág. 246). Esto quiere decir que, los granos de zona de fusión localizados junto a la línea de fusión son una continuación de los granos adyacentes a la zona afectada por el calor ZTA ó ZAC, como se puede ver en la Figura N° 2.30.

**Figura N° 2. 30. Continuidad entre los granos de la zona afectada por el calor (ZAC) y de la zona de fusión (ZF)**



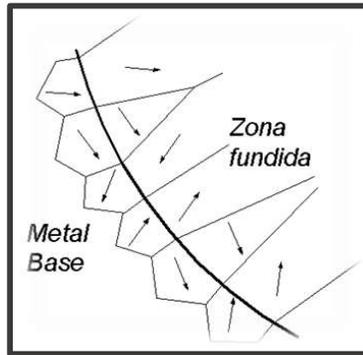
Fuente: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

##### **2.2.2.6.2. Crecimiento competitivo**

La solidificación del pozo de fusión es caracterizada por un crecimiento competitivo entre los granos, de forma similar a lo que ocurre en la región columnar de piezas fundidas.

“Cuando el metal de la soldadura empieza a solidificarse, los cristales crecen hacia el acero fundido en enfriamiento en líneas perpendiculares a la dirección del máximo flujo de calor” (Neely, 2000, pág. 247). Es decir, los cristales se orientan a sí mismos hacia la dirección de la soldadura y hacia fuera del metal base, como se puede ver en la figura N° 2.31.

**Figura N° 2. 31. Crecimiento competitivo entre los granos de la zona fundida**

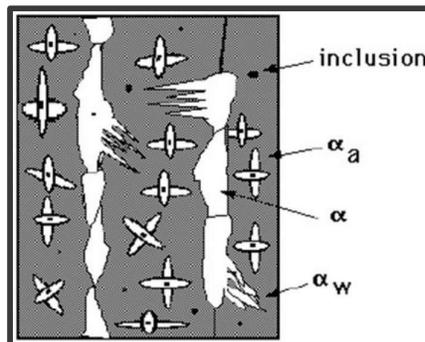


Fuente: <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

#### 2.2.2.7. MICROESTRUCTURA

Al final de la soldadura, la zona fundida, de un acero de bajo carbono o de baja aleación presenta una microestructura compleja. Desde el punto de vista de transformación de fase, la clasificación de Dubé para los granos de ferrita es el más usado hoy en día. Según esta clasificación, la microestructura obtenida por el enfriamiento de la soldadura desde la fase líquida hasta la temperatura ambiente se denomina microestructura primaria (Pérez & Pullas, 2009). Esta consiste de ferrita alotriomórfica ( $\alpha$ ), ferrita de placas laterales o la ferrita de Widmanstaetten ( $\alpha_w$ ), y la ferrita acicular ( $\alpha_a$ ) y las llamadas microfases, que puede incluir cantidades pequeñas de martensita, austenita retenida o perlita degenerada, como se puede ver en la Figura N° 2.32.

**Figura N° 2. 32. Constituyentes esenciales de la microestructura primaria en un depósito de soldadura de acero**



Fuente: <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

#### 2.2.2.7.1. La ferrita alotriomórfica

Es la primera fase que se presenta en el enfriamiento de los granos austeníticos por debajo de la temperatura crítica A3. Nuclea heterogéneamente en los límites de grano de la austenita columnar, los cuales son vías para la fácil difusión de este tipo de microestructura.

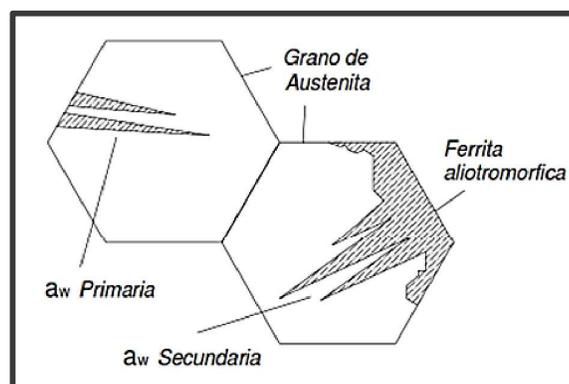
#### 2.2.2.7.2. La ferrita acicular

Es observada en soldadura de aceros de baja aleación. Esta fase es de importancia tecnológica ya que provee una microestructura tenaz y resistente. El término acicular significa que tiene la forma de una aguja, sin embargo está aceptado que la ferrita acicular tienen en tres dimensiones una morfología de delgadas placas lenticulares. La ferrita acicular es esencialmente idéntica a la bainita. Su morfología difiere de la bainita en que la ferrita acicular nuclea intragranularmente en las inclusiones dentro de granos grandes de austenita (Pérez & Pullas, 2009).

#### 2.2.2.7.3. La ferrita de Widmanstaetten

La ferrita de Widmanstaetten es visualizada como dos placas mutuamente acomodadas con una diferencia pequeña en sus planos habituales, lo que da la característica morfológica de cuña de la ferrita de Widmanstaetten (Pérez & Pullas, 2009). La ferrita de Widmanstatten se clasifica en: primaria cuando crece desde las superficies de grano de la austenita, y ferrita de Widmanstatten secundaria que se desarrolla desde cualquier ferrita alotriomórfica que puede estar presente en la microestructura, ver la figura N° 2.33.

**Figura N° 2. 33. Morfología de la ferrita de Widmanstatten primaria y secundaria**



Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf> (s.f.)

#### 2.2.2.7.4. Microfases

Las microfases son pequeñas cantidades de martensita, austenita degenerada y perlita las cuales se forman después de que todas las otras fases principales (ferritas alotriomórfica, de Widmanstaetten, acicular) ya lo han hecho.

Las microfases también son encontradas en la zona térmicamente afectada de aceros soldados. Las microfases son relativamente duras y se comportan en muchos aspectos como inclusiones quebradizas. Por consiguiente las microestructuras son de importancia para determinar la dureza de depósitos de la soldadura.

### **2.2.3. ENSAMBLE DE CARROCERÍAS**

#### **2.2.3.1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL ENSAMBLE DE CARROCERÍAS**

##### **2.2.3.1.1. Chasis**

En general, “un conjunto de perfiles unidos muy rígidamente en forma de cuadro, de manera que el conjunto es indeformable” (Villegier, 1980, pág. 65). Por tanto, el chasis es una estructura cuyo propósito es el de conectar rígidamente la suspensión delantera y la posterior. Al mismo tiempo, el chasis ofrece puntos de amarre para los diferentes sistemas del vehículo, así como el de proteger al conductor frente a la colisión, ver la figura N° 2.34.

**Figura N° 2. 34. Chasis de un bus urbano Hino**



Fuente: [http://www.hinoperu.com.pe/venta\\_buses\\_transporte\\_urbano\\_turistico\\_interprovincial\\_japoneses\\_fc\\_bus.php](http://www.hinoperu.com.pe/venta_buses_transporte_urbano_turistico_interprovincial_japoneses_fc_bus.php)  
(s.f.)

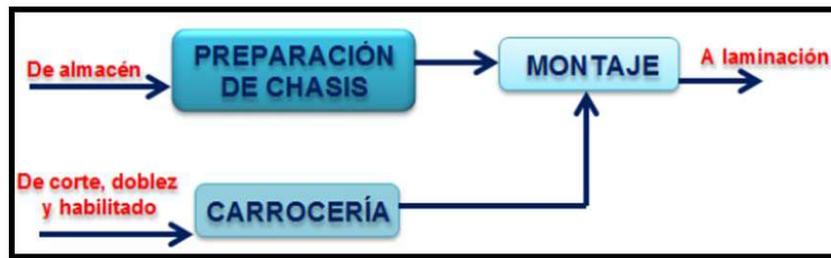
##### **2.2.3.1.2. Carrocerías**

Sobre carrocería “Se puede definir como una caja especial concebida para transportar personas o mercancías, durante la circulación del automóvil. Tiene algunas prolongaciones cuyo papel es la protección de los órganos que aseguran su movilidad y su dirección, combinando a veces con una forma que ofrezca una resistencia reducida al avance en el aire” (Villegier, 1980, pág. 42).

#### **2.2.3.2. PROCESO DE ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA DE CARROCERÍAS**

El diagrama general del proceso de ensamblaje está formado por la preparación del chasis, fabricación de la estructura de la carrocería y el montaje de la misma, como se puede ver en la Figura N° 2.35, todas estas actividades son necesarias para tener la unidad carrozada y lista para avanzar al área de laminación.

Figura N° 2. 35. Diagrama general de proceso de ensamblaje



Fuente: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13204/TESIS%20ASAI-OLVERA%20JUNIO%202014.pdf?sequence=1> (s.f.)

Derivado de la descripción de las actividades, se han establecido las siguientes etapas de trabajo:

- a. Preparación del chasis
- b. Armado de la estructura de la carrocería
- c. Montaje de la estructura en el chasis

#### 2.2.3.2.1. Preparación del chasis

Se lleva a cabo la recepción del chasis y las operaciones necesarias para su alargamiento. En ese sentido, se realizan las adecuaciones necesarias para cortarlo, alargarlo y soldarlo. De la misma forma, se coloca la estructura del piso, dejando el chasis listo para la etapa de montaje.

Las actividades para llevar a cabo el proceso de preparación del chasis son las siguientes:

- **Recepción del chasis.** En primer lugar se recibirá el chasis del área de almacén, como se ve en la Figura N° 2.35.
- **Desconexión de los sistemas del chasis.** Este procedimiento consiste en la desconexión de los sistemas hidráulicos, neumáticos y eléctricos del chasis.
- **Corte.** Éste se lleva a cabo mediante un proceso de corte mecánico, debido a que esta operación no compromete la estructura físico – química del material del chasis.
- **Montaje de la estructura de alargamiento.** La estructura de alargamiento se realiza en un subensamble por separado, con la condición de que tiene que estar alineado y sin deformaciones.
- **Alineamiento estructura – chasis.** Para favorecer el tiempo de operación, antes de soldar la estructura de alargamiento se tiene que posicionar para una alineación con respecto al chasis, como se observa en la Figura N° 2.37.
- **Preparación de bordes.** Con el propósito de conseguir una soldadura óptima se realiza la preparación de bordes, a través de bisel de las piezas a soldar con un ángulo de 45°.

- **Soldadura.** Considerando que el chasis está fabricado con un acero aleado, es preciso emplear electrodos con recubrimiento básico. En este caso, se utiliza el electrodo E 7018. La soldadura debe efectuarse de forma ascendente y con corriente continua. También, se debe tener en cuenta la polaridad invertida de los electrodos.

**Figura N° 2. 36. Alineación estructura de alargamiento – chasis**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Área de ensamblaje de la empresa INTRAMET S.R.L., 2017)*

- **Fabricación de la estructura de la plataforma.** Este procedimiento incluye varias subetapas, que se describen a continuación:
  - ✓ **Preparación de placas.** Éstas se fabrica en forma de “L”, con aberturas para la soldadura. Asimismo, estas placas deben ser de plancha de acero A – 36 de ¼ de pulgada de espesor.
  - ✓ **Distribución de placas en el chasis.** Las placas son distribuidas de acuerdo al diseño, como se distingue en la Figura N° 2.38. Luego son soldadas con el electrodo E 7018.

**Figura N° 2. 37. Distribución de placas sobre el chasis**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Área de ensamblaje de la empresa INTRAMET S.R.L., 2017)*

#### **2.2.3.2.2. Armado de la estructura de la carrocería**

Esta etapa está conformada por el agrupamiento de los subensambles de la estructura de la carrocería, éstas son: techo, laterales, frente y posterior. En base al análisis de las

características de los subensambles se establece la secuencia de armado de la estructura de la carrocería. Se inicia el proceso a partir de tres pasos del flujo de materiales para la elaboración de la carrocería:

**Paso 1.** Recepción de la materia prima. La cual está ubicada en el almacén de la materia prima. Está compuesta de perfiles cuadrados, rectangulares, ángulos, platinas y placas de acero.

**Paso 2.** Transformación de la materia prima en longitud y forma. La materia prima es abastecida al área de habilitado, corte y dobléz.

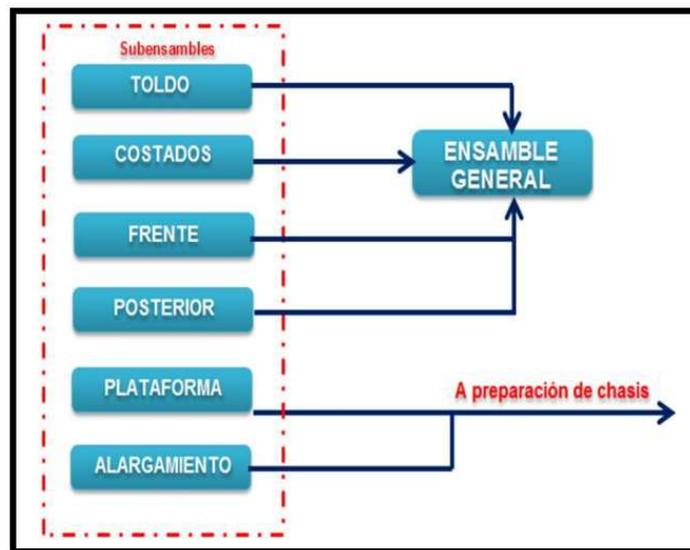
**Paso 3.** Se integra la materia prima para la fabricación de la estructura de la carrocería.

El paso 3 de la secuencia de armado de la carrocería se encuentra dentro de la línea de producción, en donde se ensamblan los elementos: techo, laterales, frontal y posterior.

### 2.2.3.2.3. Montaje

En esta etapa se monta los subensambles de la estructura sobre la plataforma, en el cual se realizan las operaciones necesarias para la unión de la carrocería con el chasis, como se observa en el diagrama de flujo de la Figura N° 2.40.

**Figura N° 2. 38. Diagrama de flujo para el montaje de la carrocería**



Fuente: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13204/TESIS%20ASAI-OLVERA%20JUNIO%202014.pdf?sequence=1>

Las operaciones necesarias para el ensamblado general se enlistan a continuación:

- Traslado de los subensambles mediante grúa puente

- Nivelación y alineación de la carrocería – chasis.
- Colocación y aseguramiento mediante soldadura.
- Aplicación de anticorrosivo mediante soplete de gravedad

Por último, se obtiene la estructura final de la carrocería, como se ilustra en la Figura N° 2.41.

**Figura N° 2. 39. Estructura metálica de la carrocería ensamblada**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Área de ensamblaje de la empresa INTRAMET S.R.L., 2017)*

### **2.2.3.3. TIPOS DE ACEROS EMPLEADOS EN EL ENSAMBLE DE CARROCERÍAS**

Se dice que, “Independientemente de su recubrimiento, los grandes tipos de acero aplicado en el mundo del automóvil pueden clasificarse en: aceros de conformación en frío convencionales, aceros de alto límite elástico (HSS) y aceros laminados en caliente y decapados” (Águeda, García, Gómez, Gonzalo, & Martin, 2005, pág. 97).

Dentro de los aceros los más utilizados son los convencionales por conformación en frío y los de alto límite elástico (High-Strength Steel). A su vez, pueden ir con un recubrimiento para protegerlos de la corrosión, uso cada vez más extendido entre los constructores de automóviles para garantizar la durabilidad de la carrocería.

#### **2.2.3.3.1. Acero DIN S355MC o ASTM A607 GRADO 50**

El acero DIN S355MC es un acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA) que se utiliza en la industria automotriz especialmente en el chasis, en la suspensión y en piezas de la seguridad de vehículos para pasajeros. Según la norma alemana DIN/ EN 10149-2: 2013, “S” indica ser un acero estructural con “355” Mpa de límite elástico y “MC” indica que es un acero laminado en caliente para conformación en frío.

El equivalente del acero DIN S355MC es el acero ASTM A607 GRADO 50.

En ese sentido, en la tabla N°2.10 se describe la composición química del acero ASTM A607 GRADO 50 y en la tabla N°2.11 se detallan sus propiedades mecánicas.

**Tabla N° 2. 10. Composición química del acero ASTM A607 GRADO 50**

Designación	C	Mn	P (%)	S (%)	Si	V	Nb	Ti	Al
ASTM	(%)	(%)	Máx.	Máx.	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	Máx.	Máx.			Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.
<b>A 607</b>	0.12	1.5	0.025	0.02	0.5	0.2	0.09	0.15	0.015

Fuente: [http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition\\_eu.php](http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition_eu.php) (s.f.)

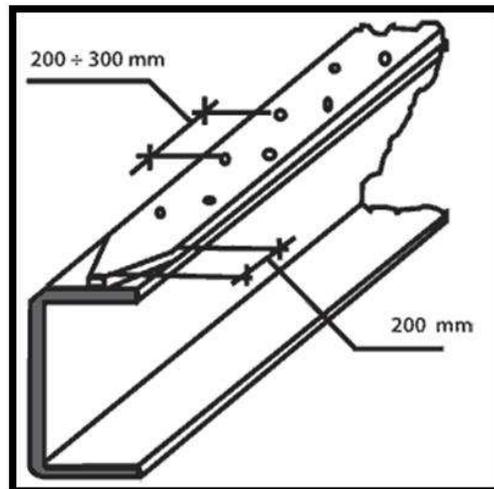
**Tabla N° 2. 11. Propiedades mecánicas del acero ASTM A607 GRADO 50**

Designación ASTM	Límite elástico (Mpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Alargamiento (%)	
			80 mm	5.55√So
<b>A607</b>	355	430 – 550	19	23

Fuente: [http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition\\_eu.php](http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition_eu.php) (s.f.)

Cabe precisar que, los largueros del chasis tienen la forma de “C”, como se puede ver el Figura N° 2.42. Las dimensiones de éste se presentan de la siguiente manera: el ancho de las alas es de 75 mm, la altura o alma es de 270 mm de largo, y el espesor es de 8 mm

**Figura N° 2. 40. Larguero del chasis**



Fuente: <http://www.alianzaflotillera.com/wp-content/uploads/Cesvi21.gif>

### 2.2.3.3.2. Acero ASTM A36 y acero ASTM A500

El acero ASTM A36 es un acero al carbono estructural, utilizado en la construcción de estructuras metálicas, puentes y torres de energía. El acero ASTM A36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: planchas, perfiles estructurales, tubos y láminas. Cabe precisar que, este acero es fácilmente unido por casi todos los procesos de soldadura. Por otro lado, el acero ASTM A500 es un acero al carbono laminado en caliente (LAC), Las secciones de fabricación del acero ASTM A500 son redondas, cuadradas y rectangulares.

En el ensamble de carrocerías, la estructura de alargamiento o voladizo y las placas en los que se asienta la plataforma se fabrican a partir del acero ASTM A36. En cambio, la estructura metálica de la carrocería en general, está formado por tubos de acero LAC de la calidad ASTM A 500 y también por perfiles y planchas de acero ASTM a 36. En la Tablas N° 2.12 se detalla la composición química de estos dos tipos de acero y en la Tabla N° 2.13 se describen sus propiedades mecánicas.

También es importante mencionar que para el forrado interior y exterior de la estructura metálica de la carrocería se utilizan bobinas y planchas galvanizadas.

**Tabla N° 2. 12 . Composición química del acero ASTM A 36 y del acero ASTM A500**

<b>Designación ASTM</b>	<b>Grado</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>C (%) (Máx.)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>P (%) (Máx.)</b>	<b>S (%) (Máx.)</b>	<b>Si (%)</b>
<b>A 36</b>	-	40 – 65	0.26	0.60 – 0.80	0.04	0.05	0.15 - 0.30
<b>A 500</b>	-	2	0,27	1.3	0.045	0.045	0.40

*Fuente: <http://www.sabimet.com/acero%20estruc%20construc.pdf> (s.f.)*

**Tabla N° 2. 13. Propiedades mecánicas del acero ASTM A 36 y del acero ASTM A500**

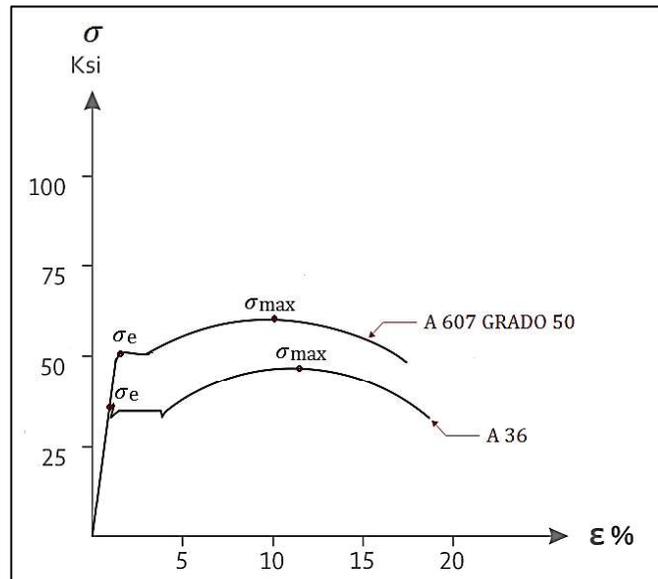
<b>Designación ASTM</b>	<b>Grado</b>	<b>Límite elástico (Mpa)</b>	<b>Resistencia a la tracción (Mpa)</b>	<b>Alargamiento (%)</b>	
				<b>8''</b>	<b>2''</b>
<b>A 36</b>	-	250	400 – 550	20	23
<b>A 500</b>	50	300	485 – 560		21

*Fuente: <http://www.sabimet.com/acero%20estruc%20construc.pdf> (s.f.)*

### 2.2.3.3.3. Diagrama Esfuerzo – Deformación del acero ASTM A607 grado 50 y del acero ASTM A36

En la figura N° 2.41 se muestra el diagrama esfuerzo – deformación tanto del acero ASTM A607 grado 50, como del acero ASMT A36.

**Figura N° 2. 41. Diagrama Esfuerzo – Deformación del acero ASTM A607 grado 50 y del acero ASTM A36**



Fuente: <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Informacion-general-acero> (s.f.)

Nótese en la Figura N° 2.41 que el límite elástico para el acero ASMT A36 es 36 ksi ( $\sigma_e = 36 \text{ ksi} = 250 \text{ MPa}$ ), mientras que, para el acero ASTM A607 grado 50 es 51 ksi ( $\sigma_e = 51 \text{ ksi} = 355 \text{ Mpa}$ ). Es importante señalar que, 1 ksi equivale a 6.89476 Mpa.

Por otro lado, el esfuerzo a la tracción para el acero ASTM A36 es 45 ksi ( $\sigma_{max} = 49 \text{ ksi} = 340 \text{ Mpa}$ ), y para el acero ASTM A607 grado 50 es 65 ksi ( $\sigma_e = 65 \text{ ksi} = 450 \text{ Mpa}$ ).

## **2.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL**

La soldabilidad del acero ASTM A607 grado 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW, en el alargue del chasis para el ensamble de carrocerías de buses, es excelente cuando se consideran las condiciones de soldabilidad.

### **2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

#### **2.3.2.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1**

El tipo de electrodo incide de una manera positiva en la soldabilidad del acero A607 grado 50 con el acero A36 por el proceso SMAW.

#### **2.3.2.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2**

La intensidad de corriente incide de una manera positiva y significativa en la soldabilidad del acero A607 grado 50 con el acero A36 por el proceso SMAW.

#### **2.3.2.3. HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3**

El ángulo de avance incide de una manera positiva en la soldabilidad del acero A607 grado 50 con el acero A36 por el proceso SMAW.

## **2.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**

### **2.4.1. VARIABLE DEPENDIENTE**

La variable dependiente es la *Soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASMT A36*, determinado a partir de las siguientes subvariables, ver la Tabla N° 2.14:

- Dureza de la ZAC
- Tenacidad al impacto
- Microestructura de la ZAC

**Tabla N° 2. 14. Subvariables dependientes**

<b>Subvariables dependientes</b>	<b>Indicador</b>
Dureza	HRC
Microestructura de a ZAC	Tamaño de grano
	Morfología
	Porcentaje de microconstituyentes
Tenacidad al impacto	Kg.m

Fuente: elaboración propia

#### 2.4.2. VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes se muestran en la tabla N° 2.15.

**Tabla N° 2. 15. Variables independientes**

<b>Variables independientes</b>	<b>Indicador</b>
Tipo de electrodo	EXXXX
Intensidad de corriente	Amperios
Angulo de avance del electrodo	Grados sexagesimales

Fuente: elaboración propia

#### 2.4.3. VARIABLES INTERVINIENTES

Las variables intervinientes se muestran en la tabla N° 2.16.

**Tabla N° 2. 16. Variables intervinientes**

<b>Variables intervinientes</b>	<b>Indicador</b>
Composición química del metal base	%
Humedad	Humedad relativa%

Fuente: elaboración propia

#### 2.4.4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

La operacionalización de variables del presente trabajo de investigación se muestra en la tabla N° 2.17.

**Tabla N° 2. 17. Operacionalización de variables**

<b>Tipo de Variable</b>	<b>Variable</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Rango</b>	<b>Técnica e instrumento de medición</b>
<b>INDEPENDIENTE</b>	Tipo de electrodo	Es un material que conduce electricidad y que también puede actuar como metal de soporte	Presenta una nomenclatura estándar formada por la letra E y cuatro dígitos		EXXXX	-	-
	Intensidad de corriente	Es el flujo de electrones que viajan mediante un conductor	Es el número de electrones que viajan a través de un material por unidad de tiempo		A	125 – 135	Amperímetro
	Ángulo de avance del electrodo	Posición de soldeo en dirección de avance	Es el ángulo con que se sostiene el electrodo durante la soldadura		o	10 – 20	Goniómetro
<b>DEPENDIENTE</b>	<b>SOLDABILIDAD</b>	La soldabilidad es la facilidad que presenta un metal para unirse por soldadura con otro de su misma naturaleza, produciendo una soldadura sana, de calidad y válida para el servicio	La soldabilidad busca conseguir la continuidad metálica de la unión, que presente las mismas propiedades del metal base, es decir, similar dureza, buena tenacidad, similar microestructura.	Dureza de la ZAC	HRC	25 - 40	Durómetro HRC
				Tenacidad al impacto	Kg.m	23 – 26	PENDULO DE CHARPY
				Microestructura de la ZAC	Tamaño de grano Morfología %microconstituyentes	N°7 - N°8 Acicular-equiaxial % ferrita - perlita	MICROSCOPIO METALOGRAFICO
<b>INTERV.</b>	Composición química del metal base	Naturaleza química de un material			%	-	MICROSCOPIO ELECTRÓNICO
	Humedad	Presencia de valor de agua en el aire			%		HIGROMETRO

Fuente: elaboración propia

## CAPITULO IV

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación del estudio es experimental, debido a que es de interés la aplicación de los conocimientos teóricos de la metalurgia de soldadura para poder determinar el nivel de soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36.

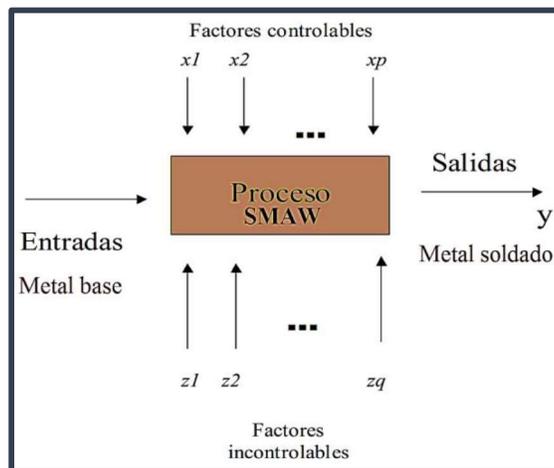
##### 3.1.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El grado de profundidad de la investigación es del tipo explicativo. De tal manera que se busca conocer las causas que afectan la soldabilidad de los aceros en estudio y también se pretende encontrar los factores más significativos que puedan garantizar una soldadura de calidad.

#### 3.2. SISTEMAS Y PROCESOS IDENTIFICADOS

El proceso de soldadura SMAW, es identificado como un proceso productivo, el cual se representa mediante la Figura N° 3.1.

**Figura N° 3. 1. Modelo general del proceso de soldadura SMAW**



*Fuente: Elaboración propia*

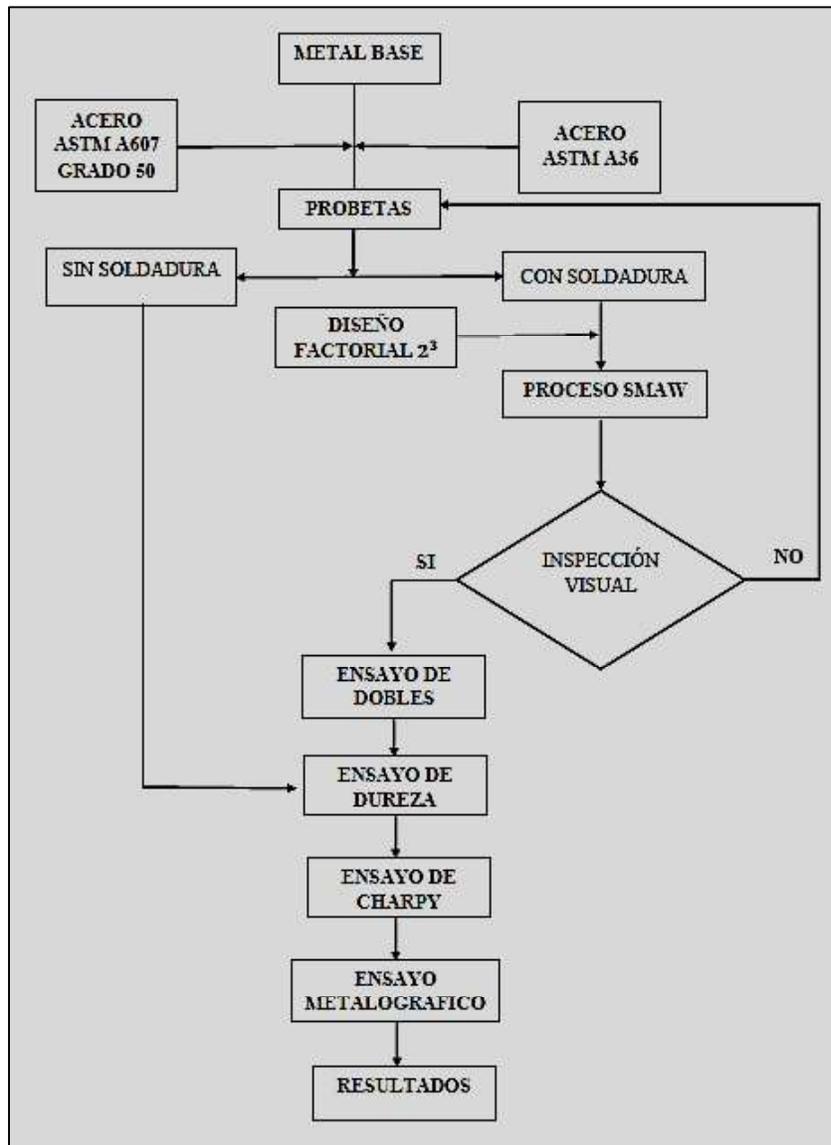
Nótese en la Figura N° 3.1 que mediante el proceso de soldadura SMAW se transforma las entradas (metal base) en salidas (metal soldado) que tienen una o más respuestas observables. Es preciso señalar que, el metal base es identificado como el sistema, puesto que en éste ocurren todos los fenómenos propios del proceso de soldadura. En ese sentido, para este estudio de investigación, el metal base está integrado por el acero ASTM A607 GRADO 50 y por el acero ASMT A36. En el proceso SMAW intervienen variables

controlables, así como otras que son incontrolables. Como variables controlables se tiene a: metal de aporte, intensidad de corriente, ángulo de inclinación del electrodo, longitud de arco, tipo de junta, posición de soldadura y velocidad de avance. De las cuales, se consideró como de mayor influencia a metal de aporte, intensidad de corriente y ángulo de inclinación del electrodo, mediante las cuales fue posible determinar el nivel de soldabilidad del metal base. Y como factores incontrolables se tiene a la composición química del metal base y a las condiciones del medio ambiente.

### 3.3. PROTOCOLO DE DESARROLLO DE EXPERIMENTOS

La Figura N° 3.2 muestra el protocolo que se siguió en la metodología experimental.

**Figura N° 3. 2. Protocolo de desarrollo de experimentos**



Fuente: elaboración propia

Nótese en la figura N° 3.2 que el metal base lo constituyen el acero ASTM A607 GRADO 50 y el acero ASTM A36, a partir del cual se prepararon las probetas. Luego, una parte de las probetas fueron llevadas a los ensayos de dureza, Charpy y metalográfico sin haber sido soldadas como referencia; y la otra parte pasan al planteamiento del diseño experimental para luego ser soldadas por el proceso SMAW y luego ser evaluadas visualmente y por los ensayos.

### 3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente trabajo de investigación se adoptó el diseño factorial de experimentos. Por lo cual se determinó la significancia relativa de las variables en estudio y de los modelos matemáticos empíricos. Eligiéndose el diseño factorial de 3 factores y 2 niveles

#### 3.4.1. ANÁLISIS Y NIVELES DE LAS VARIABLES

##### 3.4.1.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes, así como sus unidades y niveles que se utilizaron en la investigación se encuentran explicadas en la Tabla N° 3.1.

**Tabla N° 3. 1. Análisis y niveles de las variables independientes**

Orden	Variable	Unidad	Símbolo	Niveles	
				Mínimo	Máximo
<b>A</b>	Material de aporte	Código AWS	-	E 7018	E 8018
<b>B</b>	Intensidad de corriente	Amperios	(A)	125	135
<b>C</b>	Ángulo de inclinación del electrodo	Grados sexagesimales	(°)	10	20

Fuente: elaboración propia

Las variables observadas en la Tabla N° 4.1 fueron consideradas como las más influyentes y determinantes en la soldabilidad del acero A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36. Por las siguientes razones:

- **El material de aporte**, porque presenta una influencia metalúrgica importante debido principalmente a la composición química de su revestimiento. En ese sentido, el código de soldadura AWS/ ANSI D1.1 recomienda utilizar electrodos de bajo hidrógeno para aceros de mediano carbono y aceros de baja aleación. Es importante señalar que, los electrodos de bajo hidrogeno proporcionan un cordón exento de inclusiones de hidrógeno ni agrietamientos debajo del cordón. Por tanto, se eligió el

electrodo E 7018 y el electrodo E 8018-C3, conocidos como supecito y tenacito, respectivamente.

- **La intensidad de corriente**, porque influye directamente en el aporte térmico de la soldadura. El fabricante del material de aporte OERLIKON recomienda trabajar con un rango de amperaje entre 90 y 140 amperios, de acuerdo al tipo y diámetro de electrodo. Sin embargo, se consideró el espesor de la probeta de 5/16 de pulgada, para escoger como nivel mínimo 125 amperios y como máximo 135 amperios.
- Por otro lado, se escogió el **ángulo de inclinación del electrodo** como variable independiente, debido a su injerencia en la penetración y el golpe de fuerza del electrodo. De la misma forma, el código ANSI/ AWS D1.1 recomienda trabajar con ángulos entre 10 – 20 °, para posición vertical ascendente (3G).

Por último, es importante indicar que existen más variables dentro del proceso SMAW que pueden ser manipuladas, sin embargo se consideró que presentan una influencia menor, o en todo caso dependen de las variables antes descritas. Todas estas variables serán aclaradas más adelante, en el PQR (registro de calificación de procedimiento) con el cual se respaldó el procedimiento de soldadura.

#### **3.4.1.2. VARIABLE DEPENDIENTE**

La variable dependiente es la **soldabilidad** del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36.

Sin embargo, no habiendo un instrumento que mida la soldabilidad de un acero, se recurrió a subvariables, tal es el caso del índice de dureza del ZAC, comportamiento a la prueba de dobles, de impacto y al análisis metalográfico, a partir de los cuales se pudo determinar el nivel de soldabilidad de los aceros en estudio.

#### **3.4.2. DISEÑO FACTORIAL 2<sup>3</sup> CON DOS RÉPLICAS**

Con el diseño de experimentos se estudió el efecto del material de aporte (A), intensidad de corriente (B) y ángulo de inclinación del electrodo (C), sobre la dureza Rockwell C del cordón de soldadura. Siendo la dureza una subvariable de la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36, que se expresa de manera cuantitativa.

Para ello se decidió correr un experimento factorial 2<sup>3</sup> con dos replicas. Es decir, se estudian tres factores en dos niveles cada uno, haciendo  $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$  tratamientos diferentes, a

parte, de la réplica. Se entiende por replica a correr más de una vez un mismo tratamiento o combinación de factores.

Los niveles de prueba de cada factor, tanto en unidades originales como en unidades codificadas se muestran en la Tabla N° 3.2.

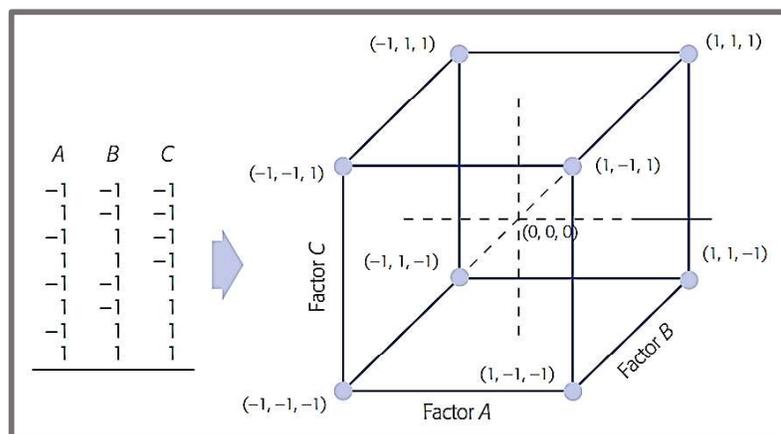
**Tabla N° 3. 2. Niveles de prueba de los factores del diseño experimental**

Factor	Unidades originales		Unidades codificadas	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto
<b>A: Material de aporte</b>	E 7018	E 8018	-	+
<b>B: Intensidad de corriente</b>	125 A	135 A	-	+
<b>C: Ángulo de inclinación del electrodo</b>	10°	20°	-	+

Fuente: elaboración propia

En ese sentido, los tratamientos del diseño  $2^3$  y su representación geométrica se muestran en la Figura N° 3.3. La región experimental es un cubo regular centrado en el origen (0, 0, 0), cuyos vértices son los ocho tratamientos.

**Figura N° 3. 3. Diseño factorial  $2^3$  y su representación geométrica**



Fuente: Gutiérrez y De la Vara, 2008: 184

Nótese que, “la matriz de diseño se construyó alternando el signo menos y el signo más en la primera columna, dos menos y dos más en la segunda columna, y cuatro menos y cuatro más en la tercera; el diseño resulta acomodado en el orden estándar o de Yates” (Gutiérrez & De la Vara, 2008, pág. 183). Con este diseño se pudo estudiar  $2^3 - 1 = 7$  efectos: tres efectos principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC. El interés se enfocó en estudiar los efectos principales y las interacciones dobles.

Por último es importante indicar que, aunque el diseño factorial  $2^3$  consista en ocho tratamientos, se realizó dos replicas, con el cual se desarrolló en total 16 tratamientos (incluido las réplicas), esto con la finalidad de conseguir un análisis del anova que se verá en el capítulo 5.

En ese sentido, el planteamiento del diseño factorial  $2^3$  con dos replicas es la que muestra en la tabla N° 3.3, a partir del cual se ejecutara el proceso de soldadura. Es importante señalar, que el orden en base a esta tabla se siguió el orden de experimentos.

**Tabla N° 3.3. Planteamiento del diseño factorial  $2^3$  con dos replicas (orden de las pruebas experimentales)**

Replica	N° Prueba	Factores						Respuesta
		Escala codificada			Escala decodificada			Dureza HRC (subvariable de la soldabilidad)
		A	B	C	Electrodo (AWS)	Amperaje (A)	Ángulo de inclinación del electrodo (°)	
1	01	-	-	-	E 7018	125	10	Y <sub>11</sub>
	02	+	-	-	E 8018	125	10	Y <sub>21</sub>
	03	-	+	-	E 7018	135	10	Y <sub>31</sub>
	04	+	+	-	E 8018	135	10	Y <sub>41</sub>
	05	-	-	+	E 7018	125	20	Y <sub>51</sub>
	06	+	-	+	E 8018	125	20	Y <sub>61</sub>
	07	-	+	+	E 7018	135	20	Y <sub>71</sub>
	08	+	+	+	E 8018	135	20	Y <sub>81</sub>
2	09	-	-	-	E 7018	125	10	Y <sub>12</sub>
	10	+	-	-	E 8018	125	10	Y <sub>22</sub>
	11	-	+	-	E 7018	135	10	Y <sub>32</sub>
	12	+	+	-	E 8018	135	10	Y <sub>42</sub>
	13	-	-	+	E 7018	125	20	Y <sub>52</sub>
	14	+	-	+	E 8018	125	20	Y <sub>62</sub>
	15	-	+	+	E 7018	135	20	Y <sub>72</sub>
	16	+	+	+	E 8018	135	20	Y <sub>82</sub>

Fuente: elaboración propia

### 3.5. EQUIPAMIENTO E INSTRUMENTACIÓN

Para el desarrollo de la parte experimental y para los ensayos mecánicos se emplearon los siguientes equipos: máquina de soldar eléctrica; durómetro Rockwell; equipo de dobles de probetas; péndulo Charpy; desbastador, pulidor y microscopio metalográfico. Cabe indicar que, también se utilizaron instrumentos de medición en desarrollo antes, durante y después del proceso de soldadura, así como otras herramientas menores.

#### 3.5.1. MÁQUINA DE SOLDAR ELÉCTRICA

Se usó una máquina de soldar de la marca Miller para todo el proceso de soldadura de las probetas, en la Tabla N° 3.4 se detallan sus características técnicas.

**Tabla N° 3. 4. Características técnicas de la máquina de soldar eléctrica**

Imagen	Característica	Valor
	Modelo	Miller XMT 425 VS
	Tipo de corriente	Corriente continua (DC)
	Tensión de red (50-60Hz)	208/460V/3Fs
	Rango de Voltaje (V)	10 – 38
	Rango de corriente (A)	5 – 425
	Dimensiones (l.×an.×al.) (mm)	610×318×432
	Peso (Kg)	36.3
	Diámetro de electrodos utilizables (mm)	1,6 – 4

Fuente: elaboración propia

#### 3.5.2. DURÓMETRO ROCKWELL

Se empleó un durómetro Rockwell de marca MITUTOYO el cual nos facilitó el instituto superior SENATI, en la tabla N° 3.5 se detallan sus características técnicas.

**Tabla N° 3. 5. Características técnicas del equipo del durómetro Rockwell**

Imagen	Característica	Valor
	Marca	MITUTOYO
	Modelo	RB – I
	Serie	220257
	Altura máxima de prueba (mm)	210
	Dimensiones de la base del aparato (mm)	452 × 180
	Peso del durómetro (Kg)	100
	Peso de los accesorios (Kg)	17

Fuente: elaboración propia

### 3.5.3. EQUIPO DE DOBLES DE PROBETAS

Se empleó el equipo de dobles de la empresa SEM INGENIEROS E.I.R.L., ubicado en Av. República de Perú s/n, Cusco. En la Tabla N° 3.6 se describen sus características.

**Tabla N° 3. 6. Características técnicas del equipo de dobles**

Imagen	Característica	Valor
	Modelo	Diseño propio
	Tipo	Guiado
	Potencia del motor (HP)	12.5
	Fases	Tres
	Presión (PSI)	250
	Norma	UNE EN ISO 7438
	Separación entre apoyos (mm)	78

Fuente: elaboración propia

### 3.5.4. PÉNDULO DE CHARPY

De la misma forma se utilizó el péndulo Charpy en la empresa SEM INGENIEROS E.I.R.L. para las pruebas de impactos, en la Tabla N° 3.7 se describen sus características.

**Tabla N° 3. 7. Características técnicas del péndulo de Charpy**

Imagen	Característica	Valor
	Modelo	XJJ – 5
	Norma	ASTM E-23
	Velocidad (m/s)	4.11 – 8
	Ángulo $\alpha$ (°)	62.13
	Peso del martillo (lb)	36.24
	Peso de la barra (lb)	4.62
	Longitud del brazo (mm)	1200

Fuente: elaboración propia

### 3.5.5. DESBASTADOR METALGRÁFICO

Se empleó dos desbastadores de plato para la preparación de probetas en el ensayo metalográfico, ver la Tabla N° 3.8. Cabe indicar que, la desbastadora 1 se encargó del desbaste primario, mientras que el desbastador 2 lograba el desbaste final.

**Tabla N° 3. 8. Características técnicas del desbastador metalográfico**

Imagen	Característica	Valor
	Especificación	Desbastadora de dos platos
	Diámetro de plato (mm)	240
	Velocidad (rpm)	450
	Motor	370 W
	Conexión	220 V, C.A. 50 Hz
	Dimensiones externas (mm)	700×630×320

Fuente: elaboración propia

### 3.5.6. PULIDOR METALGRÁFICO

Se empleó un pulidor de plato el pulido de probetas durante el ensayo metalográfico, de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica, en la UNSAAC, ver la Tabla N° 3.9.

**Tabla N° 3. 9. Características técnicas del pulidor metalográfico**

Imagen	Característica	Valor
	Especificación	Pulidor metalográfico
	Tipo	De plato
	Diámetro de plato (mm)	290
	Velocidad (rpm)	600
	Motor	400 W
	Conexión	220 V, C.A., 50Hz
	Dimensiones externas (mm)	650×500×280

Fuente: elaboración propia

### 3.5.7. MICROSCOPIO ÓPTICO

Se empleó un microscopio óptico de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica, en la UNSAAC, en la Tabla N° 3.10 se describen sus características.

**Tabla N° 3. 10. Características técnicas del microscopio óptico**

Imagen	Característica	Valor
	Especificación	Microscopio PETIP
	Aumento	De 100 a 1000
	Alimentación	220V, C.A./ 50 Hz
	Ajuste micrométrico y macrométrico	Mediante perillas
	Mesa	Fija
	Portaobjetos	Con sistema de enganche y presión

Fuente: elaboración propia

### 3.5.8. HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS

Por otro lado, se emplearon herramientas e instrumentos de medición que se utilizaron en la parte experimental, en la Tabla N° 3.11 se enlistan y se detallan sus características.

**Tabla N° 3. 11. Características técnicas de herramientas e instrumentos**

Herramienta o instrumento	Tamaño o capacidad	Marca	Potencia (W)	Aplicación
Amoladora	7 pulg.	Dewalt	2000	Desbaste de bisel
Flexómetro	5 m	Stanley	-	Medición
Goniómetro	0 – 180 °	Tools	-	Medición de ángulo
Escuadra de tacón	12 pulg.	Stanley	-	Trazar
Vernier	12 pulg.	Mitutoyo	-	Medición
Escobilla de acero	4C 16 hilos	Aceros	-	Limpieza
Piqueta martillo	-	Arequipa	-	entrepasadas
Tornillo de banco	-	Weld500	-	Limpieza de escoria
	8 pulg.	Stanley	-	Sujeción de probetas

Fuente: elaboración propia

### 3.6. MATERIALES DE LA INVESTIGACION

Para el logro de los objetivos del presente estudio se tuvo como materiales de investigación al material o metal base y al metal de aporte.

#### 3.6.1. MATERIAL BASE

El metal base lo constituyen el **acero ASTM A607 GRADO 50** y el **acero ASTM A36**.

El acero ASTM A607 grado 50 se obtuvo a partir de un restante de chasis para bus de la marca Volvo, modelo B270F, ver en Anexo B su ficha técnica. Este sobrante se obtuvo por colaboración de la empresa INTRAMET S.R.L., ver la figura N° 3.4.

**Figura N° 3. 4. Sobrantes de chasis.**



Fuente: [Fotografías de Alex Yucra] (Área de ensamblaje de la empresa INTRAMET S.R.L., 2019)

Para el caso del acero ASTM A 36, por ser un acero comercial este se obtuvo a partir de planchas de 5/16 pulg. (8mm) de espesor (espesor del chasis) adquiridas y preparadas a la dimensión del chasis en una tienda comercializadora de aceros, ver la figura N° 3.5.

**Figura N° 3. 5. Planchas de 5/16 de acero ASTM A36**



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Tienda comercializadora de aceros en Cusco., 2019)

### 3.6.1.1. Análisis químico

Para el análisis químico se determinó el carbono equivalente (CE), a partir de su composición química y de la ecuación 2.6, del marco teórico. En la Tabla N° 3.12 se detalla la composición química del acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36.

**Tabla N° 3. 12. Composición química del acero ASTM A607 y del acero ASTM A36**

Designación	C (%) Máx.	Mn (%) Máx.	P (%) Máx.	S (%) Máx.	Si (%) Máx.	V (%) Máx.	Nb (%) Máx.	Ti (%) Máx.	Al (%) Máx.
<b>ASTM A607 GRADO 50</b>	0.12	1.5	0.025	0.02	0.5	0.2	0.09	0.15	0.015
<b>ASTM A36</b>	0.26	0.80	0.04	0.05	0.30	-	-	-	-

Fuente: [http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition\\_eu.php](http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition_eu.php) (s.f.)

De la Tabla N° 3.12 se observa que no se cuenta con información del porcentaje de los siguientes elementos: cromo (Cr), molibdeno (Mo), níquel (Ni) ni cobre (Cu), necesarios en la ecuación 2.6, por lo que se empleó la siguiente ecuación para hallar el CE

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} \quad [ec. 3.1]$$

### Determinación del carbono equivalente (CE) del acero DIN S355MC

Con la información de la Tabla N° 3.12 y con la ecuación 3.1 se determinó el CE del acero ASMT A607 GRADO 50:

$$CE = 0.12 + \frac{1.5 + 0.5}{6} = 0.12 + 0.33 = 0.45$$

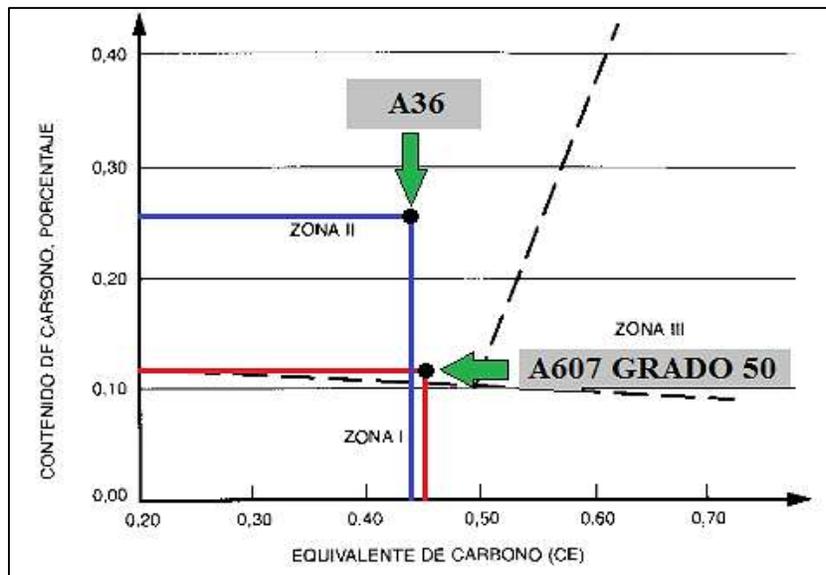
### Determinación del carbono equivalente (CE) del acero ASTM A36

De la misma forma, para el acero ASTM A36 se calculó el CE con la información de la Tabla N° 3.1 y con la ecuación 3.1

$$CE = 0.26 + \frac{0.80 + 0.3}{6} = 0.17 + 0.14 = 0.44$$

De acuerdo al CE de cada acero, se ubicó en el diagrama de Graville, ver la figura N° 3.6.

**Figura N° 3. 6. Diagrama de Graville para el CE del acero A607 GRADO 50 y del acero A36**



Fuente: elaboración propia

El CE hallado para ambos aceros se ubica en la zona 2 del diagrama de Gravilla. Esto quiere decir que es necesario un control de dureza para determinar una entrada mínima de calor.

En este caso según el CE calculado indica que tanto el acero A36 y el acero A607 grado 50 presentan una buena a mediana soldabilidad. Sin embargo, para el caso del acero A607 grado 50 este presenta elementos de aleación como el vanadio, titanio y aluminio, que no fueron considerados para el cálculo del CE. Motivo por el cual es necesario el estudio de su soldabilidad.

### 3.6.1.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades del acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36 se presentan en la tabla N° 3.13.

**Tabla N° 3. 13. Propiedades mecánicas del acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36**

Designación	Límite elástico (Mpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Alargamiento (%)	
			80 mm	$5.55\sqrt{So}$
<b>A607 GRADO 50</b>	355	430 – 550	19	23
<b>A36</b>	250	400 – 550	20	23

Fuente: [http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition\\_eu.php](http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition_eu.php) (s.f.)

En la Tabla N° 3.13 se observa que el acero A607 GRADO 50 presenta un alto límite elástico de 355 Mpa, en comparación del acero ASTM A36 que tiene un límite elástico de 250 Mpa, esta diferencia se debe principalmente a los elementos de aleación que están presentes en el acero A607 GRADO 50.

### 3.6.2. MATERIAL DE APORTE

Como material de aporte se empleó el electrodo E6011 para el pase raíz, y los electrodos E7018 y E8018 para el relleno y acabado. Cabe señalar que, se utilizaron electrodos de la marca Soldexa, en la Tabla N° 3.14 se detallan sus propiedades químicas, y en la tabla N° 3.15 se presenta sus propiedades mecánicas, ver Anexo C.

**Tabla N° 3. 14. Propiedades químicas de los electrodos E6011, E7018 y E8018**

Clasificación AWS A5.5	Análisis químico (%)							
	C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr
<b>E6011</b>	0.06	0.45	0.25	Máx. 0.03	Máx. 0.025	-	-	-
<b>E7018</b>	0.05	1.00	0.60	Máx. 0.02	Máx. 0.02	-	-	-
<b>E8018-C3</b>	0.06	1.20	0.30	Máx. 0.02	Máx. 0.02	0.10	1.10	0.05

Fuente: OERLIKON, 2001: 152,160 y 165

**Tabla N° 3. 15. Propiedades mecánicas de los electrodos E6011, E7018 y E8018**

Clasificación AWS A5.5	Resistencia a la tracción (Mpa)	Límite de Fluencia (Mpa)	Elongación en 2'' (%)
<b>E6011</b>	472	397	24
<b>E7018</b>	520 – 610	Mín. 400	Mín. 23
<b>E8018-C3</b>	560 – 650	Mín. 470	Mín. 24

Fuente: OERLIKON, 2001: 152,160 y 165

Por otro lado, en la tabla N° 3.16 se detalla las características del metal de aporte.

**Tabla N° 3. 16. Características de soldeo de los electrodos E6011, E7018 y E8018**

Clasificación AWS A5.5	Almacenamiento en horno (°C)	Posiciones de soldadura	Amperaje recomendado	
			Diámetro del electrodo (pulgadas)	
			3/32	1/8
<b>E6011</b>	-	Todas	50 – 80	80 – 110
<b>E7018</b>	125 – 150	Todas	60 – 90	90 – 140
<b>E8018-C3</b>	125 – 150	Todas	60 – 100	90 – 140

Fuente: OERLIKON, 2001: 152,160 y 165

Cabe señalar que, todos los electrodos con los que se desarrolló la parte experimental tuvieron un *diámetro de 1/8 de pulgada (3mm)*.

### 3.7. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.7.1. POBLACIÓN

Se tiene la siguiente población:

- Acero de alta resistencia y baja aleación, ASTM A607 GRADO 50, a partir de chasis para bus.
- Acero al bajo carbono, ASTM A36

#### 3.7.2. MUESTRA

Se tiene las siguientes muestras:

- Dieciséis probetas de acero ASTM A607 GRADO 50, cuyas medidas son las siguientes: ancho de 100 mm, alas del chasis de 85 mm, alma del chasis de 275 mm y espesor de 8 mm, ver anexo E.
- Dieciséis probetas de acero ASTM A36, con las mismas medidas de las probetas del chasis.

### 3.8. PROCEDIMIENTO DE LA SOLDADURA

#### 3.8.1. REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO (PQR)

El registro de calificación de procedimiento (PQR) permite alcanzar soldaduras de alta sanidad en forma coherente. Con base en el PQR N° 1 y N° 2, ver ANEXO D, se establecieron los procedimientos de soldadura para los electrodos E 7018 y E8018, respectivamente.

### 3.8.1.1. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PARA EL ELECTRODO E 7018

El procedimiento de soldadura aplicado al electrodo E7018, para el desarrollo experimental, se muestra en la Tabla N° 3.17.

**Tabla N° 3. 17. Procedimiento de soldadura para el electrodo E7018**

<b>Código aplicado:</b>	<b>ANSI/ AWS D1.1 CÓDIGO DE SOLDADURA ESTRUCTURAL – ACERO</b>		
<b><i>Metal base</i></b>			
Especificación del material base:	ASTM A607 GRADO 50		
	ASTM A36		
Espesor de probeta:	5/16 pulgada (8 mm)		
Detalles de la junta			
<b><i>Tipo de junta:</i></b>	Junta a tope de ranura en V con CJP		
Ángulo de la ranura:	60°		
Abertura de raíz:	1/8 pulgada (3 mm)		
Talón de raíz:	2 mm		
<b><i>Proceso</i></b>			
Pasadas de soldadura:	1	2	3
Posición:	3G	3G	3G
Progresión vertical:	Si	Si	Si
<b><i>Metal de aporte</i></b>			
Clasificación AWS:	E 6011	E 7018	E7018
Diámetro:	1/8 pulgada	1/8 pulgada	1/8 pulgada
Fabricación:	OERLIKON	OERLIKON	OERLIKON
<b><i>Características eléctricas</i></b>			
Polaridad y tipo de corriente:	DCEP	DCEP	DCEP
Amperios:	80	125-135	125-135
Voltios:	20-23	20-23	20-23
<b><i>Técnica</i></b>			
Cordón recto u oscilado:	Recto	Oscilado	Oscilado
Pasada única o múltiple	Múltiple	Múltiple	Múltiple
Numero de electrodos:	3	3	2
Limpieza entrepasadas:	Esmerilado	Cepillo de alambre	Cepillo de alambre

Fuente: elaboración propia

### 3.8.1.2. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PARA EL ELECTRODO E 8018

Por su parte, el procedimiento de soldadura aplicado al electrodo E8018 se muestra en la Tabla N° 3.18.

**Tabla N° 3. 18. Procedimiento de soldadura para el electrodo E8018**

<b>Código aplicado:</b>	<b>ANSI/ AWS D1.1 CÓDIGO DE SOLDADURA ESTRUCTURAL – ACERO</b>		
<b><i>Metal base</i></b>			
Especificación del material base:	ASTM A607 GRADO 50		
	ASTM A36		
Espesor de probeta:	5/16 pulgada (8 mm)		
Detalles de la junta			
<b><i>Tipo de junta:</i></b>	Junta a tope de ranura en V con CJP		
Ángulo de la ranura:	60°		
Abertura de raíz:	1/8 pulgada (3 mm)		
Talón de raíz:	2 mm		
<b><i>Proceso</i></b>			
Pasadas de soldadura:	1	2	3
Posición:	3G	3G	3G
Progresión vertical:	Si	Si	Si
<b><i>Metal de aporte</i></b>			
Clasificación AWS:	E 6011	E 8018	E8018
Diámetro:	1/8 pulgada	1/8 pulgada	1/8 pulgada
Fabricación:	OERLIKON	OERLIKON	OERLIKON
<b><i>Características eléctricas</i></b>			
Polaridad y tipo de corriente:	DCEP	DCEP	DCEP
Amperios:	80	125-135	125-135
Voltios:	20-23	20-23	20-23
<b><i>Técnica</i></b>			
Cordón recto u oscilado:	Recto	Oscilado	Oscilado
Pasada única o múltiple	Múltiple	Múltiple	Múltiple
Numero de electrodos:	3	3	2
Limpieza entrepasadas:	Esmerilado	Cepillo de alambre	Cepillo de alambre

Fuente: elaboración propia

Es necesario recalcar que, el desarrollo de variables de los procedimientos antes descritos se logró mediante el registro de calificación de procedimientos (PQR), con base en el código de soldadura ANSI/ AWS D1.1, ver Anexo D, cuyo objetivo final fue lograr una microestructura del depósito de soldadura y de la ZAC que conserven las propiedades mecánicas y metalúrgicas del acero ASTM A607 GRADO 50, así como del acero ASTM A36.

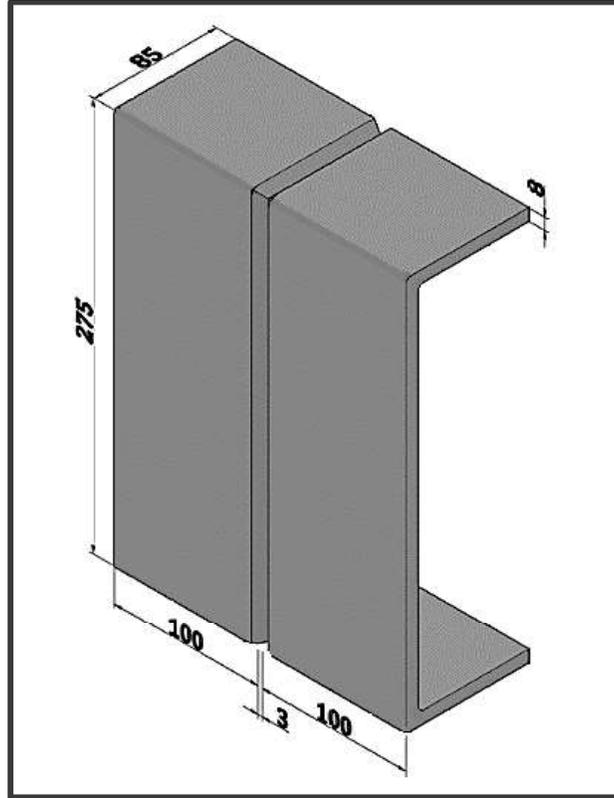
Es importante mencionar que, la posición 3G de las pasadas fue ejecutada por un soldador con homologación 3G.

### 3.8.2. PREPARACIÓN DE LA JUNTA DE SOLDADURA

#### 3.8.2.1. DIMENSIONES DE LA JUNTA DE SOLDADURA

Las dimensiones en milímetros de la junta o cupón de soldadura se muestran en la figura N° 3.7 (ver ANEXO E)

Figura N° 3. 7. Dimensiones de la junta de soldadura

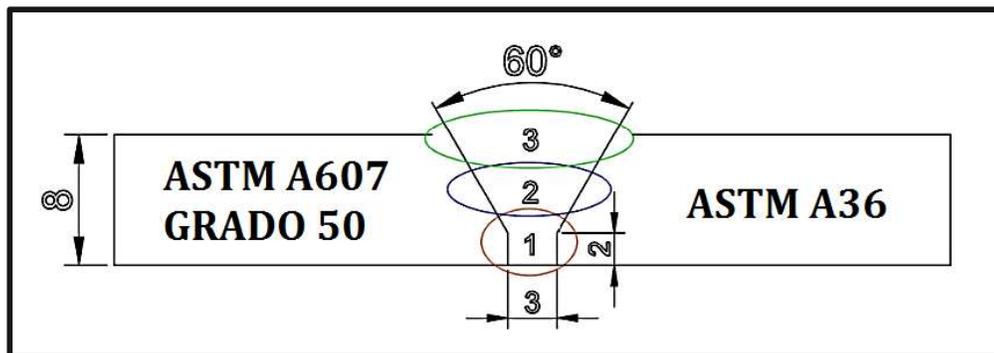


Fuente: elaboración propia

#### 3.8.2.2. CONFIGURACIÓN DE LA JUNTA

La configuración de la junta de soldadura en milímetros se muestra en la figura N° 3.8.

Figura N° 3. 8. Configuración de la junta soldadura



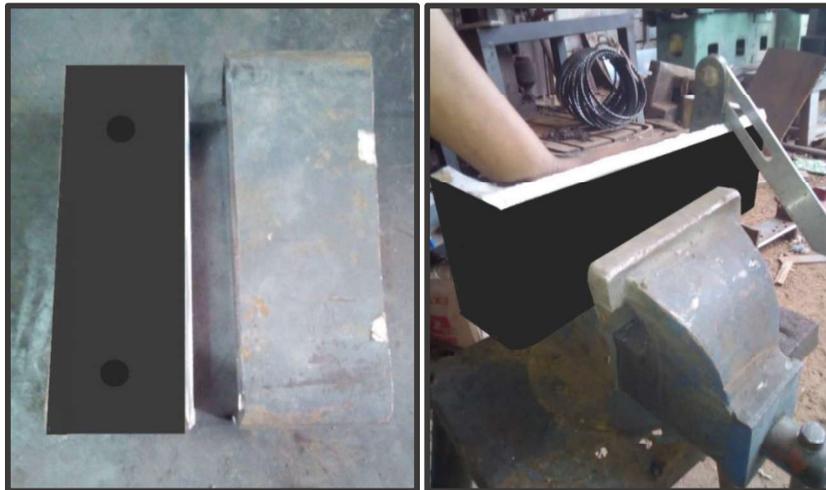
Fuente: elaboración propia

### 3.8.2.3. BISELADO DE LAS PROBETAS DE SOLDADURA

La preparación de probetas se realizó en función a los requerimientos de las pruebas mecánicas a las que serán sometidas luego del proceso de soldadura. Las probetas de acero ASTM A607 GRADO 50 se seccionaron a partir del sobrante de chasis dentro de las instalaciones de la empresa INTRAMET S.R.L. Mientras que las probetas de acero ASTM A36 se obtuvieron a partir de planchas de acero de 5/16 pulgada de espesor, que fueron dobladas y cortadas en la tienda comercializadora de aceros. En la figura N° 3.9 se muestra las probeta de acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero A36.

En ese sentido, para realizar el biselado de las probetas se empleó una amoladora con disco de desbaste, con la finalidad de alcanzar 30° por probeta, como se observa en la figura N° 3.9. De tal forma que, los dos miembros del metal base formen una junta de ranura en V, con un ángulo de 60°. Cabe señalar que, el control del ángulo se realizó mediante un goniómetro.

**Figura N° 3. 9. Biselado de las probetas del acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Taller de estructuras metálicas en la Av. Tomasa Tito Contemayta, Cusco, 2019)*

### 3.8.2.4. ENSAMBLE DE LA JUNTA DE SOLDADURA

Las probetas se instalaron sobre una plancha de acero de 1/2 de pulgada de espesor, esto con la finalidad de mantener el alineamiento de las partes de la probeta o cupón de soldadura. Para fijar la abertura de la raíz se empleó el núcleo de un electrodo de 1/8 de pulgada, como se observa en la Figura N° 3.10, luego se apuntalo en la esquina superior e inferior. También, se hizo un pequeño cordón en el ala superior e inferior de la probeta con la finalidad de evitar la distorsión al momento de realizar el proceso de soldadura.

**Figura N° 3. 10. Ensamble de la junta de soldadura**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Taller de estructuras metálicas en la Av. Tomasa Tito Contemayta, Cusco, 2019)*

Es importante señalar que, se verificó en todo momento la uniformidad de la abertura de raíz para facilitar la fusión del pase de raíz y para asegurar el aporte térmico constante.

### **3.8.3. PROCESO DE SOLDEO**

El proceso de soldeo consta de tres etapas: **pase raíz, relleno y acabado**, las cuales se describirán a continuación. Cabe señalar que, para todo el proceso de soldadura se contrató a un soldador con homologación 3G (posición vertical ascendente), y que en cada etapa se tomaron los datos respectivos.

#### **3.8.3.1. PASE RAÍZ**

El pase raíz es la etapa más importante en una unión soldada, debido a que influye en la resistencia final de la unión a las condiciones de servicio. A través del pase raíz es posible mantener las propiedades mecánicas y metalúrgicas del metal base, así como mantener el perfil y morfología superficial correctos.

En ese sentido, el proceso operacional del pase raíz que se aplicó a todas las probetas de soldadura se describe de la siguiente forma:

- Se colocó el cupón de soldadura en la posición 3G, fijándolo en el tornillo de banco.
- Se ajustó la intensidad de corriente del equipo de soldadura a 80 amperios y seleccionar el electrodo **E 6011** en condiciones adecuadas.
- Se inició el proceso de soldadura en posición vertical ascendente (3G), como se observa en la figura N° 3.15. Cabe señalar que, se iba regulando ligeramente el amperaje al momento de soldar a solicitud del soldador. Esta variación iba en la intensidad de corriente era 75 a 80 amperios.

- Los empalmes al cordón del pase raíz se realizaron esmerilando la terminación con amoladora con disco de 1/8 de pulgada, como se observa en la figura N° 3.11.

**Figura N° 3. 11. Inicio de soldadura en 3G y esmerilado del empalme del cordón**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Taller de estructuras metálicas en la Av. Tomasa Tito Contemayta, Cusco, 2019)*

- Durante la aplicación del cordón se controló la altura, ancho y uniformidad de la penetración de la raíz.
- Una vez terminada el pase raíz en su totalidad se procedió a la limpieza y esmerilado, para la siguiente etapa, como se observa en la figura N° 3.12.

**Figura N° 3. 12. Esmerilado del cordón**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Taller de estructuras metálicas en la Av. Tomasa Tito Contemayta, Cusco, 2019)*

### 3.8.3.2. PASE DE RELLENO

Para el pase de relleno y el pase de acabado se emplearon los electrodos E7018 y E8018, los cuales por ser electrodos de bajo hidrogeno, necesitan protección contra la humedad.

En ese sentido, se procedió a ejecutar el pase de relleno de la siguiente forma:

- Se revisó detenidamente la ranura del bisel, antes de proceder con la soldadura.
- Se seleccionó el material de aporte según el orden del diseño de experimentos, entre el electrodo E7018 y el electrodo E8018
- Se ajustó el amperaje de la máquina de soldar, según el orden del diseño factorial, entre 125 y 135 amperios. De la misma forma, se indicó al soldador para que trabaje a cierto ángulo de inclinación del electrodo, según el orden del diseño factorial, entre 80° y 70°.
- Se procedió a la soldadura del pase de relleno en la posición 3G.
- Los empalmes del cordón de relleno se realizaron lo más rápido posible, no se permitió el uso de amoladora con disco, sino solo se utilizó la piqueta para limpiar, como se muestra en la figura N° 3.13.
- Durante la aplicación del cordón de relleno se controló la altura ancho y profundidad.

**Figura N° 3. 13. Cordón del pase relleno**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Taller de estructuras metálicas en la Av. Tomasa Tito Contemayta, Cusco, 2019)*

- La oscilación del electrodo fue en media luna positiva.
- Cuando se terminó el pase de relleno en su totalidad, se procedió a la limpieza usando la amoladora con el cepillo de alambre de copa, como se ve en la figura N° 3.13.

### 3.8.3.3. PASE DE ACABADO

De igual forma, la ejecución del pase de acabado se procedió de la siguiente manera:

- Antes de empezar con el pase relleno se revisó el contorno del pase de relleno
- Se seleccionó el material de aporte en función al planteamiento del diseño de experimentos, entre el electrodo E7018 y el electrodo E8018.
- Se ajustó el amperaje de la máquina de soldar, según el orden del diseño factorial, entre 125 y 135 amperios. De la misma forma, se indicó al soldador para que trabaje a cierto ángulo de inclinación del electrodo, según el orden del diseño factorial, entre 80° y 70°.
- Se procedió a la soldadura del pase de acabado en la posición 3G.
- El cordón del pase de acabado se aplicó fundiendo el área comprendida entre los biseles, apuntando con el electrodo el borde del bisel, y de esta forma se controló el ancho del pase de acabado, como se observa en la Figura N° 3.14.
- Cuando se terminó el pase de acabado en su totalidad, se dejó enfriar el cordón lentamente y luego procedió a la limpieza usando la amoladora con el cepillo de alambre de copa, como se ve en la figura N° 3.14.

**Figura N° 3. 14. Cordón del pase de acabado**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Taller de estructuras metálicas en la Av. Tomasa Tito Contemayta, Cusco, 2019)*

## 3.9. TÉCNICAS DE RECOLECCION DE DATOS PARA LA INVESTIGACIÓN

### 3.9.1. INSPECCION VISUAL

La inspección visual se realizó en función a los criterios del código de soldadura estructural ANSI/ AWS D1.1, clausula 4.9.1, ver la figura N° 3.15.

**Figura N° 3. 15. Probetas soldadas**



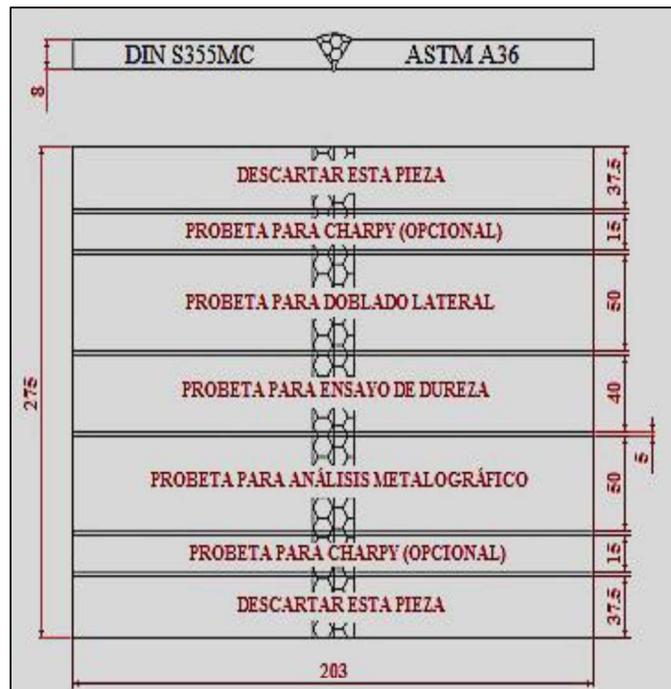
Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Empresa SEM Ingenieros E.I.R.L., Cusco, 2019)

Nótese en la figura N° 3.15 que la inspección visual se realizó tanto al pase de raíz como al pase de acabado, esto de con la finalidad de encontrar defectos, sobre todo en los empalmes. Todos los resultados y su aceptación se incluyeron en el registro de calificación de procedimiento (PQR), ver Anexos D, a partir del cual se afirma que todas las probetas pasaron la inspección visual, se trata con mayor detalle en el capítulo 4.

### **DISTRIBUCIÓN DE LOS CUPONES PARA LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

La distribución de los cupones para los ensayos destructivos se detallan en la figura N° 3.16

**Figura N° 3. 16. Ubicación y dimensiones de las probetas para los ensayos**

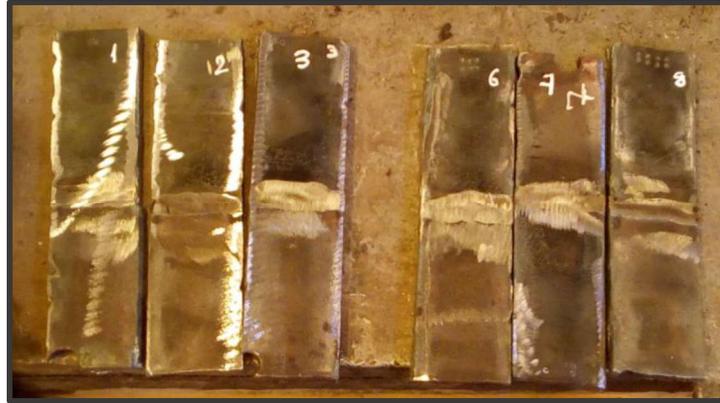


Fuente: elaboración propia

### 3.9.2. ENSAYO DE DOBLES

El ensayo de dobles se realizó con la finalidad de determinar el grado de solidez y ductilidad en una forma cualitativa de las uniones soldadas. En ese sentido, se prepararon 16 probetas de dimensiones 50mm×203mm×8mm (ancho×longitud×espesor), ver figura N° 3.17.

**Figura N° 3. 17. Preparación de probetas para el ensayo de dobles**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Empresa SEM Ingenieros E.I.R.L. en la Av. Republica de Perú, Cusco, 2019)*

Se realizó el doblado de la raíz, puesto que es ahí donde se verifica la resistencia de la junta de soldadura cuando es sometido a las condiciones normales de servicio. En ese sentido, se colocaron las probetas con la raíz de la soldadura hacia la abertura de la matriz del plantilla guía, ver la figura N° 3.18. Es preciso indicar que la diámetro de la plantilla guía es 100 mm.

**Figura N° 3. 18. Matriz de plantilla guía y doblado de las probetas**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Empresa SEM Ingenieros E.I.R.L. en la Av. Republica de Perú, Cusco, 2019)*

Finalmente, las probetas adoptaron la forma en un U de la plantilla guía, ver figura N° 3.19. En seguida, se juntó todas probetas y el ingeniero procedió a analizar el comportamiento de la soldadura frente a este ensayo.

**Figura N° 3. 19. Probetas después del ensayo de dobles**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Empresa SEM Ingenieros E.I.R.L. en la Av. Republica de Perú, Cusco, 2019)*

### **3.9.3. ENSAYO DE DUREZA**

La finalidad del ensayo de dureza es identificar las zonas de la junta de soldadura que se endurecieron como consecuencia del cambio microestructural ocasionado por el aporte térmico y la velocidad de enfriamiento. En conciencia, se prepararon las 16 probetas del diseño experimental, de dimensiones 40mm×203mm×8mm (ancho×longitud×espesor), y cuyas superficies fueron debidamente preparados, ver figura N° 3.20. La preparación consistió en esmerilar y pulir con el disco polifan las dos superficies de la probeta empleando la amoladora.

**Figura N° 3. 20. Superficies de las probetas preparadas para el ensayo de dureza**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Control de Calidad en el instituto superior SENATI, Cusco, 2019)*

Luego, se preparó el durómetro Rockwell, eligiéndose los accesorios necesarios para el tipo de dureza que se va a medir, ver figura N° 3.21. Como se trata de una superficie soldada, se eligió la escala Rockwell C, la cual está destinada para aceros de dureza media y para aceros templados. El equipo de dureza Rockwell C consiste en emplear un indentador con punta de diamante y con una carga 150 kgf. La punta de diamante tiene un ángulo de 120°.

**Figura N° 3. 21. Accesorios del durómetro Rockwell y equipo energizado**



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Control de Calidad en el instituto superior SENATI, Cusco, 2019)

Para calcular, el punto de la ZAC que fue medido, se empleó la fórmula del ancho de la ZAC, a una temperatura de 1000 °C, temperatura crítica dentro de la región de la ZAC, y con un calor de soldeo en promedio de 900.00 J/mm, ver la sección de cálculos de soldadura.

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{1000 - 20} \right) - \left( \frac{1}{1536 - 20} \right) \right] \times \left[ \frac{900.00}{4.13 \times 0.0044 \times 8} \right] = 2.23 \text{ mm}$$

Por tanto, punto de la ZAC a ser indentado está ubicado a 7 mm del centro de la ZF (5 mm de la ZF+ 2 mm del ancho de la ZAC). Seguidamente, se identificó la línea de dureza (L. D.) sobre la cual están ubicados los puntos a medir la dureza, ver figura N° 3.22.

**Figura N° 3. 22. Esquema de barrido de dureza**



Fuente: elaboración propia

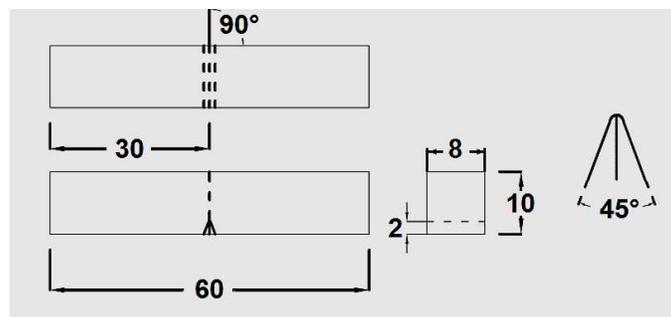
Nótese en la figura N° 3.22 que los puntos a medir la dureza están ubicados sobre: el metal base (MB) del acero ASTM GRADO 50, la zona afectada por el calor (ZAC) del acero ASTM GRADO 50, la zona de fusión (ZF) de la soldadura, la zona afectada por el calor (ZAC) del acero ASTM A36, y sobre el metal base (MB) del acero ASTM A36, todos a las distancia que se visualiza en milímetros. Cabe señalar que, el ancho de la zona de fusión es de 10 milímetros aproximadamente, por lo tanto, se dispuso medir la dureza de la ZAC lo más cerca posible a la zona de fusión, que en este caso es de 2 milímetros.

Finalmente, se procedió con el ensayo de dureza de las 16 probetas según el planteamiento del diseño experimental. Los resultados fueron analizados en el capítulo 4.

### 3.9.4. ENSAYO DE CHARPY

La finalidad del ensayo de Charpy es conocer el comportamiento (dúctil o frágil) de las juntas de soldadura frente al impacto. Para lo cual se prepararon 6 probetas según las dimensiones observadas en la figura N° 3.23. Cabe indicar que, estas dimensiones están sujetas a la norma ASTM E23-02 – AWS B4.0.

**Figura N° 3. 23. Dimensiones para probetas de impacto**



Fuente: elaboración propia

Las dimensiones observadas en la figura N° 3.23 están en milímetros. Es necesario indicar que el ancho 8 milímetros corresponde al espesor de la probeta, el cual se cortó a una distancia de 10 por 60 milímetros, ver la figura N° 3.24. La ranura triangular del centro fue realizada empleando una lima triangular, a una profundidad de 2 milímetros.

**Figura N° 3. 24. Probeta preparada para el ensayo de impacto**



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Control de Calidad en el instituto superior SENATI, Cusco, 2019)

En ese sentido, se prepararon las probetas correspondientes a los tratamientos 09 y 10 por presentar mejor comportamiento frente a la prueba de dobles y dureza. Por otro lado, también se prepararon probetas del metal base para el acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36 sin soldadura.

Para determinar la energía absorbida por la probeta se empleó la ec. 3.3.

$$E_a = ML[\cos(\beta) - \cos(\alpha)] \quad (\text{ec. 3.3})$$

Donde:

$E_a$  = Energía absorbida por la probeta (Kg.m)

$M$  = Masa del martillo (Kg)

$L$  = Longitud del brazo (m)

$\alpha$  = Ángulo inicial de aplicación de la carga ( $^\circ$ ), generalmente de  $90^\circ$

$\beta$  = Ángulo final que se eleva el péndulo después de la rotura completa de la probeta

Cabe señalar, que si la ec.3.3 se multiplica por la aceleración de la gravedad (g) se obtiene la energía absorbida con unidad de Joule (m).

Luego, se procedió con el ensayo y obtuvieron las respectivas probetas rotas, como se observa en la figura N° 3.25. Cabe señalar que, se ensayó también a la temperatura  $100^\circ\text{C}$ , para estudiar si varía su comportamiento dúctil/frágil, donde el calentamiento se llevó en un horno.

**Figura N° 3. 25. Probetas rotas después del ensayo de impacto Charpy**



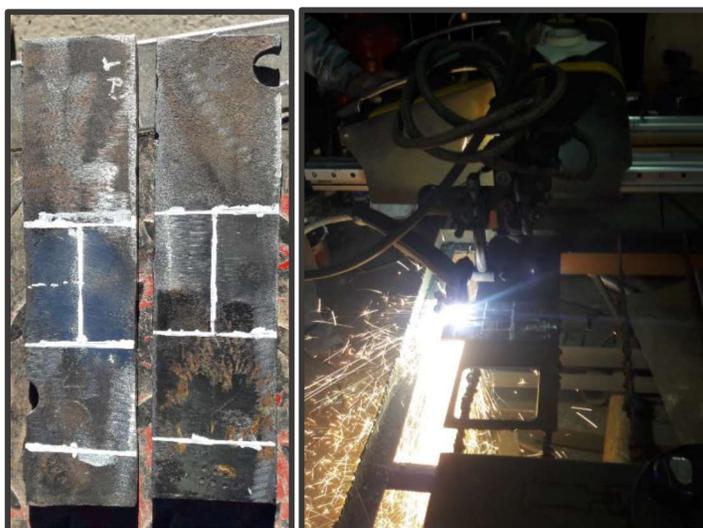
Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Empresa SEM Ingenieros E.I.R.L. en la Av. Republica de Perú, Cusco, 2019)

### 3.9.5. ENSAYO METALOGRAFICO

El ensayo metalográfico se realiza con el objetivo de evaluar los cambios microestructurales que se produzcan en el metal base, producto del aporte de calor propio del proceso de soldadura.

En primer lugar, se determinó las dimensiones de las probetas que pasaran el ensayo metalográfico. Las dimensiones adecuadas en milímetros fueron de 25×50×8 (ancho×longitud×espesor), las cuales fueron trazadas en las probetas con los tratamientos N° 09 y N° 10 del diseño experimental, ver figura N° 3.26, para luego ser cortadas con plasma. En seguida, se dejó enfriar las probetas y se limpió de sus escorias.

**Figura N° 3. 26. Trazado y corte de las probetas para el ensayo metalográfico**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Taller de estructuras metálicas en la Av. Tomasa Tito Contemayta, Cusco, 2019)*

Luego de eso, se procedió a adquirir los materiales necesarios para el ensayo metalográfico. Los materiales consisten en lo siguiente: Papel lijar de: #220, #320, #400 y #600; Pasta de diamante para pulido; Reactivo Nital (5%); Alcohol de 95°; Algodón; y Franela para pulido.

En ese sentido, el ensayo metalográfico consiste en tres etapas bien determinadas:

- Desbaste
- Pulido
- Ataque químico
- Y Observación en el microscopio

Antes de proceder con el desbaste, se identificó y se hizo una marca en las probetas a ser evaluadas. Cabe señalar que se tuvo seis probetas: uno del metal base del acero A607

GRADO 50; uno del metal base del acero ASTM A36; dos de la probeta N° 09 con el material de aporte E7018, una de cara y la otra de costado; y dos de la probeta N° 10 con el material de aporte E8018, una de cara y la otra de costado.

Por lo tanto, se procedió al desbaste de las probetas en el siguiente orden de lijas: #220 y #320 en el desbastador 1; #400 y #600 en el desbastador 2, ver la figura N° 3.27. Cabe indicar que, con el primer desbaste con los lijas #220 y #320 se logra quitar todo el óxido e irregularidad presente en la superficie de la probeta, por lo que es el más importante en esta etapa. En seguida, se desbasta con los lijas #400 y #600 con la finalidad de hacer liso y fino la superficie. Luego del desbastado se pasó al pulido, empleando la pasta de diamante, hasta obtener una superficie completamente liso brillante y listo para el ataque químico.

**Figura N° 3. 27. Desbaste y pulido de las probetas a analizar metalográficamente**



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

Seguidamente al pulido, se procedió con el ataque químico, para el cual se dispuso de todos los materiales e insumos necesarios como lo son alcohol, reactivo NITAL (5%) y agua a 60°C, en el orden que se observa en la figura N° 3.28.

**Figura N° 3. 28. Orden de los materiales e insumos para el ataque químico**



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

En seguida se procedió con el ataque químico, en el siguiente orden: 1) Limpieza con alcohol, 2) Secado, 3) Ataque químico, 4) Lavado, 5) Enjuague y 6) Secado final

Cabe señalar que, la limpieza se realizó con algodón humectado con alcohol de 95°. Después del primer secado se procedió con el ataque químico empleando NITAL al 5%, para lo cual, es importante cronometrar un tiempo de 10 segundos exactos, inmediatamente después se lavó con agua a 60°C. Después del lavado, se enjuago de nuevo con alcohol, para finalmente ser secado, ver la figura N° 3.29.

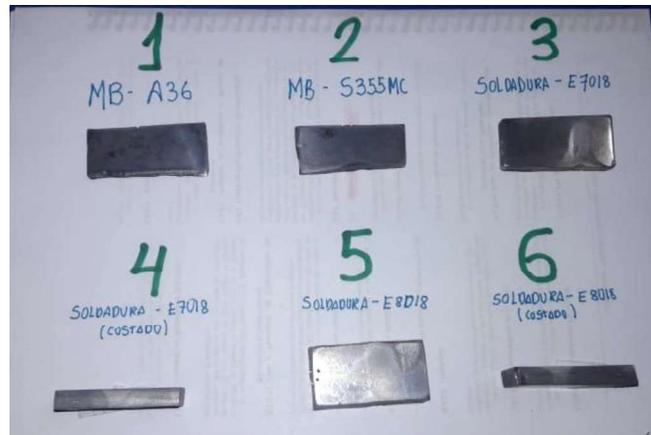
**Figura N° 3. 29. Etapas del ataque químico para el ensayo metalográfico**



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

Una vez terminado la etapa de ataque químico se procedió a ordenar las probetas, ver la imagen N° 3.30, y pasar a la última etapa que es la observación de las microestructuras.

**Figura N° 3. 30. Probetas después del ataque químico**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)*

La observación con el microscopio consiste en visualizar con detenimiento las microestructuras generadas en la junta de soldadura. Se enfatizó en diferenciar y analizar la zona de fusión (ZF) de la soldadura y sobre todo la zona afectada por el calor (ZAC), ver la figura N° 3.31. Finalmente, se apuntó todos los datos observados y se tomó las fotos respectivas a los diferentes aumentos que proporcionaba el microscopio. Es importante dominar la rueda de micro y macro del equipo para enfocar y dar nitidez a la imagen de la microestructura.

**Figura N° 3. 31. Observación de las microestructuras con el microscopio**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)*

### 3.9.6. CÁLCULOS DE SOLDADURA

Antes de proceder con los ensayos de las probetas soldadas fue preciso determinar: las velocidades de avance, el calor neto, el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC), la dilución y la composición del depósito de soldadura en cada pase de soldadura.

#### 3.9.6.1. VELOCIDAD DE AVANCE

Para determinar la velocidad de avance ( $v$ ) en cada una de las etapas antes descritas, se controló para todas las probetas el tiempo de fusión soldadura ( $T$ ) que demoró en terminar un electrodo en consumirse, y también se midió con un calibrador la longitud del cordón ( $L$ ) formado, como se detalla en la Tabla N° 3.19, de tal forma que dividiendo la longitud del cordón entre el tiempo de soldadura se obtuvo la velocidad de avance ( $L/T = v$ ).

**Tabla N° 3. 19. Determinación de velocidad de avance en las etapas de soldeo**

N° Probeta	Etapas de soldeo								
	Pase raíz			Pase de relleno			Pase de acabado		
	T (s)	Long. (mm)	Vel. de Avance (mm/s)	T (s)	Long. (mm)	Vel. de Avance (mm/s)	T (s)	Long. (mm)	Vel. de Avance (mm/s)
01	66	94	1.42	50	93	1.86	53	97	1.83
02	70	93	1.32	48	91	1.90	51	95	1.86
03	67	95	1.41	51	90	1.76	52	98	1.88
04	64	93	1.45	50	92	1.84	53	96	1.81
05	70	94	1.34	48	91	1.90	54	97	1.80
06	68	93	1.36	49	90	1.84	51	95	1.86
07	66	94	1.42	51	92	1.80	52	94	1.81
08	71	93	1.31	52	94	1.81	53	96	1.81
09	69	95	1.38	51	93	1.82	51	97	1.91
10	64	96	1.50	51	90	1.76	52	94	1.81
11	68	94	1.38	49	94	1.92	51	95	1.86
12	69	94	1.36	52	92	1.77	53	96	1.81
13	70	93	1.33	50	92	1.84	52	98	1.88
14	68	95	1.39	52	93	1.79	51	95	1.86
15	71	93	1.31	51	92	1.80	52	97	1.87
16	67	95	1.42	52	93	1.79	51	96	1.88
<b>TOTAL</b>	1088	1504	1.38	807	1472	1.83	832	1536	1.85

Fuente: elaboración propia

Nótese en la tabla N° 3.19 que el tiempo cronometrado en minutos fue convertido a segundos. Para el caso del pase de relleno y del pase de acabado se emplearon diferentes

intensidades de corriente (125 o 135A), según el planteamiento del diseño experimental, por lo que fue necesario dar un nuevo procesamiento de datos mediante la tabla N° 3.20, para determinar sus respectivos velocidades de avance.

**Tabla N° 3. 20. Velocidades de avance para las diferentes intensidades de corriente**

Intensidad de corriente (A)	N° de probeta	Codificación del diseño para el amperaje	Pase de relleno		Pase de acabado	
			Velocidad de avance (mm/s)	Promedio (mm/s)	Velocidad de avance (mm/s)	Promedio (mm/s)
125	01	-	1.86	1.84	1.83	1.85
	02	-	1.90		1.86	
	05	-	1.90		1.80	
	06	-	1.84		1.86	
	09	-	1.82		1.91	
	11	-	1.76		1.81	
	13	-	1.84		1.88	
	14	-	1.79		1.86	
135	03	+	1.76	1.81	1.88	1.84
	04	+	1.84		1.81	
	07	+	1.80		1.81	
	08	+	1.81		1.81	
	11	+	1.92		1.86	
	12	+	1.77		1.81	
	15	+	1.80		1.87	
	16	+	1.79		1.88	

Fuente: elaboración propia

### 3.9.6.2. CALOR NETO

Para determinar la energía de soldeo se combinó la ec. 2.1 y la ec. 2.2 del marco teórico generando la siguiente ecuación:

$$H_{neto} = \frac{V \times I}{v} (f) \quad [ec. 3.2]$$

Donde:

H<sub>neto</sub> = Calor neto suministrado (J/mm)

V = Voltaje (V)

I = Intensidad de corriente o amperaje (A)

v = velocidad de avance (mm/s)

f = eficiencia térmica del proceso de soldadura

Tomando en cuenta el procedimiento de soldadura y la tabla N°2.8 del rendimiento térmico de los procesos de arco eléctrico, expuestos en el marco teórico, se tiene los siguientes datos:

$$V = 20V$$

$$f = 0.65$$

En cuanto, a la intensidad de corriente y velocidad de avance de las diferentes etapas de soldeo, éstas de obtuvieron a partir de la tabla N° 3.19 y N° 3.20.

- **Cálculo del calor neto para el pase raíz**

$$I = 80 \text{ A}$$

$$v = 1.38 \text{ mm/s}$$

$$Hn = \frac{20 \times 80 \times 0.65}{1.38} = 753.62 \text{ J/mm}$$

- **Cálculo del calor neto para el pase relleno con amperaje de 125A**

$$I = 125 \text{ A}$$

$$v = 1.84 \text{ mm/s}$$

$$Hn = \frac{20 \times 125 \times 0.65}{1.84} = 883.15 \text{ J/mm}$$

- **Cálculo del calor neto para el pase acabado con amperaje de 125 A**

$$I = 125 \text{ A}$$

$$v = 1.85 \text{ mm/s}$$

$$Hn = \frac{20 \times 125 \times 0.65}{1.85} = 878.38 \text{ J/mm}$$

- **Cálculo del calor neto para el pase relleno con amperaje de 135 A**

$$I = 135 \text{ A}$$

$$v = 1.81 \text{ mm/s}$$

$$Hn = \frac{20 \times 135 \times 0.65}{1.81} = 969.61 \text{ J/mm}$$

- **Cálculo del calor neto para el pase acabado con amperaje de 135 A**

$$I = 135 \text{ A}$$

$$v = 1.84 \text{ mm/s}$$

$$Hn = \frac{20 \times 135 \times 0.65}{1.84} = 953.80 \text{ J/mm}$$

### 3.9.6.3. ANCHO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR

El ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) fue calculado a partir de la ecuación 3.2, cabe indicar que éste fue abordado en el marco teórico.

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left( \frac{1}{T_{fusión} - T_o} \right) \right] \times \left[ \frac{H_{neto}}{4.13 \times \rho \times C \times t} \right] \quad [ec.3.3]$$

Donde:

Y = ancho de la ZAC (mm)

T<sub>max</sub> = Temperatura máxima en la zona adyacente al ZAC (°C)

T<sub>o</sub> = Temperatura inicial del material (°C)

T<sub>fusión</sub> = Temperatura de fusión (°C)

ρ = Densidad del material (g/mm<sup>3</sup>)

C = Calor específico del metal sólido (J/g. °C)

t = Espesor del material (mm)

H<sub>neto</sub> = Calor neto (J/mm)

Para el caso del acero se tienen los siguientes datos:

Temperatura de fusión: **T<sub>fusión</sub>** = 1536 °C

Temperatura máxima: **T<sub>max</sub>** = 723 °C

Temperatura inicial: **T<sub>o</sub>** = 20 °C

Densidad del acero: **ρ** = 7.85 g/cm<sup>3</sup> = 0.00785 g/mm<sup>3</sup>

Calor específico del acero: **C** = 0.134 cal/g. °C = 0.561 J/g. °C

Espesor del material: **t** = 8 mm

Es preciso señalar que la temperatura adyacente al ZAC (T<sub>max</sub>) se obtuvo al proyectar la intersección de la línea A<sub>C3</sub> en el diagrama de hierro – carbono, con el porcentaje de carbono (0.12%C) del acero en estudio. Es decir, que a partir de la 860 °C (T<sub>max</sub>) empiezan los cambios microestructurales de los aceros en estudio.

En cuanto al calor neto (H<sub>neto</sub>), éste se obtuvo a partir de la tabla N°3.21 para las diferentes etapas de soldeo.

Por otro lado, para simplificar el cálculo, se halló el calor específico volumétrico del acero:

$$\rho C = \rho \times C = 0.00785 \times 0.561 = \mathbf{0.0044 \text{ J/mm}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$$

- **Cálculo del ancho de la ZAC para el pase raíz**

H<sub>n</sub> = 753.62 J/mm

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 20} \right) - \left( \frac{1}{1536 - 20} \right) \right] \times \left[ \frac{753.62}{4.13 \times 0.0044 \times 8} \right] = \mathbf{3.95 \text{ mm}}$$

Cabe señalar que se realizó tres depósitos: pase raíz, pase relleno y ase acabado, sin embargo, el pase relleno y acabado se realizaron a dos niveles de amperaje, esto es, uno a 125 amperios y el otro a 135 amperios.

- **Cálculo del ancho de la ZAC para el pase relleno con el amperaje 125A**

$$H_n = 883.15 \text{ J/mm}$$

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 20} \right) - \left( \frac{1}{1536 - 20} \right) \right] \times \left[ \frac{883.15}{4.13 \times 0.0044 \times 8} \right] = 4.63 \text{ mm}$$

- **Cálculo del ancho de la ZAC para el pase acabado con el amperaje 125A**

$$H_n = 878.38 \text{ J/mm}$$

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 20} \right) - \left( \frac{1}{1536 - 20} \right) \right] \times \left[ \frac{878.38}{4.13 \times 0.0044 \times 8} \right] = 4.61 \text{ mm}$$

- **Cálculo del ancho de la ZAC para el pase relleno con el amperaje 135A**

$$H_n = 969.61 \text{ J/mm}$$

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 20} \right) - \left( \frac{1}{1536 - 20} \right) \right] \times \left[ \frac{969.61}{4.13 \times 0.0044 \times 8} \right] = 5.09 \text{ mm}$$

- **Cálculo del ancho de la ZAC para el pase acabado con el amperaje 135A**

$$H_n = 953.80 \text{ J/mm}$$

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 20} \right) - \left( \frac{1}{1536 - 20} \right) \right] \times \left[ \frac{953.80}{4.13 \times 0.0044 \times 8} \right] = 5.00 \text{ mm}$$

**Tabla N° 3. 21. Resumen de resultados para hallar el ancho de la ZAC**

Pase	Intensidad de corriente (A)	Velocidad de avance (mm/s)	Calor neto (J/mm)	Ancho de la ZAC (mm)
<b>Raíz</b>	80	1.38	753.62	3.95
<b>Relleno</b>	125	1.84	883.15	4.63
<b>Acabado</b>	125	1.85	878.38	4.61
<b>Relleno</b>	135	1.81	969.61	5.09
<b>Acabado</b>	135	1.84	953.80	5.00

Fuente: elaboración propia

Nótese en la tabla N° 3.21 que el pase raíz generó un menor ancho de la ZAC por tener una menor energía o calor de soldeo. Por otro lado, se obtuvieron mayores anchos de la ZAC cuando se trabajó con la máxima intensidad de corriente (135A), lo que quiere indicar que es conveniente trabajar con amperajes mínimos, para obtener menores anchos de ZAC.

#### 3.9.6.4. DILUCIÓN

Para calcular el porcentaje de dilución se empieza a partir de la imagen macroscópica que se obtuvo en el análisis metalográfico con el reactivo NITAL, ver figura N° 3.32.

**Figura N° 3. 32. Probeta soldada atacada con el reactivo NITAL**



Fuente: (Fotografía de Alex Yucra), laboratorio de Metalurgia física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019

Cabe señalar, que la anterior probeta posee las dimensiones en milímetros de 50×8 (ancho×espesor), y sobre el cual se proyectó los pases de soldadura, haciendo uso del software AutoCAD, ver la figura N° 3.33.

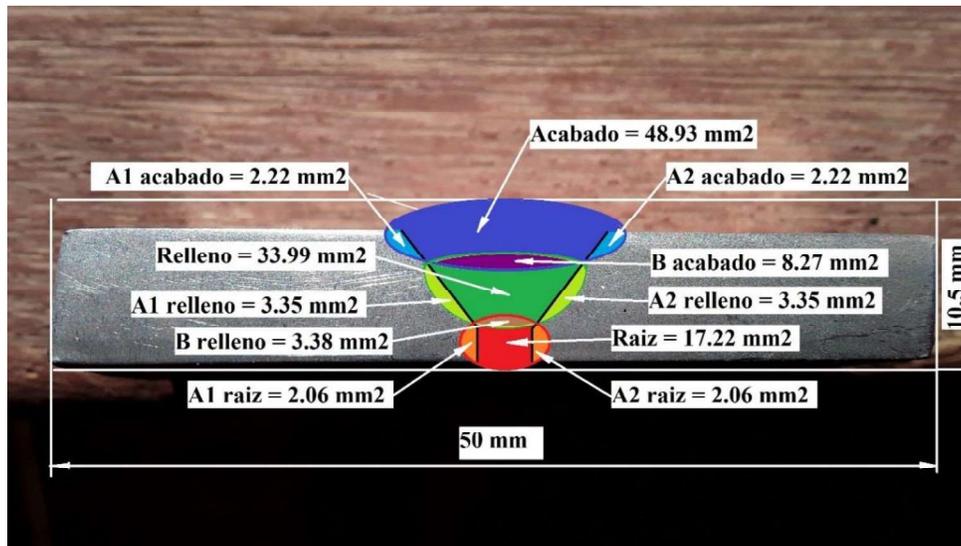
**Figura N° 3. 33. Pases de soldadura proyectadas a partir de la probeta soldada**



Fuente: elaboración propia en AUTOCAD

Teniendo en cuenta que el cordón de acabado posee una cresta de 2 mm y de igual forma el cordón de pase raíz posee una cresta de 0.5 mm, se procedió a determinar el área de ocupada por los pases de soldadura incluyendo las diluciones presentadas en cada paso, *mediante el software AUTOCAD*, ver la figura N° 3.34.

Figura N° 3. 34. Áreas de las pases de soldadura y de las diluciones presentadas



Fuente: elaboración propia en AUTOCAD

Dónde: A1 es identificado como el acero ASTM A607 GRADO 50; A2 es identificado como el acero ASTM A36; y B es identificado como el cordón anterior inmediato.

En seguida se procede a calcular el porcentaje de dilución en cada pase de soldadura, empleando la siguiente ecuación:

$$\%D = \frac{\text{Área sombreada de la Figura N° 3.34}}{\text{Área total del cordón de soldadura}} \times 100 \quad (\text{ec. 3.4})$$

**- Dilución para el pase raíz**

En primer lugar, se calculó la dilución de cada tipo de acero:

$$\%D_{A1} = \frac{2.06}{17.22} \times 100 = 11.96\%$$

$$\%D_{A2} = \frac{2.06}{17.22} \times 100 = 11.96\%$$

Luego se procedió a calcular la dilución total del pase raíz

$$\%D_T = \frac{2.06 + 2.06}{17.22} \times 100 = 23.92\%$$

**- Dilución para el pase relleno**

De igual forma se calculó la dilución presentada en cada tipo de acero:

$$\%D_{A1} = \frac{3.35}{33.99} \times 100 = 9.86\%$$

$$\%D_{A2} = \frac{3.35}{33.99} \times 100 = \mathbf{9.86\%}$$

En seguida se determinó la dilución del cordón anterior:

$$\%D_B = \frac{3.38}{33.99} \times 100 = \mathbf{9.94\%}$$

Luego se calculó la dilución total del pase relleno:

$$\%D_T = \frac{3.35 + 3.35 + 3.38}{33.99} \times 100 = \mathbf{29.66\%}$$

#### - Dilución para el pase acabado

Se determinó la dilución presentada en cada tipo de acero:

$$\%D_{A1} = \frac{2.22}{48.93} \times 100 = \mathbf{4.54\%}$$

$$\%D_{A2} = \frac{2.22}{48.93} \times 100 = \mathbf{4.54\%}$$

En seguida se determinó la dilución del cordón anterior:

$$\%D_B = \frac{8.27}{48.93} \times 100 = \mathbf{16.90\%}$$

Luego se calculó la dilución total del pase relleno:

$$\%D_T = \frac{2.22 + 2.22 + 8.27}{48.93} \times 100 = \mathbf{25.98\%}$$

### 3.9.6.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL DEPÓSITO DE SOLDADURA

Para determinar la composición química del depósito de soldadura se aplica la siguiente ecuación:

$$X_W = (D_{A1})(X_{A1}) + (D_{A2})(X_{A2}) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F)$$

Donde:

$X_W$  = Porcentaje promedio del elemento X en el depósito de soldadura

$X_{A1}$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base A1

$X_{A2}$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base A2

$X_B$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base B

$D_{A1}$  = Porcentaje de dilución del metal base A1, expresado en decimal

$D_{A2}$  = Porcentaje de dilución del metal base A2, expresado en decimal

$D_B$  = Porcentaje de dilución del metal base B, expresado en decimal

$D_T$  = Porcentaje de dilución total, expresado en decimal

- **Cálculo para el pase raíz**

En la tabla N° 3.22 se presenta la composición química del metal base, conformado por el acero A607 grado 50 y por el acero A36, y también se presenta la composición química del material de aporte, en este caso el electrodo E 6011.

**Tabla N° 3. 22. Composición química de los materiales para el pase raíz**

Elemento	Acero A607 grado 50 (%)	Acero A36 (%)	Electrodo E 6011 (%)
Carbono (C)	0.12	0.26	0.06
Manganeso (Mn)	1.5	0.8	0.45
Fósforo (P)	0.025	0.04	0.03
Azufre (S)	0.02	0.05	0.025
Silicio (Si)	0.5	0.3	0.25

Fuente: Elaboración propia

En seguida se determinó la composición química del depósito de soldadura para el pase raíz empelando la ecuación anterior.

$$X_W = (D_{A1})(X_{A1}) + (D_{A2})(X_{A2}) + (1 - D_T)(X_F)$$

$$\%C = (0.1196)(0.12) + (0.1196)(0.26) + (1-0.2392)(0.06) = \mathbf{0.091 \%}$$

$$\%Mn = (0.1196)(1.5) + (0.1196)(0.8) + (1-0.2392)(0.45) = \mathbf{0.62 \%}$$

$$\%P = (0.1196)(0.025) + (0.1196)(0.04) + (1-0.2392)(0.03) = \mathbf{0.031 \%}$$

$$\%S = (0.1196)(0.02) + (0.1196)(0.05) + (1-0.2392)(0.025) = \mathbf{0.027 \%}$$

$$\%Si = (0.1196)(0.5) + (0.1196)(0.3) + (1-0.2392)(0.25) = \mathbf{0.29 \%}$$

- **Cálculo para el pase relleno con el electrodo E 7018**

En la tabla N° 3.23 se presenta las composiciones químicas de los materiales involucrados en el pase relleno empleando el electrodo E7018. Esto es, la composición química de los metales base, del cordón anterior y del electrodo E7018.

**Tabla N° 3. 23. Composición química los materiales para el pase relleno con el electrodo E7018**

Elemento	Acero A607 grado 50 (%)	Acero A36 (%)	Raíz (%)	Electrodo E 7018 (%)
Carbono (C)	0.12	0.26	0.091	0.05
Manganeso (Mn)	1.5	0.8	0.62	1.00
Fósforo (P)	0.025	0.04	0.031	0.02
Azufre (S)	0.02	0.05	0.027	0.02
Silicio (Si)	0.5	0.3	0.29	0.60

Fuente: Elaboración propia

En seguida se determinó la composición química del depósito de soldadura para el pase relleno empleando la siguiente ecuación.

$$X_W = (D_{A1})(X_{A1}) + (D_{A2})(X_{A2}) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F)$$

$$\%C = (0.0986)(0.12) + (0.0986)(0.26) + (0.0994)(0.091) + (1-0.2966)(0.05) = \mathbf{0.082 \%}$$

$$\%Mn = (0.0986)(1.5) + (0.0986)(0.8) + (0.0994)(0.62) + (1-0.2966)(1.00) = \mathbf{0.99 \%}$$

$$\%P = (0.0986)(0.025) + (0.0986)(0.04) + (0.0994)(0.031) + (1-0.2966)(0.02) = \mathbf{0.024\%}$$

$$\%S = (0.0986)(0.02) + (0.0986)(0.05) + (0.0994)(0.027) + (1-0.2966)(0.02) = \mathbf{0.024\%}$$

$$\%Si = (0.0986)(0.5) + (0.0986)(0.3) + (0.0994)(0.29) + (1-0.2966)(0.60) = \mathbf{0.53 \%}$$

**- Cálculo para el pase acabado con el electrodo E 7018**

En la tabla N° 3.24 se presenta las composiciones químicas de los materiales involucrados en el pase acabado con el electrodo E7018.

**Tabla N° 3. 24. Composición química de los materiales para el acabado con el electrodo E7018**

Elemento	Acero A607 grado 50 (%)	Acero A36 (%)	Relleno (%)	Electrodo E 7018 (%)
Carbono (C)	0.12	0.26	0.082	0.05
Manganeso (Mn)	1.5	0.8	0.99	1.00
Fósforo (P)	0.025	0.04	0.024	0.02
Azufre (S)	0.02	0.05	0.024	0.02
Silicio (Si)	0.5	0.3	0.53	0.60

Fuente: Elaboración propia

En seguida se determinó la composición química del depósito de soldadura para el pase raíz empelando la ecuación anterior.

$$X_W = (D_{A1})(X_{A1}) + (D_{A2})(X_{A2}) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F)$$

$$\%C = (0.0454)(0.12) + (0.0454)(0.26) + (0.169)(0.082) + (1-0.2598)(0.05) = \mathbf{0.068 \%}$$

$$\%Mn = (0.0454)(1.5) + (0.0454)(0.8) + (0.169)(0.99) + (1-0.2598)(1.00) = \mathbf{1.01 \%}$$

$$\%P = (0.0454)(0.025) + (0.0454)(0.04) + (0.169)(0.024) + (1-0.2598)(0.02) = \mathbf{0.022\%}$$

$$\%S = (0.0454)(0.02) + (0.0454)(0.05) + (0.169)(0.024) + (1-0.2598)(0.02) = \mathbf{0.022\%}$$

$$\%Si = (0.0454)(0.5) + (0.0454)(0.3) + (0.169)(0.53) + (1-0.2598)(0.60) = \mathbf{0.57 \%}$$

**- Cálculo para el pase relleno con el electrodo E8018**

En la tabla N° 3.25 se presenta las composiciones químicas de los materiales involucrados en el pase relleno empleando el electrodo E8018. Esto es, la composición química de los metales base, del cordón anterior y del electrodo E8018.

**Tabla N° 3. 25. Composición química de los materiales para el acabado con el electrodo E7018**

<b>Elemento</b>	<b>Acero A607 grado 50 (%)</b>	<b>Acero A36 (%)</b>	<b>Raíz (%)</b>	<b>Electrodo E 8018 (%)</b>
<b>Carbono (C)</b>	0.12	0.26	0.091	0.06
<b>Manganeso (Mn)</b>	1.5	0.8	0.62	1.20
<b>Fósforo (P)</b>	0.025	0.04	0.031	0.02
<b>Azufre (S)</b>	0.02	0.05	0.027	0.02
<b>Silicio (Si)</b>	0.5	0.3	0.29	0.30

Fuente: Elaboración propia

En seguida se determinó la composición química del depósito de soldadura para el pase raíz empelando la ecuación anterior.

$$X_W = (D_{A1})(X_{A1}) + (D_{A2})(X_{A2}) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F)$$

$$\%C = (0.0986)(0.12) + (0.0986)(0.26) + (0.0994)(0.091) + (1-0.2966)(0.06) = \mathbf{0.089 \%}$$

$$\%Mn = (0.0986)(1.5) + (0.0986)(0.8) + (0.0994)(0.62) + (1-0.2966)(1.20) = \mathbf{1.13 \%}$$

$$\%P = (0.0986)(0.025) + (0.0986)(0.04) + (0.0994)(0.031) + (1-0.2966)(0.02) = \mathbf{0.024\%}$$

$$\%S = (0.0986)(0.02) + (0.0986)(0.05) + (0.0994)(0.027) + (1-0.2966)(0.02) = \mathbf{0.024\%}$$

$$\%Si = (0.0986)(0.5) + (0.0986)(0.3) + (0.0994)(0.29) + (1-0.2966)(0.30) = \mathbf{0.32\%}$$

**- Cálculo para el pase acabado con el electrodo E 8018**

En la tabla N° 3.26 se presenta las composiciones químicas de los materiales involucrados en el pase acabado con el electrodo E8018.

**Tabla N° 3. 26. Composición química del metal base y de aporte para el acabado**

Elemento	Acero A607 grado 50 (%)	Acero A36 (%)	Relleno (%)	Electrodo E 8018 (%)
Carbono (C)	0.12	0.26	0.082	0.06
Manganeso (Mn)	1.5	0.8	0.99	1.20
Fósforo (P)	0.025	0.04	0.024	0.02
Azufre (S)	0.02	0.05	0.024	0.02
Silicio (Si)	0.5	0.3	0.53	0.30

Fuente: Elaboración propia

En seguida se determinó la composición química del depósito de soldadura para el pase raíz empelando la ecuación anterior.

$$X_W = (D_{A1})(X_{A1}) + (D_{A2})(X_{A2}) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F)$$

$$\%C = (0.0454)(0.12) + (0.0454)(0.26) + (0.169)(0.082) + (1-0.2598)(0.06) = \mathbf{0.076\%}$$

$$\%Mn = (0.0454)(1.5) + (0.0454)(0.8) + (0.169)(0.99) + (1-0.2598)(1.20) = \mathbf{1.16\%}$$

$$\%P = (0.0454)(0.025) + (0.0454)(0.04) + (0.169)(0.024) + (1-0.2598)(0.02) = \mathbf{0.022\%}$$

$$\%S = (0.0454)(0.02) + (0.0454)(0.05) + (0.169)(0.024) + (1-0.2598)(0.02) = \mathbf{0.022\%}$$

$$\%Si = (0.0454)(0.5) + (0.0454)(0.3) + (0.169)(0.53) + (1-0.2598)(0.30) = \mathbf{0.35\%}$$

## CAPITULO V

### RESULTADOS

#### 4.1. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

##### 4.1.1. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN VISUAL

Los resultados de la inspección visual se detallan en la tabla N° 4.1.

**Tabla N° 4. 1. Resultados de la inspección visual**

N° Probeta	Presencia de grietas	Refuerzo de la soldadura	Socavación	Fusión completa de la raíz	Máxima concavidad de la raíz	Resultado
01	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
02	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
03	No presenta	Plano	1/32 pulg.	Adecuada	1/8 pulg.	Aceptable
04	No presenta	Plano	1/32 pulg.	Adecuada	1/8 pulg.	Aceptable
05	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
06	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
07	No presenta	Plano	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
08	No presenta	Plano	1/32 pulg.	Adecuada	1/8 pulg.	Aceptable
09	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
10	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
11	No presenta	1/16 pulg.	1/32 pulg.	Adecuada	1/8 pulg.	Aceptable
12	No presenta	1/16 pulg.	1/32 pulg.	Adecuada	1/8 pulg.	Aceptable
13	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
14	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable
15	No presenta	1/16 pulg.	1/32 pulg.	Adecuada	1/8 pulg.	Aceptable
16	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Aceptable

Fuente: elaboración propia

**Interpretación.** Se observa que todas las probetas pasaron la inspección visual. Es decir, que no se encontraron discontinuidades, ni presencia de grietas, ni socavaciones, ni fusión incompleta que pudieran comprometer la sanidad de las juntas soldadas de las probetas.

##### 4.1.2. INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLES

###### 4.1.2.1. Presentación de resultados del ensayo de dobles

Los resultados obtenidos en el ensayo de dobles de raíz guiado se presentan en la tabla N° 4.2. Cabe indicar que, se empleó como referencia la cláusula 4.9.3.3 del código de soldadura estructural ANSI/ AWS D1.1, ver Anexo D

**Tabla N° 4. 2. Resultados del ensayo de dobles**

N° Probeta	Factores			Suma de discontinuidades	Grieta máxima de esquina	Resultado
	Tipo de electrodo (AWS)	Intensidad de corriente (A)	Ángulo de avance (°)			
01	E 7018	125	10	No tiene	No tiene	Aceptable
02	E 8018	125	10	No tiene	No tiene	Aceptable
03	E 7018	135	10	3/16 pulg. (5mm)	1/8 pulg.	No pasa
04	E 8018	135	10	No tiene	1/8 pulg.	Aceptable
05	E 7018	125	20	No tiene	No tiene	Aceptable
06	E 8018	125	20	No tiene	No tiene	Aceptable
07	E 7018	135	20	No tiene	No tiene	Aceptable
08	E 8018	135	20	3/16 pulg. (5mm)	1/8 pulg.	No pasa
09	E 7018	125	10	No tiene	No tiene	Aceptable
10	E 8018	125	10	No tiene	No tiene	Aceptable
11	E 7018	135	10	No tiene	No tiene	Aceptable
12	E 8018	135	10	1/8 pulg. (3mm)	1/8 pulg.	No pasa
13	E 7018	125	20	No tiene	1/8 pulg.	Aceptable
14	E 8018	125	20	No tiene	1/8 pulg.	Aceptable
15	E 7018	135	20	3/16 pulg. (5mm)	1/8 pulg.	No pasa
16	E 8018	135	20	No tiene	1/8 pulg.	Aceptable

Fuente: elaboración propia

#### 4.1.2.2. Interpretación del ensayo de dobles

**Análisis.-** Se tienen los siguientes análisis a partir de los resultados:

- Se observa que 12 probetas, de un total de 16, pasaron exitosamente la prueba de dobles, y sólo cuatro no pasaron por presentar ligeras rajaduras.
- También se observa que 8 probetas, de las 12 que pasaron exitosamente el ensayo de dobles, **trabajaron con una intensidad de corriente menor, esto es 125A.**
- Sin embargo, para el caso del tipo de metal de aporte, tanto el electrodo E7018 como el electrodo E8018, tuvieron la mitad de probetas que pasaron exitosamente la prueba de dobles, es decir, 6 de 12 probetas. De la misma forma ocurrió con el ángulo de avance del electrodo.

Para un mejor análisis, en la figura N° 4.1 se muestra las probetas dobladas de los tratamientos 01, 02, 09 y 10, es decir aquellas que trabajaron con una intensidad de corriente menor, de 125A

**Figura N° 4. 1. Probetas que pasaron exitosamente la prueba de dobles**

Probeta 01



Probeta 02



Probeta 09 (replica de 01)



Probeta 10 (replica de 02)



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Empresa SEM Ingenieros E.I.R.L., Cusco, 2019)*

**Interpretación.-** Las probetas presentaron un buen comportamiento frente a la prueba de dobles cuando trabajaron a una mínima intensidad de corriente (125A), teniendo en cuenta su influencia en el aporte térmico y en el ancho de la ZAC. Por otro lado, las demás variables, no demostraron tener una influencia significativa.

### 4.1.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA

#### 4.1.3.1. Presentación de resultados de dureza

Los resultados del barrido de dureza se muestran en la tabla N° 4.3, ver Anexo F

**Tabla N° 4. 3. Resultados del ensayo de dureza**

N° Repl.	N° Prueba	Factores			RESULTADO				
		Escala decodificada			LÍNEA DE BARRIDO DE DUREZA (HRC)				
		T.E. (AWS)	I.C. (A)	A.A.E (°)	MB (S355MC)	ZAC (S355MC)	ZF	ZAC (A36)	MB (A36)
1	01	E 7018	125	10	27	30	28	29	26
	02	E 8018	125	10	26	27	28	31	25
	03	E 7018	135	10	29	34	38	35	28
	04	E 8018	135	10	27	37	34	36	27
	05	E 7018	125	20	28	34	35	33	28
	06	E 8018	125	20	27	36	33	35	29
	07	E 7018	135	20	27	31	32	30	26
	08	E 8018	135	20	28	40	34	37	29
2	09	E 7018	125	10	25	25	20	26	23
	10	E 8018	125	10	25	27	25	28	25
	11	E 7018	135	10	29	36	34	35	27
	12	E 8018	135	10	29	40	37	39	28
	13	E 7018	125	20	28	37	36	37	27
	14	E 8018	125	20	27	34	33	33	26
	15	E 7018	135	20	27	39	37	38	27
	16	E 8018	135	20	28	34	32	32	28

Fuente: elaboración propia

Nótese en la tabla N° 4.3 que la dureza del metal base (MB), esto es del acero ASTM A607 GRADO 50 y del acero ASTM A36 varía entre de 25 – 29 HRC, lo cual está dentro de los rangos previstos. Sin embargo, es preciso analizar la dureza de la ZAC para ambos tipos de aceros y también la dureza de la zona fundida (ZF).

#### 4.1.3.2. Análisis e interpretación de resultados de dureza en la ZAC para el acero ASTM A607 GRADO 50

- Procesamiento de resultados

La tabla N° 4.4 muestra los resultados para la dureza en la ZAC del acero ASTM A607 GRADO 50 conforme al diseño factorial  $2^3$  con 2 réplicas.

**Tabla N° 4. 4. Resultados de dureza para la ZAC en el acero A607 grado 50**

A: Tipo de electrodo	B: Intensidad de corriente (A)	C: Ángulo de avance (°)	A	B	C	Dureza		Total
						Replica 1	Replica 2	
E 7018	125	10	-	-	-	30	25	55 = (1)
E 8018	125	10	+	-	-	27	27	54 = a
E 7018	135	10	-	+	-	34	36	70 = b
E 8018	135	10	+	+	-	37	40	77 = ab
E 7018	125	20	-	-	+	34	37	71 = c
E 8018	125	20	+	-	+	36	34	70 = ac
E 7018	135	20	-	+	+	31	39	70 = bc
E 8018	135	20	+	+	+	40	34	74 = abc

Fuente: elaboración propia

Para el procesamiento de resultados es necesario evaluar si los efectos de las variables independientes sobre la dureza de la ZAC son significativos o no, para lograr esto se tiene que plantear las siguientes siete hipótesis nulas:  $H_0$ : efecto de A = 0,  $H_0$ : efecto de B = 0,  $H_0$ : efecto de C = 0,  $H_0$ : efecto de AB = 0,  $H_0$ : efecto de AC = 0,  $H_0$ : efecto de BC = 0 y  $H_0$ : efecto de ABC = 0; cada una contra la hipótesis alternativa (Hi) de que el efecto en cuestión es diferente de cero. Estas hipótesis se comprueban con el análisis de varianza.

Para los cálculos del análisis de varianza (ANOVA), se empleó el software MINITAB. Estos cálculos incluyen contrastes; efectos de cada una de las variables; suma de cuadrados, y el valor estadístico p. Luego, se obtuvo la tabla de ANOVA que se observa en la tabla N° 4.5.

**Tabla N° 4. 5. ANOVA para los datos de dureza de la ZAC en el acero A607 grado 50**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	Valor – p
A: Metal de aporte	5.063	1	5.063	0.54	0.485
B: Intensidad de corriente	105.062	1	105.062	11.13	0.010
C: Ángulo de avance	52.562	1	52.562	5.57	0.046
AB	10.562	1	10.562	1.12	0.321
AC	0.562	1	0.562	0.06	0.813
BC	76.563	1	76,563	8.11	0.022
ABC	0.563	1	0.563	0.06	0.813
Error	75.500	8	9.438		
Total	326.438	15			
R2 = 76.87		R2aj = 56.63			

Fuente: elaboración propia con Minitab

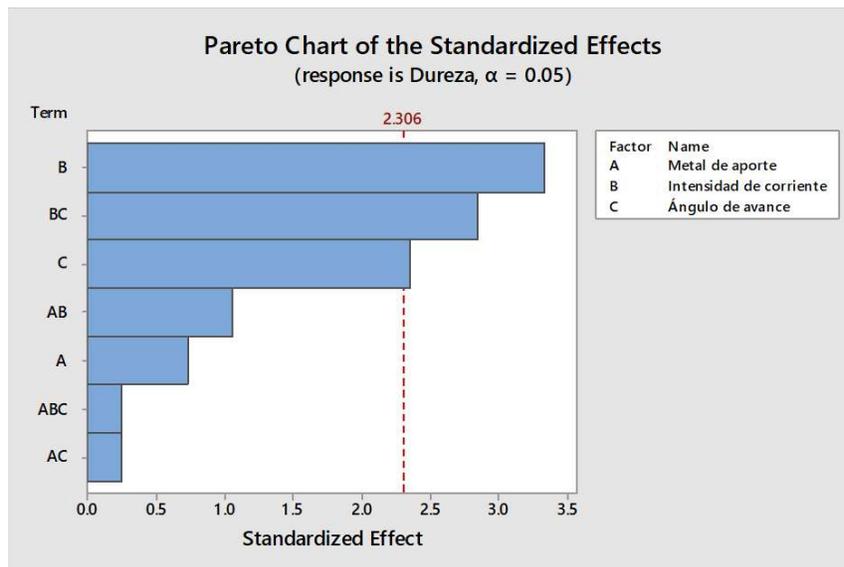
- **Análisis**

De acuerdo con la columna para el vapor-p de la tabla N° 4.5, *se rechazaron las siguientes hipótesis nulas:  $H_0$ : efecto de B = 0,  $H_0$ : efecto de C = 0 y  $H_0$ : efecto de BC = 0, cuyas entradas son menores que 0.05*; sin embargo, *se aceptaron las hipótesis nulas:  $H_0$ : efecto de A = 0,  $H_0$ : efecto de AB = 0,  $H_0$ : efecto de AC = 0 y  $H_0$ : efecto de ABC = 0, cuyas entradas son mayores que 0.05*.

*Por lo tanto, se concluye que  $H_B$ : efecto de B  $\neq$  0,  $H_C$ : efecto de C  $\neq$  0 y  $H_{BC}$ : efecto de BC  $\neq$  0, respectivamente, con  $\alpha = 0.05$ . Es decir, se acepta que si hay efecto de B, C y BC, es decir estos tres efectos están activos o son significativos*. Del valor  $F_0$  se observa que el efecto más importante es del factor B. También, al final del ANOVA se obtiene el coeficiente de determinación que indica que un alto porcentaje de la variabilidad en el experimento ( $R^2 = 76.87$ ) es explicado por los efectos considerados en la tabla N° 4.4.

Estos efectos se graficaron en un diagrama de Pareto, ver la figura N° 4.2, con la finalidad de visualizar cual tiene mayor significancia. Dichos efectos se comparan en referencia al valor crítico en tablas de la distribución T Student con 8 grados de libertad y  $\alpha = 0.05$ , esto es  $t_{(0.025, 8)} = 2.306$ . De manera que, las barras que superen dicho valor son significativos.

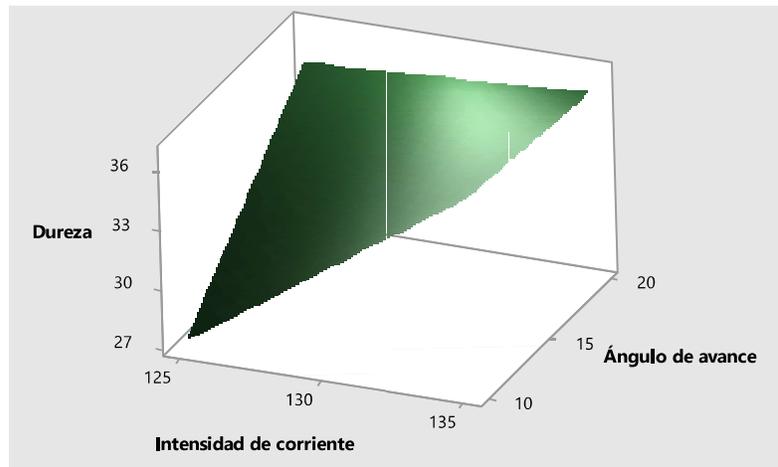
**Figura N° 4. 2. Diagrama de Pareto de efectos estimados**



Fuente: elaboración propia con Minitab

Por otro lado, también se empleó graficas de superficie de los efectos estimados de la ANOVA, antes de proceder con la interpretación, ver la figura N° 4.3.

**Figura N° 4. 3. Superficie de dureza vs ángulo de avance, intensidad de corriente**

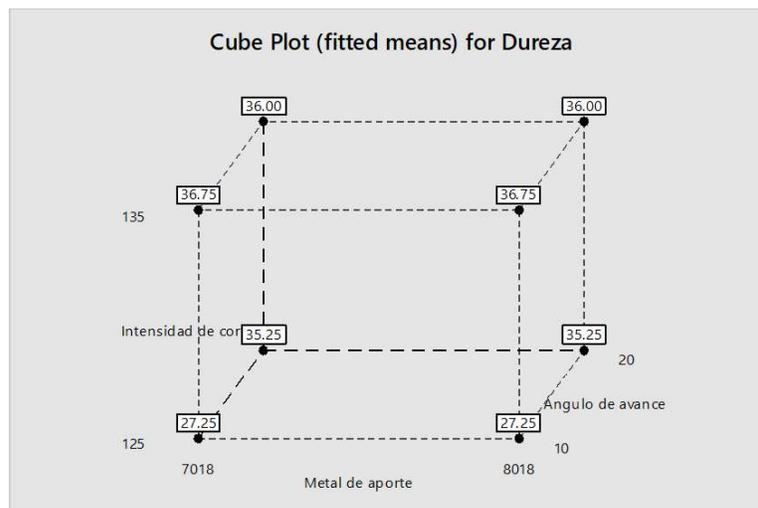


Fuente: elaboración propia con Minitab

**- Interpretación**

En ese sentido, de la figura N° 4.3 se aprecia una interacción importante entre la intensidad de corriente y el ángulo de avance. De tal manera que, se puede afirmar que cuando la intensidad de corriente se encuentra en su nivel bajo, el ángulo de avance si afecta de manera significativa la dureza. Por el contrario, cuando la intensidad de corriente se encuentra en su nivel alto, el ángulo de avance no tiene un efecto considerable sobre la dureza. En otras palabras, al trabajar con una intensidad de corriente en su nivel bajo, la dureza será baja solo si el ángulo de avance también se encuentra en su nivel bajo.

**Figura N° 4. 4. Grafica de cubo y respuesta predicha para la dureza de la ZAC del acero ASTM A607 GRADO 50**



Fuente: elaboración propia con Minitab

Por tanto, se concluye que los dos tratamientos de los factores que minimizan la dureza son: (-1,-1,-1) y (1,-1,-1), esto es, (E7018, 125A, 10°) y (E8018, 135ª, 20°). Estas condiciones también se pueden observar en la gráfica de cubo de la figura N° 4.4, en la que se observa la respuesta predicha de cada punto del diseño.

Para la predicción en cada punto del diseño se utilizó el modelo de regresión para los efectos que tienen una influencia significativa sobre la dureza, esto a partir del ANOVA, la cual en unidades codificadas está dada por:

$$\text{Dureza} = -208.9 + 1.825 B + 11.74 C - 0.0875 BC$$

#### 4.1.4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO DE CHARPY

##### 4.1.4.1. Presentación de resultados del ensayo de Charpy

Los resultados obtenidos en el ensayo de impacto Charpy se muestran en la tabla N° 4.6. Cabe señalar que, se empleó como la norma ASTM E23-02 – AWS B4.0 ver Anexo D.

**Tabla N° 4. 6. Resultados del ensayo de impacto Charpy**

N° Probeta	Material/ Tipo de junta	Tamaño de muestra (mm <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Medio	Energía absorbida (Kg.m)	Expansión lateral (mm)
-	Acero ASTM A36	8×10	20	Amb.	25	3.5
-	Acero A607 grado 50	8×10	20	Amb.	23	2.5
09	Junta soldada	8×10	20	Amb.	23	1.5
	Junta soldada	8×10	100	Horno	26	2.5
10	Junta soldada	8×10	20	Amb.	22	1
	Junta soldada	8×10	100	Horno	25	2.2

Fuente: elaboración propia

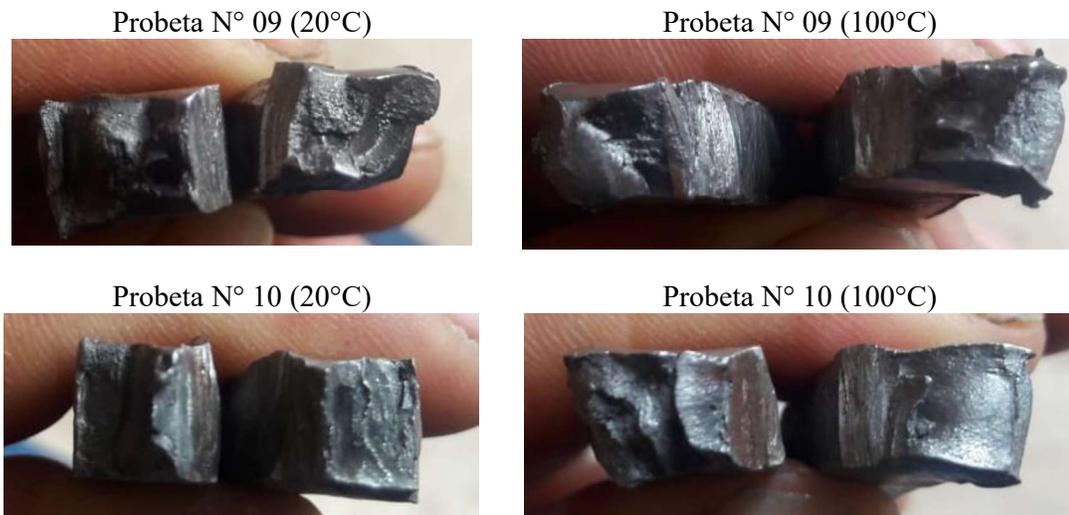
##### 4.1.4.2. Análisis e interpretación del ensayo de Charpy

###### - Análisis.

Los resultados del ensayo Charpy para los metales base se encuentran dentro del margen establecido. Por un lado, el acero ASTM A36 presentó una energía absorbida de 25 Kg.m, esto es, un comportamiento dúctil. De la misma forma para el acero ASTM A607 grado, también presenta un comportamiento dúctil, de 23 Kg.m, es decir tiene más resistencia elástica, por sus elementos de aleación.

Para el caso de las probetas para las juntas soldadas, fue necesario observar las superficies de las probetas rotas, ver figura N° 4.5.

**Figura N° 4. 5. Superficies de las probetas rotas por el ensayo Charpy**



*Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Empresa SEM Ingenieros E.I.R.L., Cusco, 2019)*

En base a la tabla N° 4.6 y a la figura N° 4.5 se observa lo siguiente:

- Que a la **temperatura ambiente (20°C)**, tanto la probeta N°09 como la probeta N°10 presentan una absorción de energía ligeramente menor en comparación con los metales base. Esto indica que, las juntas de soldadura ganaron un comportamiento frágil producto de la alteración microestructural ocasionado por el proceso de soldadura. Esto, se evidencia de mejor forma en la expansión lateral de las muestras que son menores a las obtenidas en el metal base. Sin embargo, se observa un mejor comportamiento en la probeta N°09.
- Por otro lado, a la **temperatura de 100 °C**, se presentó una situación diferente: ambas probetas aumentaron su comportamiento dúctil, puesto que presentaron una mayor absorción de energía, incluso un poco mayor que el metal base.

**Interpretación.** Se concluye que, es normal que las juntas soldadas presenten un comportamiento de mayor fragilidad en comparación a la del metal base, puesto que sufrieron alteraciones microestructurales, sobre todo en la zona afectada por el calor, esto se evidencia de mejor forma en la expansión lateral. Por otro lado, se entiende que al aumentar la temperatura aumenta el flujo plástico en las partículas del acero que posibilitan que se deformen, por ende que presente un comportamiento dúctil. Con todo ello se notó que la probeta con el tratamiento N°09 presento un mejor comportamiento frente a esta prueba.

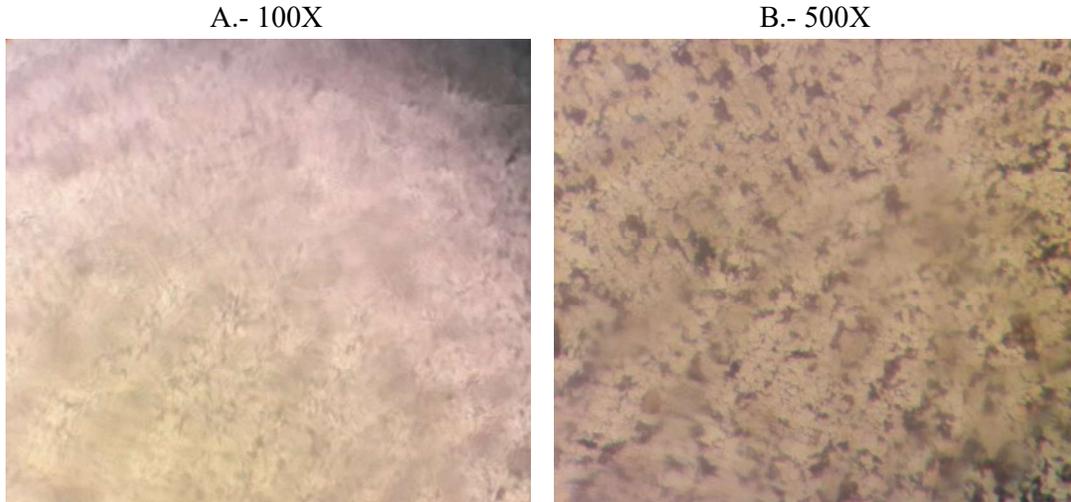
#### 4.1.5. INTERPRETACIÓN PARA EL ENSAYO METALOGRAFICO

##### 4.1.5.1. Análisis e interpretación para el acero ASTM A36

###### - Resultados

En la figura N° 4.6 se presenta la microestructura para el metal base del acero ASTM A36, en los aumentos de 100X y 500X, respectivamente.

**Figura N° 4. 6. Microestructura del acero ASTM A36 a 100X y 500X**



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de la escuela de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

**Tabla N° 4. 7. Análisis químico del acero ASTM A36**

Designación	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.
ASTM A36	0.17	0.80	0.004	0.05	0.30

Fuente: [http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition\\_eu.php](http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition_eu.php) (s.f.)

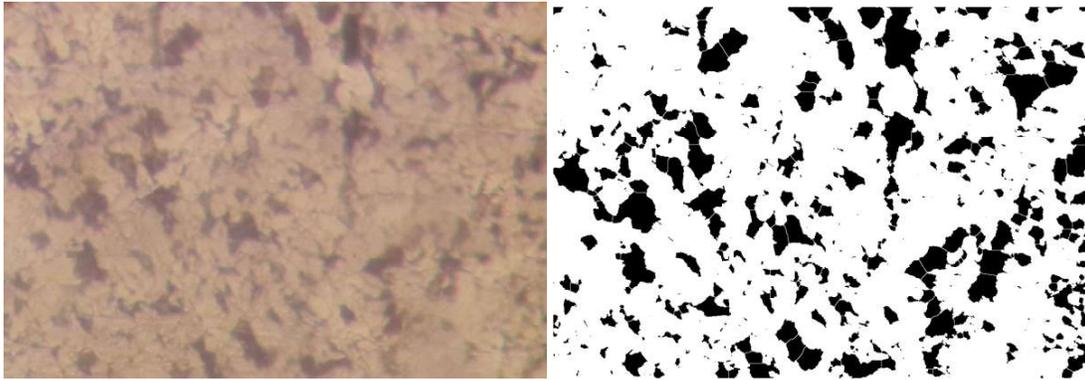
###### - Análisis e interpretación

**Análisis.** En la figura N° 4.6 se muestran dos aumentos, uno a 100X y el otro a 500X. Nótese que, en el aumento de 100X se logra distinguir un tamaño de grano ASTM N° 8, este tamaño es un tamaño de grano estándar para un acero al carbono con 0.2% de C. Además, a partir de la tabla N° 4.7 se deduce una matriz ferrítica de color amarillo, con granos perlíticos de color oscuro.

Por otro lado, en el aumento a 500X se visualiza con mayor nitidez la forma equiaxial de los granos perlíticos sobre la matriz ferrítica. Sin embargo, para determinar con exactitud la proporción de los constituyentes, es decir el porcentaje de perlita y el porcentaje de ferrita, se recurrió al programa IMAGE J de análisis de imágenes.

Con este programa, se binarizó la imagen del acero ASTM A36, ver la figura N° 4.7, y se calculó el porcentaje blanco (255) sobre el porcentaje de negro (0) en la escala de colores HTML.

**Figura N° 4. 7. Imagen binarizada del acero ASTM A36**



Fuente: elaboración propia con IMAGE J

**Tabla N° 4. 8. Resultado del análisis de imagen del acero ASTM A36**

Resultado ASTM A36					
File	Edit	Font			
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Median
a36 500-3.tif	1	764027	764027	78.961	255

Fuente: elaboración propia con IMAGE J

De la tabla N° 4.8 se observa que el porcentaje de ferrita (blanco) es de 78.961 %, y por ende el porcentaje de perlita es de 21.039 %.

**Interpretación.** A partir de la microestructura observada para el acero ASTM A36, se concluye que presenta un tamaño y forma de grano normal, así como una proporción de microconstituyentes normales, esto es de 79% de ferrita y 21% de perlita.

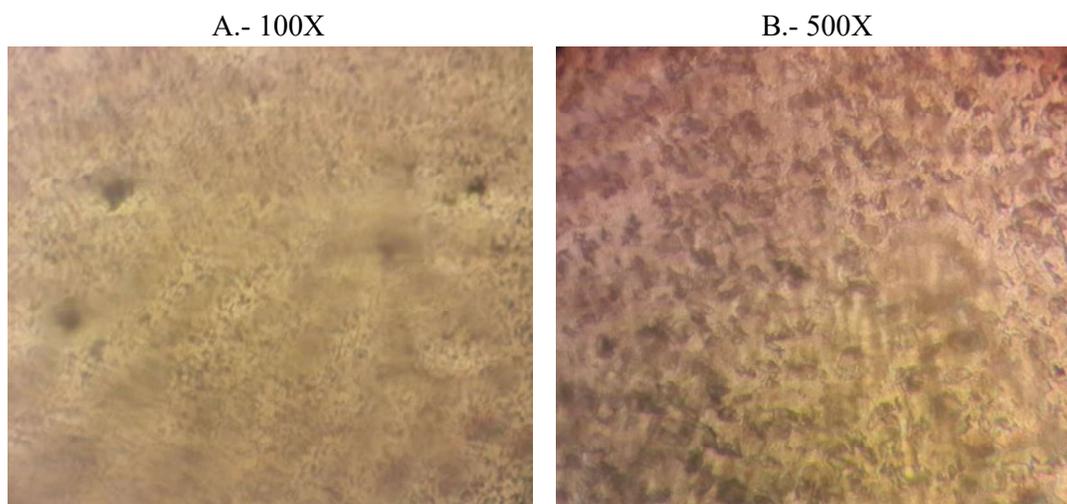
En consecuencia, presenta propiedades de alta tenacidad, que se traduce en la resistencia a la tracción, de 400 a 550Mpa, esto por presentar granos finos y buena cantidad de perlita (21 %). Y alta ductilidad, que se traduce el alargamiento, de 20%, por presentar una matriz ferrítica, además de presentar granos equiaxiales.

#### **4.1.5.2. Análisis e interpretación para el acero ASTM A607 GRADO 50**

##### **- Resultados**

En la figura N° 4.8 se presenta la microestructura para el metal base del acero ASTM A607 grado 50, en los aumentos de 100X y 500X.

**Figura N° 4. 8. Microestructura del acero A607 GRADO 50 a 100X y 500X**



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de la escuela de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

**Tabla N° 4. 9. Análisis químico del acero A607 GRADO 50**

Designación	C (%)	Mn (%)	P (%) Máx.	S (%) Máx.	Si (%) Máx.	V (%) Máx.	Nb (%) Máx.	Ti (%) Máx.	Al (%) Máx.
DIN S355MC	0.12	1.5	0.025	0.02	0.5	0.2	0.09	0.15	0.015

Fuente: [http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition\\_eu.php](http://www.steelnumber.com/en/steelcomposition_eu.php) (s.f.)

#### - Análisis e interpretación

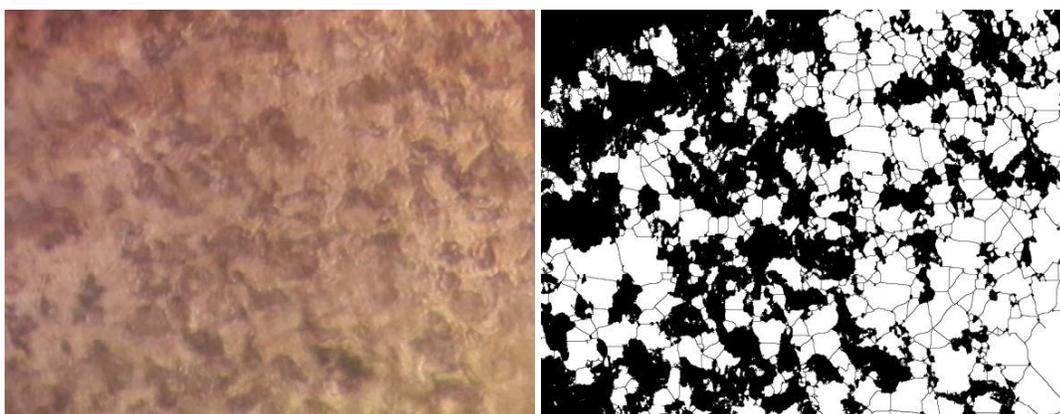
##### Análisis

En la figura N° 4.8 se muestran los aumentos, de 100X y de 500X. Nótese que, en el aumento de 100X se logra distinguir un tamaño de grano ASTM N° 8, este tamaño es un tamaño de grano estándar para un acero con 0.2% de C.

Además, a partir de la tabla N° 4.9 se deduce una matriz ferrítica de color amarillo, con granos perlíticos de color oscuro, sin embargo, se deduce que también se encuentran carburos de algunos elementos aleantes, como es el caso del carburo de Vanadio y Titanio, que también se presentan de color oscuro.

Por otro lado, en el aumento a 500X se visualiza con mayor nitidez la forma equiaxial de los granos perlíticos sobre la matriz ferrítica. Para un mejor análisis, con el software IMAGEJ, se binarizó la imagen del acero ASTM A607 GRADO 50, ver la figura N° 4.9, y se calculó el porcentaje blanco (255) sobre el porcentaje de negro (0) en la escala HTML.

**Figura N° 4. 9. Imagen binarizada del acero ASTM A607 GRADO 50**



Fuente: elaboración propia con IMAGE J

**Tabla N° 4. 10. Resultado del análisis de imagen del acero ASTM A607 grado 50**

Resultado S355MC					
File Edit Font					
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Median
s355mc - 1-2.png	1823	587922	322.502	52.619	255

Fuente: elaboración propia con IMAGE J

De la tabla N° 4.10 se observa que el porcentaje de ferrita (blanco) es de 52.619 %, y por ende el porcentaje de perlita y de carburos de vanadio y titanio son de 47.381 %.

### **Interpretación**

A partir de la microestructura observada para el acero ASTM A607 grado 50, se concluye que presenta un tamaño normal, es decir, presenta un tamaño de grano ASTM N°8. También presenta un forma de grano equiaxial.

Por otro lado, la proporción de microconstituyentes, de 52% de ferrita y 48% de perlita, es congruente para un acero de alta resistencia y de baja aleación, puesto que también se encuentran, incluido en porcentaje de perlita, los carburos de los elementos aleantes, como es el caso de carburo de Vanadio y carburo de Titanio.

En consecuencia, en cuanto a sus propiedades mecánicas, presentan alta tenacidad, y alto límite elástico, de 355 Mpa, por presentar buena cantidad de perlita y carburos de vanadio y titanio (47.381%). Sin embargo, también tiene buena ductilidad, que se traduce el alargamiento, de 19%, por presentar una matriz ferrítica, además de presentar granos equiaxiales.

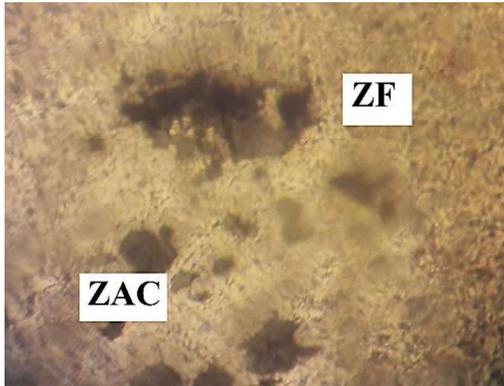
### 4.1.5.3. Análisis e interpretación para la soldadura con el electrodo E 7018

#### - Resultados

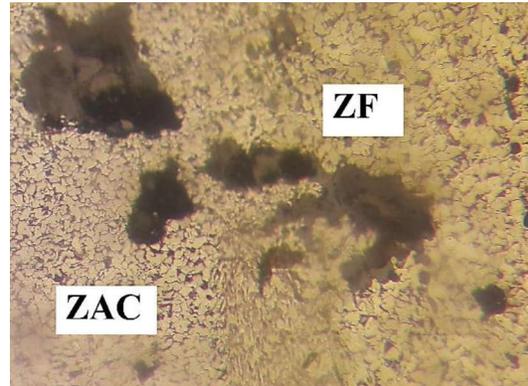
En la figura N° 4.10 se presentan las microestructuras presentadas en la probeta soldada con el electrodo E 7018.

**Figura N° 4. 10. Microestructuras de la probeta soldada con el electrodo E7018**

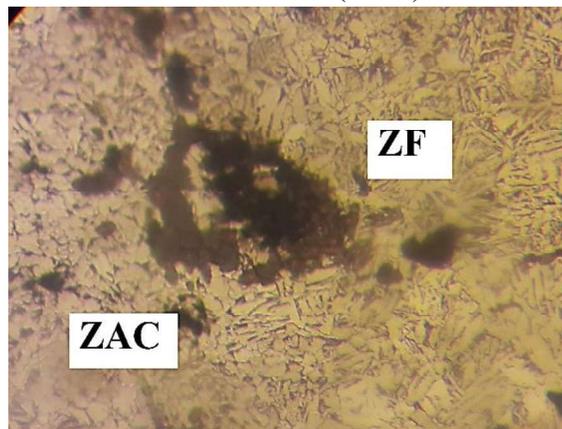
A. ZAC – ZF (100X)



B. ZAC – ZF (200X)



C.- ZAC – ZF (500X)



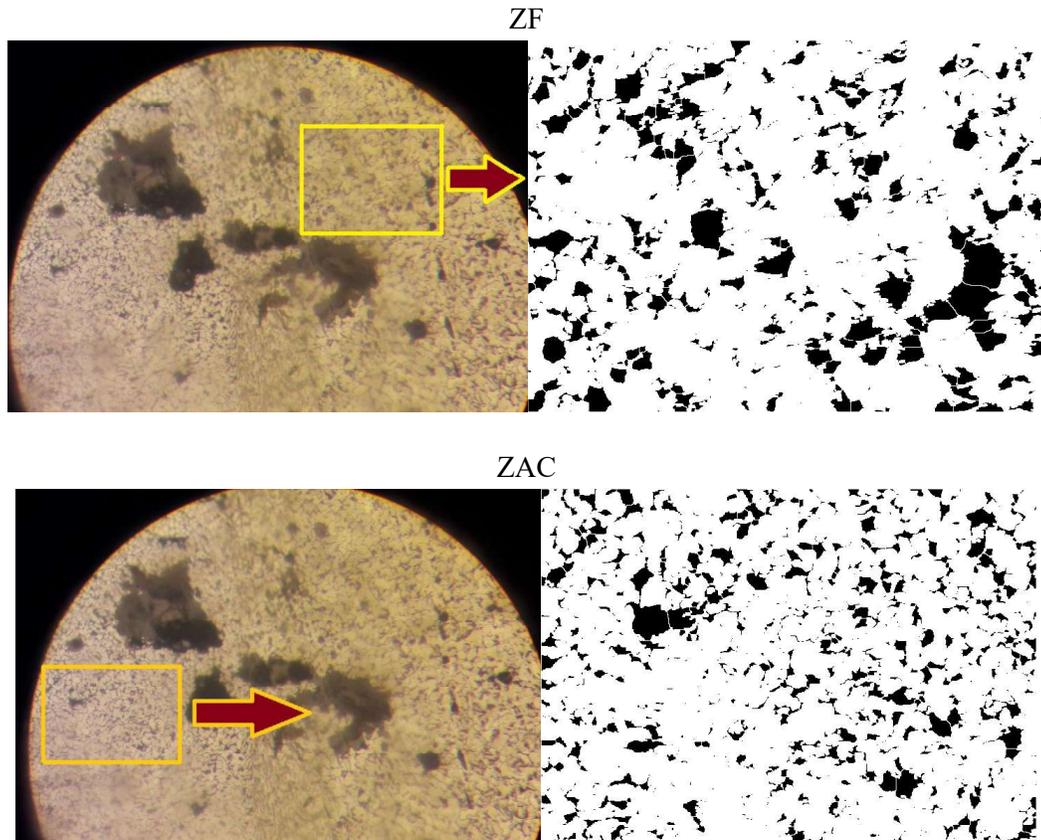
Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de la escuela de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

#### - Análisis e interpretación

##### Análisis

En el aumento 100X se observa un tamaño de grano ASTM N°8 tanto en la ZF como en la ZAC. Sin embargo, en el aumento 200X y 500X se evidencia un cambio de forma de grano para la ZF, es decir, se presenta de una forma estriada, en comparación de la ZAC, que conserva su forma equiaxial. La forma estriada de la ZF es una combinación de ferrita acicular y ferrita de Widmanstaetten, que es característicos en depósitos de soldadura. Para determinar la proporción de ferrita y perlita, se empleó IMAGE J, ver figura N° 4.11.

**Figura N° 4. 11. Binarización de la soldadura con E7018 en la ZF – ZAC**



Fuente: elaboración propia con IMAGE J

**Tabla N° 4. 11. Resultados del análisis de imagen con E7018 en la ZF y en la ZAC**

Resultados con el electrodo E7018 en la ZF y ZAC					
File	Edit	Font			
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Median
7018 ZF.tif	1	351819	351819	82.989	255
7018 ZAC.tif	1	309801	309801	86.112	255

Fuente: elaboración propia con IMAGE J

En consecuencia en la tabla N° 4.11 se muestra los resultados del análisis de imagen, donde:

- En la ZF tiene **82.989% ferrita y 17.011% perlita,**
- En la ZAC presenta un **86.111% de ferrita y 13.889% perlita.**

### Interpretación

Se conservó un tamaño de grano fino para las dos zonas, tanto para la ZAC como para la ZF, es decir un tamaño de grano ASTM N°8. Esto quiere decir que no hubo crecimiento de grano durante los cambios microestructurales. Por otro lado, se observó que en la ZF la presencia

de granos aciculares, y también de se visualizó granos de Widmanstatten. Con esto, se puede afirmar que se conserva una elevada tenacidad y limite elástico.

En cuanto a la proporción de microconstituyentes en las dos zonas, ZAC y ZF, se obtuvo mayores porcentajes de ferrita, de 86 y 83 % de ferrita, frente a los porcentajes de perlita. Esto indica también, una mayor ductilidad de la junta soldada.

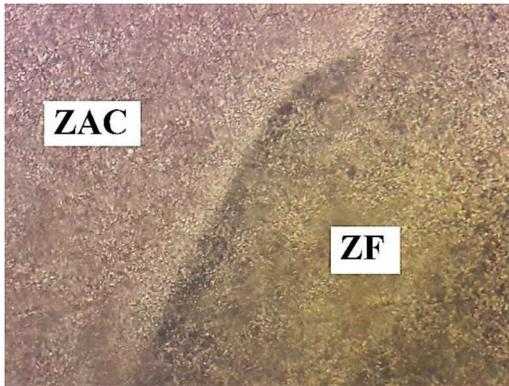
#### 4.1.5.4. Análisis e interpretación para la soldadura con el electrodo E8018

##### - Resultados

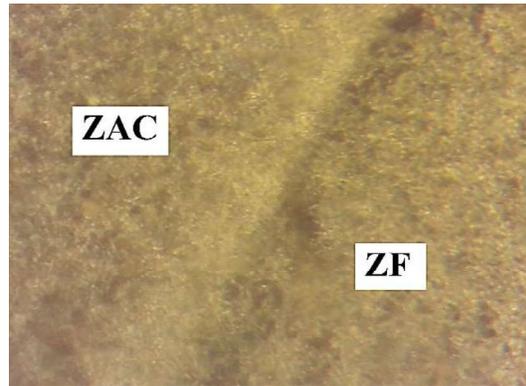
En la figura N° 4.12 se muestran las microestructuras de la probeta soldada con el electrodo E 8018.

**Figura N° 4. 12. Microestructuras de la soldadura con el electrodo E 8018**

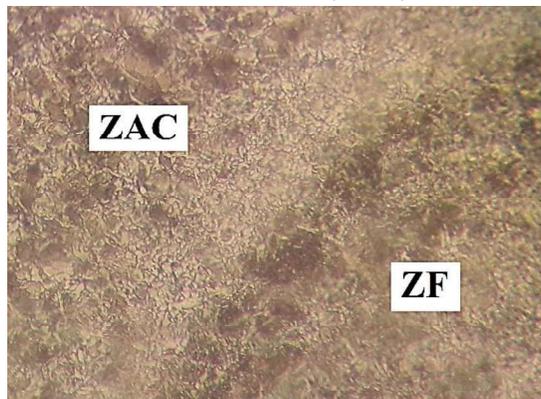
A. ZAC – ZF (100X)



B. ZAC – ZF (200X)



C.- ZAC – ZF (500X)



Fuente: [Fotografía de Alex Yucra] (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2019)

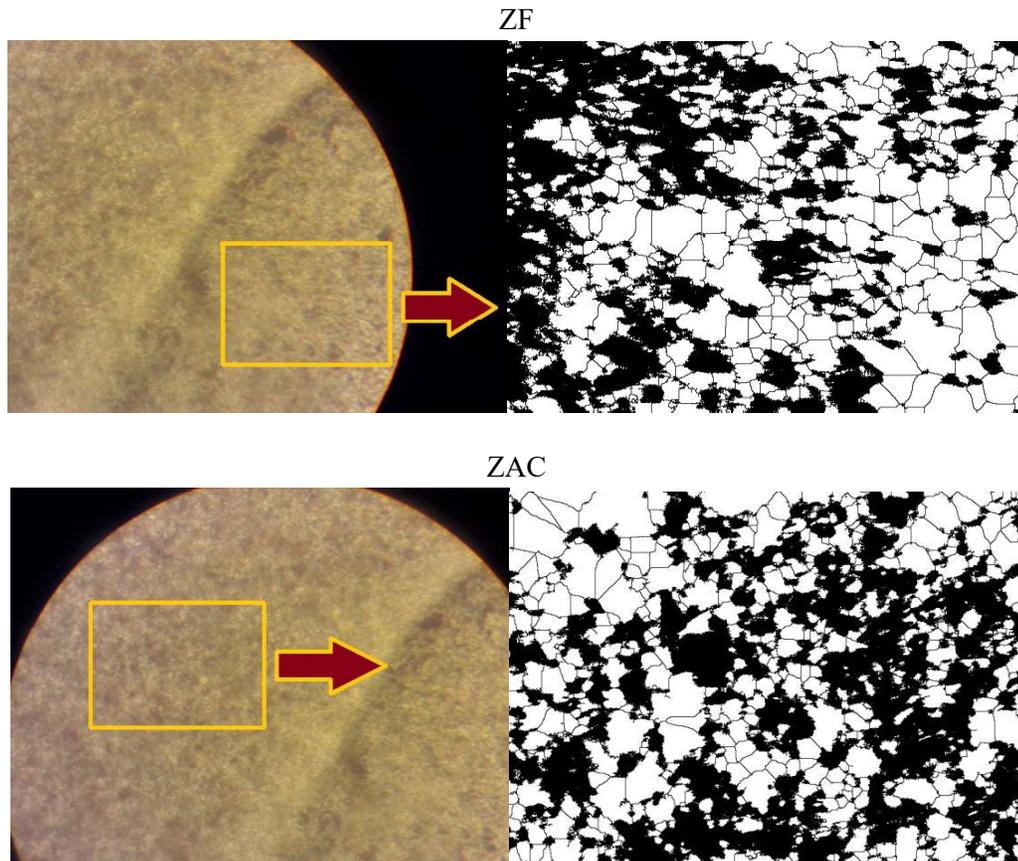
##### - Análisis e interpretación

##### Análisis

En el aumento 100X se observa un tamaño de grano ASTM N°8 tanto en la ZF como en la ZAC. Sin embargo, en el aumento 200X y 500X se evidencia un cambio de forma de grano

para la ZF, es decir, se presenta de una forma estriada, en comparación de la ZAC, que conserva su forma equiaxial. La forma estriada de la ZF es una combinación de ferrita acicular y ferrita de Widmanstaetten, que es característicos en depósitos de soldadura. Para determinar la proporción de ferrita y perlita, se empleó IMAGE J, ver figura N° 4.13.

**Figura N° 4.13. Binarización de la soldadura con E8018 en la ZF – ZAC**



Fuente: elaboración propia con IMAGE J

**Tabla N° 4.12. Resultados del análisis con E8018 en la ZF y en la ZAC**

Resultados con el electrodo 8018 (lateral) en la ZF y en la ZAC					
File	Edit	Font			
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Median
8018 L ZF.png	1255	260557	207.615	58.191	255
8018 L ZAC.png	1497	286176	191.166	52.181	255

Fuente: elaboración propia con IMAGE J

En consecuencia en la tabla N° 4.12 se muestra los resultados del análisis de imagen, donde:

- En la ZF tiene **58.191% ferrita y 41.809% perlita,**
- En la ZAC presenta un **52.181% de ferrita y 47.819% perlita.**

## Interpretación

El tamaño de grano para las dos zonas, tanto para la ZAC como para la ZF, fue un tamaño de grano ASTM N°8. Esto quiere decir que no hubo crecimiento de grano durante los cambios microestructurales. Por otro lado, se observó que en la ZF la presencia de granos aciculares, y también de se visualizó granos de Widmanstatten. Con esto, se puede afirmar que se conserva una elevada tenacidad y límite elástico. En cuanto a la proporción de microconstituyentes en las dos zonas, ZAC y ZF, se obtuvo mayores porcentajes de ferrita, de 86 y 83 % de ferrita, frente a los porcentajes de perlita. Esto indica también, una mayor ductilidad de la junta soldada.

### 4.1.6. INTERPRETACION DE RESULTADOS PARA EL CÁLCULO DE ANCHO DE LA ZAC Y PARA EL CÁLCULO DE DILUCIÓN

#### 4.1.6.1. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL ANCHO DE LA ZAC

En la tabla N° 4.13 se muestran los resultados del cálculo del ancho de la ZAC.

**Tabla N° 4. 13. Resultados del cálculo del ancho de la ZAC**

Pase	Intensidad de corriente (A)	Velocidad de avance (mm/s)	Calor neto (J/mm)	Ancho de la ZAC (mm)
Raíz	80	1.38	753.62	3.95
Relleno	125	1.84	883.15	4.63
Acabado	125	1.85	878.38	4.61
Relleno	135	1.81	969.61	5.09
Acabado	135	1.84	953.80	5.00

Fuente: elaboración propia

De la tabla N° 4.13 se observa que cuando se trabajan con intensidades de corriente menores se obtienen menores anchos de la ZAC, tal es el caso de trabajar con 125A. De ahí denota la importancia de trabajar con amperajes menores, para lograr soldadura de mejor resistencia.

#### 4.1.6.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL CÁLCULO DE DILUCIÓN

**Tabla N° 4. 14. Resultados del cálculo de dilución**

Pase	Dilución (%)				Promedio (%)
	DA1 (%)	DA2 (%)	DB (%)	DTOTAL (%)	
Raíz	11.96	11.96	-	23.92	26.52
Relleno	9.86	9.86	9.94	29.66	
Acabado	4.54	4.54	16.90	25.98	

A1 = Acero A607, A2 = Acero A36, B = Cordón anterior

Fuente: elaboración propia

De la tabla N° 4.14 se observa que el pase de relleno presentó una mayor dilución total, de 29.66%, frente a las diluciones presentadas en el pase raíz y de acabado. Sin embargo, es una dilución aceptable y que se presenta en general para este tipo de junta, esto es junta de ranura en V con penetración completa. Por lo cual, el porcentaje de dilución es aceptable.

#### 4.1.6.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL DEPÓSITO DE SOLDADURA.

- Para la probeta soldada con el electrodo E7018

**Tabla N° 4. 15. Resultados de la composición química del depósito de soldadura con el electrodo E7018**

Pase	Electrodo	Composición química del depósito de soldadura				
		C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
<b>Raíz</b>	E 6011	0.091	0.62	0.031	0.027	0.29
<b>Relleno</b>	E 7018	0.082	0.99	0.024	0.024	0.53
<b>Acabado</b>	E7018	0.068	1.01	0.022	0.022	0.57

Fuente: elaboración propia

- Para la probeta soldada con el electrodo E8018

**Tabla N° 4. 16. Resultados de la composición química del depósito de soldadura con el electrodo E8018**

Pase	Electrodo	Composición química del depósito de soldadura				
		C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
<b>Raíz</b>	E 6011	0.091	0.62	0.031	0.027	0.29
<b>Relleno</b>	E 8018	0.089	1.13	0.024	0.024	0.32
<b>Acabado</b>	E 8018	0.076	1.16	0.022	0.022	0.35

Fuente: elaboración propia

Interpretación. Se puede observar que, el porcentaje de carbono del depósito de soldadura, entre 0.07%C a 0.09%C, es muy inferior frente a la composición de los metales base. Esto debido principalmente a la influencia del metal de aporte, que posee una composición menor de carbono, entre 0.05%C a 0.06%C. Esto quiere decir, que el cordón de soldadura debe presentar un comportamiento dúctil y tenaz, esto con la finalidad de evitar fisuras.

De la misma forma, para los demás elementos de la composición química del depósito de soldadura, están influidas directamente por la composición química del metal de aporte y también están influidas por la dilución. Esto influye el comportamiento mecánico final del cordón de soldadura.

## 4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los ensayos para evaluar la soldabilidad del acero DIN S355MC con el acero ASTM A36 determinaron lo siguiente:

- **En la inspección visual**, se verificó que las dieciséis probetas soldadas no tuvieron discontinuidades, ni presencia de grietas, ni socavaciones que pudieran comprometer la sanidad de la soldadura.
- **En el ensayo de dobles**, se determinó que 12 probetas de 16, pasaron exitosamente la prueba. De las cuales 8 trabajaron con un amperaje de 125 A. Esto indica que no hubo presencia de grietas en el cordón de soldadura cuando se evaluó su resistencia.
- **En el ensayo de dureza**, se obtuvo una dureza de 27 HRC en la ZAC, frente a la dureza de los metales base de 25 HRC, de la probeta que fue soldada con las siguientes condiciones de soldabilidad: Metal de aporte: E7018, Intensidad de corriente: 125 A y Ángulo de avance del electrodo: 10°. Esto significa que, no se endureció la junta producto de la alteración microestructural ocasionada por el proceso de soldadura. Por otro lado, mediante el software Minitab se obtuvo el siguiente modelo matemático:  $Dureza\ HRC = -208.9 + 1.825 B + 11.74 C - 0.0875 BC$ . Donde la variable más influyente en la soldabilidad es la Intensidad de corriente.
- **En el ensayo de Charpy**, se determinó que las juntas soldadas presentaron una ligera pérdida de ductilidad en comparación del metal base, esto es 23 Kg.m frente a 26Kg.m. Es decir, hubo una ligera fragilidad como consecuencia de los cambios microestructurales de la soldadura.
- **En el ensayo metalográfico**, se obtuvo un tamaño de grano ASTM N° 8 tanto en la ZF como en la ZAC. La forma de los granos en la ZAC se mantuvieron equiaxiales, y en la ZF se manifestaron en forma del grano de Widmanstaetten, característicos en depósitos de soldaduras. Mediante el software IMAGE J se determinó una proporción de microconstituyentes de: 60 %ferrita y 40 %perlita, junto con la presencia de carburos de Vanadio y Titanio. Esta proporción nos garantiza alta tenacidad de la junta de soldadura.
- **En los cálculos de soldadura**, se obtuvo un ancho de la ZAC de 3.15 mm en el pase acabado cuando se trabajó con un amperaje de 125 A, en el cálculo de dilución se obtuvo, 26 % de dilución total. Se obtuvo la siguiente composición química del depósito de soldadura: %C: 0.068, %Mn: 1.01, %P: 0.022, % S: 0.022 y %Si: 0.57. Estos resultados son los adecuados en soldaduras de buena calidad.

## CONCLUSIONES

1. En el ensayo de dureza en la ZAC, dentro del acero ASTM A607 GRADO 50, se obtuvo un valor de 27 HRC, frente a la dureza de los metales base de 25 HRC, es decir, no hubo endurecimiento elevado de la ZAC producto de los cambios microestructurales de la soldadura, cuando se trabajó con las siguientes condiciones de soldabilidad: Tipo de electrodo: E7018 (supercito), Intensidad de corriente: 125 A, y Ángulo de avance del electrodo: 10° (respecto a la perpendicular). Teniéndose el siguiente modelo matemático:  $Dureza\ HRC = -208.9 + 1.825 B + 11.74 C - 0.0875 BC$ ; donde, la variable con mayor incidencia en la soldabilidad fue la Intensidad de corriente, seguido del ángulo de avance del electrodo y tipo de electrodo. En ese sentido, la unión por soldadura del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW, en el alargue de chasis para el ensamble carrocería para buses, demostró tener una excelente soldabilidad.
2. De la misma forma, en el ensayo de impacto de Charpy se determinó que las juntas soldadas presentaron una ligera pérdida de ductilidad en comparación del metal base, esto es de 23 Kg.m frente a 26Kg.m. En el ensayo metalográfico, se obtuvo un tamaño de grano ASTM N° 8 tanto en la ZF como en la ZAC. La forma de los granos en la ZAC se mantuvieron equiaxiales, y en la ZF se manifestaron en forma del grano de Widmanstaetten, característicos en depósitos de soldaduras. Mediante el software IMAGE J se determinó una proporción de microconstituyentes de: 60 %ferrita y 40 %perlita, junto con la presencia de carburos de Vanadio y Titanio. En los cálculos de soldabilidad, se obtuvo un ancho de la ZAC de 4.63 mm y 26.52% de dilución total. Estos resultados corroboraron la excelente soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36.

## **RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar un estudio de la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 empleando el procedimiento de soldadura GMAW.
- Se recomienda trabajar con equipos estandarizados para los ensayos de soldabilidad, y con la finalidad de disminuir el error en los resultados.
- Se recomienda seguir los procedimientos establecidos en los código de soldadura, como es el caso del código de soldadura estructural AWS D1.1.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Libros

1. Águeda, E., García, J., Gómez, T., Gonzalo, J. L., & Martín, J. (2005). *Carrocería: elementos fijos* (4a ed.). Madrid: Thomson Editores Spain Paraninfo, S.A.
2. Avner, S. H. (1988). *Introducción a la metalurgia física* (2a ed.). México: McGraw-Hill.
3. AWS D1.1. (2015). AWS D1.1/D1.1M:2015. *Código de soldadura estructural, 23a.* AWS.
4. Cases, R., & Garrote, R. (1980). *Tratado de la carrocería del automóvil: construcción, reparación y pintado*. Barcelona: EDITORIAL J. MONTESO.
5. Galvery, W. L., & Marlow, F. M. (2007). *Guía de soldadura para el técnico profesional*. México: Limusa.
6. García, M. (2010). *Apuntes de soldadura: conceptos básicos*. Madrid: Bellisco.
7. Jeffus, L. (2009). *Soldadura: principios y aplicaciones* (5ta ed.). Madrid: Paraninfo.
8. Miranda Zanardi, L. F., & Medina de Miranda, E. (2015). *Investigando en ingeniería*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
9. Neely, J. E. (2000). *Metalurgia y materiales industriales*. México: Limusa, S.A.
10. OERLIKON. (2001). *Manual de soldadura*. Lima: Exsa S.A.
11. Piredda, M. V. (1984). *Soldadura eléctrica manual* (2a ed.). México: Limusa.
12. Rodríguez, D. (2010). *Soldadura; tecnología y técnica de los procesos de soldadura* (2a ed.). Madrid: Bellisco.
13. Segovia, S. (2012). *Manual de soldadura: ejercicios prácticos de soldadura al arco, electrodo revestido*. Madrid: A: Madrid Vicente, ediciones.
14. Villeger, Y. (1980). *Reparación de carrocerías: técnica y práctica*. Barcelona: EDICIONES CEAC, S.A.

### Sitios Web

- Aguilar Schafer, J. A. (s.f.). *Soldadura de arco eléctrico*. Recuperado el 5 de diciembre de 2018, de [http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro\\_ma/17.pdf](http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/17.pdf)
- Albuja Jácome, J. E., & Ramos Córdova, L. H. (2016). *Diseño y estudio de factibilidad de construcción de un bastidor para chasis de bus con fines de producción nacional*. Obtenido de <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/4556>
- Asai Arrieta, M., & Olvera Larios, J. (2014). *Análisis mecánico de un prototipo de autobús tipo entrada baja para transporte público*. Obtenido de <https://www.google.com/search?q=An%C3%A1lisis+mec%C3%A1nico+de+un+prototipo+de+autob%C3%BAs+tipo+entrada+baja+para+transporte+p%C3%BAblico>

o&oq=An%C3%A1lisis+mec%C3%A1nico+de+un+prototipo+de+autob%C3%BA+tipo+entrada+baja+para+transporte+p%C3%BAblico&aqs=ch

- Ayma Nuñez, H. (2015). *Gestión de calidad aplicada a los procesos de soldadura para flota de camiones caterpillar en minera Yanacocha - proyecto soldadura*. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2713>
- Calle, G., & Edison, H. (s.f.). *Dureza Rockwell*. Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de <http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/durezarockwell.pdf>
- César Cisneros, A. (2015). *Calidad de uniones soldadas en la estructura de autobuses*. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/8841/Tesina.pdf?sequence=1>
- Diagrama de fases (hierro-carbono)*. (2015). Recuperado el 15 de diciembre de 2018, de <https://tratamientodelosmetales.wordpress.com/2015/11/14/diagramas-de-fases-hierro-carbon-y-regla-de-la-palanca/>
- Ensayo Brinell*. (s.f.). Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de [http://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema03/121\\_ensayo\\_brinell.html](http://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema03/121_ensayo_brinell.html)
- Ensayo de resiliencia*. (s.f.). Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/15\\_ensayo\\_de\\_resiliencia.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4913/html/15_ensayo_de_resiliencia.html)
- Ensayos de Rockwell*. (s.f.). Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/pfcm2\\_7\\_3](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/pfcm2_7_3).
- Equivalencias entre durezas*. (s.f.). Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de <https://www.cemausa.com/docs/DUREZA.pdf>
- FC BUS*. (s.f.). Recuperado el 20 de diciembre de 2018, de [http://www.hinoperu.com.pe/venta\\_buses\\_transporte\\_urbano\\_turistico\\_interprovincial\\_japoneses\\_fc\\_bus.php](http://www.hinoperu.com.pe/venta_buses_transporte_urbano_turistico_interprovincial_japoneses_fc_bus.php)
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseños de experimentos* (2a ed.). México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.
- INDURA. (s.f.). *Manual de mantenimiento*. Recuperado el 10 de diciembre de 2018, de <http://www.indura.com.pe/Descargar/Manual%20de%20Electrodos%20de%20Mantenimiento%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fpe%2Fbiblioteca%2F88b5e916117e44998a73030487259a53.pdf>
- Janampa Huancollo, J. P., & Surco Alzamora, J. L. (2015). *Estudio de la soldabilidad del acero ASTM A36 con el el acero VCL mediante el proceso SMAW*. Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de <https://es.scribd.com/document/308674686/1-Estudio-de-La-Soldabilidad-de-Acero-Astm-a-36-Con-Acero-Vcl-Mediante-El-Proceso-Smaw-y-Pos>

- Jaque, D. G., & Morales, Á. F. (s.f.). *Propuesta de reorganización técnica-económica de los procesos de producción para las carrocerías*. Recuperado el 20 de diciembre de 2018, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1443/1/85T00159.pdf>
- La Barbera Sosa, J. G. (s.f.). Recuperado el 10 de diciembre de 2018, de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Diseno-de-las-probetas-de-junta-soldada-para-los-ensayos-de-a-Traccion-y-b\\_fig3\\_44200296](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Diseno-de-las-probetas-de-junta-soldada-para-los-ensayos-de-a-Traccion-y-b_fig3_44200296)
- LINCOLN ELECTRIC. (s.f.). *Soldeo manual con electrodos revestidos (SMAW)*. Recuperado el 5 de diciembre de 2018, de <https://www.solysol.com.es/data/documents/soldadura=20electrodo=20rec.doc.pdf>
- MIPSA. (s.f.). *Soldadura de arco de metal y gas - GMAW*. Recuperado el 5 de diciembre de 2018, de <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Procesos/Soldadura-GMAW>
- Morrall, F. R., Jimeno, E., & Molera, P. (1985). *Metalurgia general*. Barcelona: EDITORIAL REVERTÉ, S.A.
- Pérez, M. Á., & Pullas, L. M. (2009). *Influencia de la utilización de insertos de varilla corrugada sobre las soldaduras de perfil estructural*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf>
- Procesos de manufactura y materiales*. (2014). Recuperado el 30 de noviembre de 2018, de <http://procesosdemanufacturaymateriales.blogspot.pe/2014/08/soldadura-por-arco-electrico-proceso-de.html>
- Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido*. (s.f.). Recuperado el 20 de diciembre de 2017, de [https://procesosunefa.wikispaces.com/file/view/Proceso\\_SMAW.pdf](https://procesosunefa.wikispaces.com/file/view/Proceso_SMAW.pdf)
- Soldadura TIG - GTAW*. (s.f.). Recuperado el 5 de diciembre de 2018, de [http://www.sapiensman.com/tecnoficio/soldadura/soldadura\\_TIG.php](http://www.sapiensman.com/tecnoficio/soldadura/soldadura_TIG.php)
- Soldeo y sus procedimientos*. (s.f.). Recuperado el 5 de diciembre de 2018, de <http://html.rincondelvago.com/soldeo-y-sus-procedimientos.html>
- SOLDEXA. (s.f.). *Manual de soldadura y catalogo de productos*. Recuperado el 30 de 01 de 2017, de [https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/support/documentation/upload/manual\\_de\\_bolsillo.pdf](https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.pdf)
- Supervisión de Estructuras de Concreto y de Acero*. (s.f.). Recuperado el 20 de 08 de 2019, de <https://sites.google.com/site/construyetuingenio2013/5-procesos-de-soldadura-y-corte/5-1-soldadura-por-arco-de-metal-protegido-smaw>
- Tecnologías de unión*. (s.f.). Recuperado el 15 de diciembre de 2018, de <http://slideplayer.es/slide/85166/>
- Wikipedia. (s.f.). *Inspección por líquidos penetrantes*. Recuperado el 11 de diciembre de 2018, de [https://es.wikipedia.org/wiki/Inspecci%C3%B3n\\_por\\_l%C3%ADquidos\\_penetrantes](https://es.wikipedia.org/wiki/Inspecci%C3%B3n_por_l%C3%ADquidos_penetrantes)

# **ANEXOS**

## ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA

### SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A607 GRADO 50 CON EL ACERO ASTM A36 POR EL PROCESO SMAW EN EL ALARGUE DEL CHASIS PARA EL ENSAMBLE DE CARROCERIAS DE BUSES

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSION	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general</b> ¿Cómo es la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW en el alargue del chasis para el ensamble de carrocerías de buses?</p> <p><b>Problemas específicos</b> - ¿De qué manera el tipo de electrodo incide en la soldabilidad del acero A607 GRADO 50 con el acero A36? - ¿De qué manera la intensidad de corriente incide en la soldabilidad del acero A607 GRADO 50 con el acero A36? - ¿De qué manera el ángulo de avance del electrodo incide en la soldabilidad del acero A607 GRADO 50 con el acero A36?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Establecer la soldabilidad del acero ASTM A607 GRADO 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW en el alargue del chasis para el ensamble de carrocerías de buses.</p> <p><b>Objetivos específicos</b> - Encontrar de qué manera el tipo de electrodo incide en la soldabilidad del acero ASTM 607 grado 50 con el acero ASTM A36. - Determinar de qué manera la intensidad de corriente incide en la soldabilidad del acero ASTM A607 grado 50 con el acero ASTM A36. - Identificar de qué manera el ángulo de avance del electrodo incide en la soldabilidad del acero ASTM A607 grado 50 con el acero ASTM A36</p>	<p><b>Hipótesis general</b> La soldabilidad del acero ASTM A607 grado 50 con el acero ASTM A36 por el proceso SMAW, en el alargue del chasis para el ensamble de carrocerías de buses, es excelente cuando se consideran las condiciones de soldabilidad.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b> - El tipo de electrodo incide de una manera positiva en la soldabilidad del acero A607 grado 50 con el acero A36 por el proceso SMAW. - La intensidad de corriente incide de una manera positiva y significativa en la soldabilidad del acero A607 grado 50 con el acero A36 por el proceso SMAW. - El ángulo de avance incide de una manera positiva en la soldabilidad del acero A607 grado 50 con el acero A36 por el proceso SMAW.</p>	<p><b>Variable dependiente</b> - Soldabilidad</p> <p><b>Variables independientes</b> - Tipo de electrodo - Intensidad de corriente - Ángulo de avance</p> <p><b>Variables intervinientes</b> - Composición química del acero - Humedad</p>	<p>- Dureza de la ZAC - Tenacidad al impacto - Microestructura de la ZAC</p> <p>- Código AWS del electrodo - Amperios (A) - Grados sexagesimales (°)</p> <p>- Porcentaje del elemento (%) - Porcentaje de humedad (%)</p>	<p><b>Tipo de investigación</b> Es aplicada o experimental</p> <p><b>Diseño de la investigación</b> Se aplicó el diseño factorial 2<sup>3</sup> con dos replicas</p> <p><b>Población</b> Chasis original para bus de las marcas Hino, Mitsubishi, Volvo y otras.</p> <p><b>Muestra</b> Porción de chasis de 100 mm de ancho</p>

## ANEXO B: Ficha técnica del chasis Volvo B270F



**VOLVO B270F**  
EURO 5



Volvo Buses. Driving quality of life.

### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

#### MOTOR

Motor diesel, 7,2 litros, vertical, delantero, totalmente electrónico, inyección de combustible con tecnología common rail, 6 cilindros en línea, turboalimentado e intercooler, autoprotección contra sobrecalentamiento. Nivel de emisiones según la reglamentación EURO V. Compresor de aire Lk39. Freno motor con válvula mariposa.

Motor	Potencia	Torque
MWM 7B270 EUV	201 kW (270 CV)	950 Nm (97 kgfm)

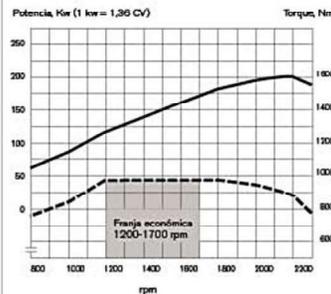
#### EJE DE TRACCIÓN

Eje Méritor MS23-158 reducción simple. Rodamientos de rueda libres de mantenimiento.

#### EJE DELANTERO

Eje rígido en acero especial con perfil "L". Forjado y tratado térmicamente. Rodamientos de rueda libres de mantenimiento.

#### MWM7B270 Potencia/Torque



#### TRANSMISIÓN

CAJA EATON FSB 6406B (URBANO) (estándar)

Mecánica, 6 marchas totalmente sincronizadas.

Relaciones: 1ª marcha: 8,03:1  
Última marcha: 1,00:1

CAJA EATON FSO 6406A (CARRETERA) (opcional)

Mecánica, 6 marchas totalmente sincronizadas.

Relaciones: 1ª marcha: 7,05:1  
Última marcha: 0,78:1

#### SISTEMA DE POSTRATAMIENTO

Sistema SCR (Selective Catalytic Reduction). Compuesto por un depósito de AdBlue, unidad de dosificación, convertidor catalítico y unidad de mando. Calentador de urea.

#### RELACIÓN DE DIFERENCIAL

4,56:1 (opcional 4,10:1 / 4,88:1)



# VOLVO B270F **EURO 5**

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

### SUSPENSIÓN

Neumática trasera.

### CHASIS

Estructura de alta resistencia y bajo peso.  
Acero S355MC

### SISTEMA DE FRENOS

Circuito doble de freno de aire comprimido con ajuste automático de desgaste de foros, freno de estacionamiento del tipo muelles acumuladores con actuación en las ruedas traseras, freno a tambor del tipo S-Came en todas las ruedas. Secador de aire incluido. Frenos antibloqueo ABS.

### EQUIPOS ELÉCTRICOS

Motor de partida Melco 5,5kW. Sistema doorbrake.

Nº de baterías	2
Tensión	24V
Baterías	2 x 170 Ah
Alternador	1 x 80 A

### COMPUTADORA DE ABORDO

Funciones disponibles: diagnóstico de fallas, voltímetro, reloj, alarma, velocidad promedio, distancia y tiempo de viaje, medidor de consumo de combustible, registros de datos del vehículo, temperatura de aceite del motor.

### LUCES DE ADVERTENCIA

Luces de baja presión de aceite del motor, baja presión de aire del freno de servicio, sobrecalentamiento del sistema de refrigeración, funcionamiento del alternador, accionamiento del sistema de precalentamiento de arranque (cuando instalado), luz alta de los faros principales, luces indicadoras de dirección, freno de estacionamiento accionado y puertas abiertas.

### TABLERO DE INSTRUMENTOS

Tacómetro, manómetros de aire de los frenos, control de intensidad de iluminación del panel, velocímetro con tacógrafo electrónico diario, liberación del freno de estacionamiento, indicador del nivel de combustible, temperatura del refrigerante.

### NEUMÁTICOS Y RUEDAS

Eje	Neumáticos	Ruedas
Delantero	295/80R22,5*	Acero 8,25" x 22,5"
De tracción	295/80R22,5*	Acero 8,25" x 22,5"

### CAPACIDAD DE LOS EJES (kgf)

Configuración	4x2
Eje delantero	6.500
Eje de tracción	10.900
Capacidad total	17.300

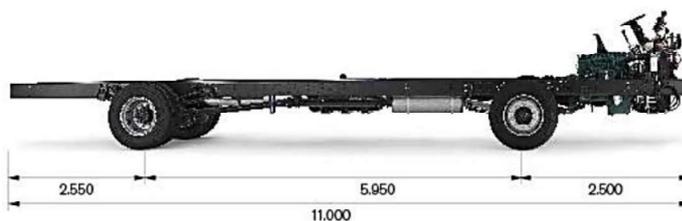
### CAPACIDADES\*

Aceite del diferencial	21 litros
Aceites de la caja de dirección	4 litros
Aceites de caja EATON FSB 6406B	9,2 litros
Aceites de caja EATON FSO 6406A	9,2 litros
Aceite del motor	24,5 litros
Depósito de combustible	50 litros
Depósito de AdBlue	21 litros

\*Valores aproximados

VTCB0008

## MEDIDAS



[www.volvobusesargentina.com.ar](http://www.volvobusesargentina.com.ar) • Centro de Atención al Cliente: 0800 444 8858 • +54 9 11 2321 5671

Fotos no contractuales. Las especificaciones técnicas aquí contenidas pueden ser modificadas sin previo aviso por Volvo Trucks & Buses Argentina SA. Todos los valores aquí indicados son aproximados.

Fuente: <https://www.volvobuses.com.ar/es-ar/our-offering/products/b270f-4x2.html> (s.f.)

## ANEXO C: Fichas técnica de los electrodo E6011, E7018 y E8018

**SMAW**

**Aceros de Bajo Carbono**

**SOLDEXA**

**EXA 6011**

Electrodo revestido del tipo celulósico, de mediana penetración, diseñado para uso con corriente alterna o continua. Presenta un arco estable y uniforme con gran facilidad en el encendido y el reencendido del electrodo, además, presenta fácil remoción de escoria, puede soldar sobre superficies ligeramente oxidadas. Es ideal para las aplicaciones en carpintería metálica.

Clasificación	
AWS A5.1 / ASME SFA-5.1	E6011

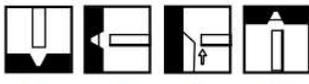
### Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0.06	0.45	0.25	máx. 0,03	máx. 0,025	-	-	-	-	-

### Propiedades Mecánicas del Metal Depositado (valores típicos)

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (20°C) [J]
Sin tratamiento	472 (68 440)	397 (57 565)	24	-

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener en un lugar seco y evitar humedad.</li> <li>No requiere almacenamiento bajo horno.</li> </ul>

Posiciones de Soldadura
P, H, Sc, Va.


### Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al positivo DCEP		
Diámetro [mm (pulg.)]	2,50 (3/32")	3,25 (1/8")
Amperaje Mínimo	50	80
Amperaje Máximo	80	110

### Aplicaciones

- Diseñada exclusivamente para la soldadura de unión de aceros de bajo carbono: perfiles, ángulos, platinas, etc. en el sector cerrajero.
- Se recomienda para la fabricación de puertas, ventanas, portones, muebles, etc.
- Ideal para trabajos de fabricación de Carpintería Metálica en general y fabricación de estructuras livianas.

Fuente: [https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/products/consumables/electrodos/upload/exa\\_6011.pdf](https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/products/consumables/electrodos/upload/exa_6011.pdf) (s.f.)

# SMAW

## Aceros al Carbono y Baja Aleación



### SUPERCITO

Electrodo revestido de tipo básico, de bajo hidrógeno con extraordinarias características mecánicas y de soldabilidad. Presenta un arco muy suave, bajo nivel de salpicaduras y la escoria es de muy fácil remoción. El contenido de hierro en polvo mejora su tasa de depósito. Dentro de su categoría es el producto que presenta los mejores niveles de resistencia a la tracción.

Clasificación	
AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1	E7018

Aprobaciones	Grados
ABS	3H15,3Y
LR	3m,3ym
GL	3Y

#### Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05	1,00	0,60	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-

#### Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]
Sin tratamiento	520 - 610 (75 400 - 88 450)	mín. 400 (58 000)	mín.23	[-30 °C (-22 °F)] mín. 70 (57)

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener en un lugar seco y evitar humedad.</li> <li>Almacenamiento en horno: 125 - 150°C.</li> <li>Resecado de 300°C a 350 °C por 2 horas.</li> </ul>

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc.

#### Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	60	90	120	170	210	
Amperaje máximo	-	90	140	190	240	280	

#### Aplicaciones

- Para aceros de mediano a alto contenido de carbono, alta resistencia y baja aleación.
- Para aceros de alto contenido de azufre y fácil fresado.
- Para aceros laminados al frío.
- Por sus características de resistencia y su fácil manejo, especialmente adecuado para: Soldaduras de tuberías de vapor, calderas de alta presión, piezas de maquinaria pesada, instalaciones de la industria petrolera, petroquímica y minera.

Nota: El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.

Fuente: <https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/products/consumables/electrodos/upload/supercito.pdf> (s.f.)

Electrodo revestido de tipo básico para soldar acero de alta resistencia, cuyo depósito es un acero de baja aleación al níquel (1% Ni). El metal depositado posee muy buena resistencia a los fenómenos de fisuración en frío y en caliente, además de tener muy buena tenacidad. Ideal para aplicaciones que implican alta resistencia a bajas temperaturas hasta -40°C.

Clasificación	
AWS A5.5 / ASME-SFA 5.5	E8018-C3

**Análisis Químico del Metal Depositado (valores típicos) [%]**

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,06	1,20	0,30	máx. 0,020	máx. 0,020	0,10	1,10	0,05	-	-

**Propiedades Mecánicas del Metal Depositado**

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]
Sin tratamiento	560 - 650 (81 200 - 94 250)	mín. 470 (68 150)	mín. 24	[-40°C (-40°F)] mín. 70 (53)

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener en un lugar seco y evitar humedad.</li> <li>Almacenamiento en horno: 125 a 150°C.</li> <li>Resecado de 400°C a 420°C por 1 hora.</li> </ul>

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc. 

**Parámetros de Soldeo Recomendados**

Para corriente alterna(AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	60	90	120	180	-	-
Amperaje máximo	-	100	140	180	270	-	-

**Aplicaciones**

- Para soldar aceros tipo T1; T1A; T1B en ciertas aplicaciones.
- Aceros de construcción de grano fino y altamente resistente (hasta 550 MPa de resistencia a la tracción).
- Aceros COR-TEN en sus diferentes grados.
- Aceros N-A-XTRA 30, N-A-XTRA 75; HSB 77 V.
- Como cojín amortiguador o capa de base para recubrimientos protectores.

Nota: El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.

Fuente: [https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/products/consumables/electrodos/upload/tenacito\\_80.pdf](https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/products/consumables/electrodos/upload/tenacito_80.pdf) (s.f.)

## ANEXO D: REGISTROS DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

### REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

**CEM INGENIEROS**  
Nombre de la compañía



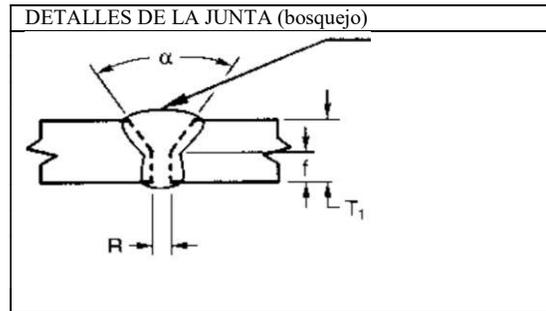
01  
N° de PQR

08  
N° de Rev.

14/03/19  
Fecha

METALES BASE	Especificación	Tipo o grado	AWS N° de grupo	Espesor	Tamaño NPS	Programa	Diámetro
Material base	ASTM A36	-	I	5/16 pulgada	-	-	-
Soldado a	DIN S355MC	-	No especifica	5/16 pulgada	-	-	-
Otro							

DETALLES DE LA JUNTA	
Tipo de ranura	Junta a tope de ranura en V con CJP
Ángulo de la ranura ( $\alpha$ )	60°
Abertura de raíz (R)	1/8 pulgada (3 mm)
Cara de la raíz (f)	2 mm
Respaldo del lado opuesto	Ninguno
Método	-
TRATAMIENTO TÉRMICO PORTERIOR A LA SOLDADURA	
Temperatura	-
Tiempo de temperatura	-
Otro	-



PROCEDIMIENTO							
Capa(s) de soldadura	-	-	-				
Pasadas de soldadura	1	2	3				
<b>Proceso</b>	SMAW	SMAW	SMAW				
Tipo (manual, mecanizado, etc.)	Manual	Manual	Manual				
<b>Posición</b>	3G	3G	3G				
Progresión vertical	Si	Si	Si				
<b>Metal de aporte (espec. de AWS)</b>							
Clasificación de AWS	E 6011	E 7018	E 7018				
Diámetro	1/8 pulgada	1/8 pulgada	1/8 pulgada				
Fabricación/ nombre comercial	OERLIKON	OERLIKON	OERLIKON				
<b>Composición de gas de protección (GTAW)</b>							
Caudal (GTAW)	-	-	-				
Tamaño de boquilla (GTAW)	-	-	-				
<b>Temperatura de precalentamiento</b>							
Temperatura entre pasadas	-	-	-				
<b>Características eléctricas</b>							
Diámetro del electrodo (GTAW)	-	-	-				
Polaridad y tipo de corriente	DCEP	DCEP	DCEP				
Amperios	80	125 - 135	125 - 135				
Voltios	20 - 23	20 - 23	20 - 23				
Alimentador de corriente, frio o caliente (GTAW)	-	-	-				
Entrada de calor máxima	-	-	-				
<b>Técnica</b>							
Cordón recto o cordón oscilado u ondulado	Recto	Oscilado	Oscilado				
Pasada única o múltiple por lado	Pasada múltiple	Pasada múltiple	Pasada múltiple				
Oscilación (GTAW mec/ aut)	-	-	-				
Número de electrodos	3	3	2				
Tiempo de permanecia	-	-	-				
Martillazo	Ninguno	Ninguno	Ninguno				
Limpieza entre pasadas	Esmerilado	Cepillo de alambre	Cepillo de alambre				

Formulario M - 1 (frente)

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

### INSPECCION VISUAL

Número de probeta	Referencia de clausula	Presencia de grietas o cráteres	Refuerzo de la soldadura	Socavación	Fusión completa de la raíz	Máxima concavidad de la raíz	Perforación por fusión máxima	Resultado
01	4.9.1. del código ANSI/ AWS D.1	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Ninguna	Aceptable
03		No presenta	Plano	1/32 pulg.	Adecuada	1/16 pulg.	1/8 pulg.	Aceptable
05		No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	1/16 pulg.	Ninguna	Aceptable
07		No presenta	Plano	No tiene	Adecuada	Ninguna	Ninguna	Aceptable
09		No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Ninguna	Aceptable
11		No presenta	1/16 pulg.	1/32 pulg.	Adecuada	1/16 pulg.	1/8 pulg.	Aceptable
13		No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Ninguna	Aceptable
15		No presenta	1/16 pulg.	1/32 pulg.	Adecuada	1/16 pulg.	1/8 pulg.	Aceptable

### DETALLE DE ENSAYO DE DOBLES

Número de probeta	Ancho	Espesor	Referencia de clausula	Suma de discontinuidades	Grieta máxima de esquina	Resultado
01	2 pulg.	5/16 pulg.	4.9.3.3 del código ANSI/ AWS D.1.1	Ninguno	Ninguno	Pasa
03				3/16 pulg. (5 mm)	1/8 pulg. (3 mm)	No pasa
05				Ninguno	Ninguno	Pasa
07				Ninguno	Ninguno	Pasa
09				Ninguno	Ninguno	Pasa
11				Ninguno	Ninguno	Pasa
13				Ninguno	1/8 pulg. (3 mm)	Pasa
15				3/16 pulg. (5 mm)	1/8 pulg. (3 mm)	No pasa

### DETALLE DE ENSAYO DE CHARPY (CVN)

Número de probeta	Referencia de clausula	Ubicación de entalla	Tamaño de probeta	Temperatura de ensayo	Energía absorbida	Expansión lateral	Resultado
ASTM A36	ASTM E23-02 - AWS B4.0	Cordón	10 mm × 8 mm	20° C	25 Kg . m	3.5 mm	Aceptable
DIN S355MC				20° C	23 Kg . m	2.5 mm	Aceptable
09				20° C	23 Kg . m	1.5 mm	Aceptable
09				100° C	26 Kg . m	2.5 mm	Aceptable

### CERTIFICACION

Nombre del soldador	Numero de ID	Numero de cello
Abel Justiniani Coronel		-

Ensayos realizados por	
Laboratorio	CEM INGENIEROS
Numero de ensayo	PQR 01

Los firmantes, certifican que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras de prueba fueron preparadas, soldada y probadas en conformidad con los requisitos de la Sección 4 de AWS DI 1/01 1M, (2015) Código de soldadura estructural – Acero

Título	
Gerente de CEM INGENIEROS E.I.R.L.	
Nombre	Firma
Ing. Raúl Allauca Sierra.	
Fecha	
14/03/19	

**Raúl Allauca Sierra**  
NIVEL II - ASNT



## REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

CEM INGENIEROS  
Nombre de la compañía



02  
N° de PQR

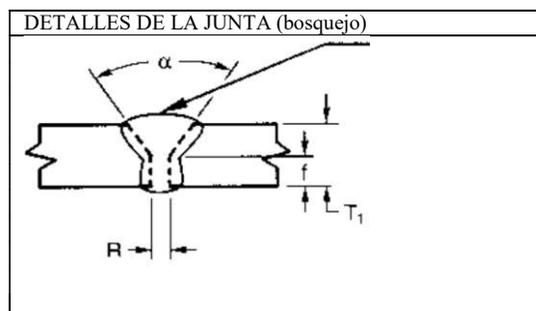
08  
N° de Rev.

14/03/19  
Fecha

METALES BASE	Especificación	Tipo o grado	AWS N° de grupo	Espesor	Tamaño NPS	Programa	Diámetro
Material base	ASTM A36	-	I	5/16 pulgada	-	-	-
Soldado a	DIN S355MC	-	No especifica	5/16 pulgada	-	-	-
Otro							

DETALLES DE LA JUNTA	
Tipo de ranura	Junta a tope de ranura en V con CJP
Ángulo de la ranura ( $\alpha$ )	60°
Abertura de raíz (R)	1/8 pulgada (3 mm)
Cara de la raíz (f)	2 mm
Respaldo del lado opuesto	Ninguno
Método	-

TRATAMIENTO TÉRMICO PORTERIOR A LA SOLDADURA	
Temperatura	-
Tiempo de temperatura	-
Otro	-



PROCEDIMIENTO							
Capa(s) de soldadura	-	-	-				
Pasadas de soldadura	1	2	3				
<b>Proceso</b>	SMAW	SMAW	SMAW				
Tipo (manual, mecanizado, etc.)	Manual	Manual	Manual				
<b>Posición</b>	3G	3G	3G				
Progresión vertical	Si	Si	Si				
<b>Metal de aporte (espec. de AWS)</b>							
Clasificación de AWS	E 6011	E 8018	E 8018				
Diámetro	1/8 pulgada	1/8 pulgada	1/8 pulgada				
Fabricación/ nombre comercial	OERLIKON	OERLIKON	OERLIKON				
<b>Composición de gas de protección (GTAW)</b>							
Caudal (GTAW)	-	-	-				
Tamaño de boquilla (GTAW)	-	-	-				
<b>Temperatura de precalentamiento</b>							
Temperatura entre pasadas	-	-	-				
<b>Características eléctricas</b>							
Diámetro del electrodo (GTAW)	-	-	-				
Polaridad y tipo de corriente	DCEP	DCEP	DCEP				
Amperios	80	125 - 135	125 - 135				
Voltios	20 - 23	20 - 23	20 - 23				
Alimentador de corriente, frío o caliente (GTAW)	-	-	-				
Entrada de calor máxima	-	-	-				
<b>Técnica</b>							
Cordón recto o cordón oscilado u ondulado	Recto	Oscilado	Oscilado				
Pasada única o múltiple por lado	Pasada múltiple	Pasada múltiple	Pasada múltiple				
Oscilación (GTAW mec/ aut)	-	-	-				
Número de electrodos	3	3	2				
Tiempo de permanecia	-	-	-				
Martillazo	Ninguno	Ninguno	Ninguno				
Limpieza entre pasadas	Esmerilado	Cepillo de alambre	Cepillo de alambre				
<b>Otro</b>							

Formulario M - 2 (frente)

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

### INSPECCION VISUAL

Número de probeta	Referencia de clausula	Presencia de grietas o cráteres	Refuerzo de la soldadura	Socavación	Fusión completa de la raíz	Máxima concavidad de la raíz	Perforación por fusión máxima	Resultado
02	4.9.1. del código ANSI/ AWS D.1	No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Ninguna	Aceptable
04		No presenta	Plano	1/32 pulg.	Adecuada	1/16 pulg.	1/8 pulg.	Aceptable
06		No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	1/16 pulg.	Ninguna	Aceptable
08		No presenta	Plano	1/32 pulg.	Adecuada	1/16 pulg.	1/8 pulg.	Aceptable
10		No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Ninguna	Aceptable
12		No presenta	1/16 pulg.	1/32 pulg.	Adecuada	1/16 pulg.	1/8 pulg.	Aceptable
14		No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	Ninguna	Ninguna	Aceptable
16		No presenta	1/16 pulg.	No tiene	Adecuada	1/16 pulg.	Ninguna	Aceptable

### DETALLE DE ENSAYO DE DOBLES

Número de probeta	Ancho	Espesor	Referencia de clausula	Suma de discontinuidades	Grieta máxima de esquina	Resultado
02	2 pulg.	5/16 pulg.	4.9.3.3 del código ANSI/ AWS D.1	Ninguno	Ninguno	Pasa
04				3/16 pulg. (5 mm)	1/8 pulg. (3 mm)	No pasa
06				Ninguno	Ninguno	Pasa
08				3/16 pulg. (5 mm)	1/8 pulg. (3 mm)	No pasa
10				Ninguno	Ninguno	Pasa
12				1/8 pulg. (3 mm)	1/8 pulg. (3 mm)	No pasa
14				Ninguno	1/8 pulg. (3 mm)	Pasa
16				Ninguno	1/8 pulg. (3 mm)	Pasa

### DETALLE DE ENSAYO DE CHARPY (CVN)

Número de probeta	Referencia de clausula	Ubicación de entalla	Tamaño de probeta	Temperatura de ensayo	Energía absorbida	Expansión lateral	Resultado
10	ASTM E23-02 – AWS B4.0	Cordón	10 mm × 8 mm	20° C	22 Kg . m	1 mm	Aceptable
10				100° C	25 Kg . m	2.2 mm	Aceptable

### CERTIFICACION

Nombre del soldador	Numero de ID	Numero de cello
Abel Justiniani Coronel		-

Ensayos realizados por	
Laboratorio	CEM INGENIEROS
Numero de ensayo	PQR 02

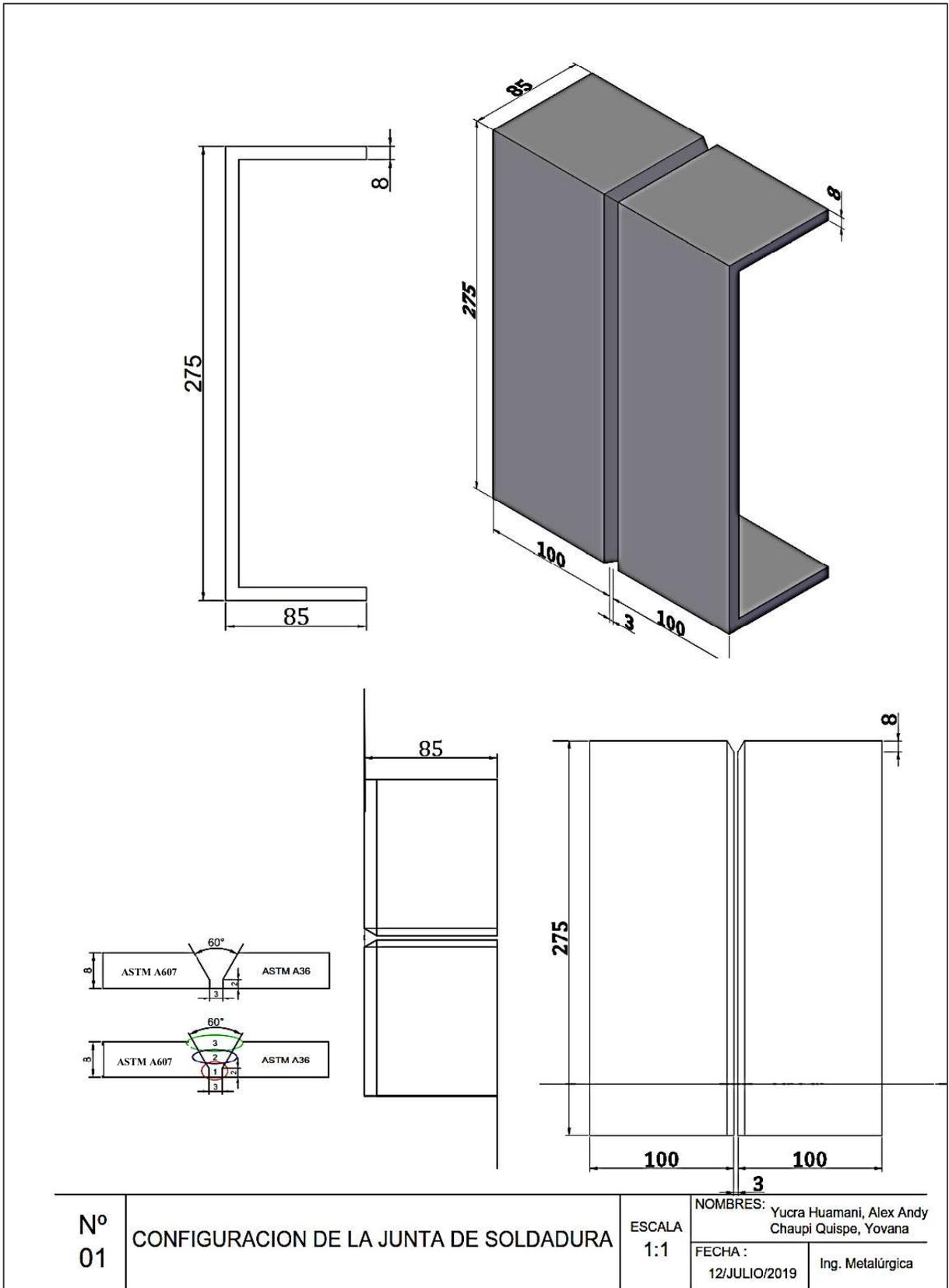
Los firmantes, certifican que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras de prueba fueron preparadas, soldada y probadas en conformidad con los requisitos de la Sección 4 de AWS DI 1/01 1M, (2015) Código de soldadura estructural – Acero

Título	
Gerente de CEM INGENIEROS E.I.R.L.	
Nombre	Firma
Ing. Raúl Allauca Sierra.	
Fecha	
14/03/19	



**Raúl Allauca Sierra**  
ING. MECÁNICO - ELECTRICISTA  
C.I.P. 37675

## ANEXO E: PLANO DEL DISEÑO DE LA JUNTA



ANEXO F: RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA  
**INFORME DE ENSAYO DE DUREZA DE SOLDADURA**

**Informe:** Barrido de dureza de soldadura

**N° revisiones:** 16

**Requisito de calidad:** ANSI/ AWS D1.1 Sección 4.9.4

**Informado a:** Alex A. Yucra Huamani y Yovana Chaupi Quispe

**Bosquejo de identificación y ubicación de la soldadura**



N° Repl.	N° Prueba	RESULTADO				
		LÍNEA DE BARRIDO DE DUREZA (HRC)				
		MB (S355MC)	ZAC (S355MC)	ZF	ZAC (A36)	MB (A36)
1	01	27	30	28	29	26
	02	26	27	28	31	25
	03	29	34	38	35	28
	04	27	37	34	36	27
	05	28	34	35	33	28
	06	27	36	33	35	29
	07	27	31	32	30	26
	08	28	40	34	37	29
2	09	25	25	20	26	23
	10	25	27	25	28	25
	11	29	36	34	35	27
	12	29	40	37	39	28
	13	28	37	36	37	27
	14	27	34	33	33	26
	15	27	39	37	38	27
	16	28	34	32	32	28

**Material:** Soldadura del acero ASTM A607 con el acero ASTM A36

**Longitud:** 8 pulg.      **Espesor:** 5/16 pulg.      **Preparación de superficie:** esmerilado y pulido

**Equipo:** Durómetro Rockwell,      **Escala:** Rockwell C,      **Carga:** 150 kp,      **Identador:** P. diamante

**Fecha de ensayo:** 28/03/19

**Inspector:** Ing. Alfredo Paucar M.

**Firma:**

Alfredo Paucar Marquina  
 Ing. METALURGIA  
 CIP N° 134650