

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

SOLDADURA FUERTE DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
INGENIERO MECÁNICO**

STEEVE LEONARDO ALMEIDA MALDONADO

steve_epn@yahoo.es

CECILIA LIZETH VILLENA CARRASCO

lizethvillena_c@yahoo.com

DIRECTOR: ING. M.Sc. PATRICIO ESTUPIÑAN MELO

patricio.estupinan@epn.edu.ec

Quito, Junio 2009

DECLARACIÓN

Nosotros, Steeve Leonardo Almeida Maldonado y Cecilia Lizeth Villena Carrasco, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

STEEVE ALMEIDA MALDONADO

LIZETH VILLENA CARRASCO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Steeve Leonardo Almeida Maldonado y Cecilia Lizeth Villena Carrasco, bajo mi supervisión.

ING. PATRICIO ESTUPIÑAN, M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por bendecirnos siempre. A nuestras familias por su amor y apoyo incondicional, al Ing. Patricio Estupiñán porque además de su acertada dirección nos brindó su amistad; y A los amigos que colaboraron de manera desinteresada en el desarrollo exitoso de nuestro trabajo: Ing. Gabriel Velasteguí, Ing. Homero Barragán, Ing. Fausto Oviedo, Sr. César Argüello y Sr. Fabián Peñaloza.

Steve y Lizeth

DEDICATORIA

A Cristo el amigo absoluto, a mis padres y mi familia, al personal de Fundación y a todos los amigos que hallé en el camino.

Steve

A Dios, mis padres y Alex, lo más importante en mi vida. A mi familia, amigos y a los incondicionales Willam y Pamela.

Lizeth

CONTENIDO

CONTENIDO DE FIGURAS.....	xi
CONTENIDO DE TABLAS	xvii
RESUMEN	xx
PRESENTACIÓN.....	xxi
1 ESTUDIO DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO, ESPECIFICACIONES, APLICACIONES.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ACERO INOXIDABLE.....	1
1.1.1 COMPARACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE CON ACEROS AL CARBONO.	2
1.1.2 DIAGRAMA DE FASE DE LOS ACEROS AL CARBONO	3
1.1.3 ASPECTOS GENERALES DE LOS ACEROS INOXIDABLES	4
1.1.4 INFLUENCIA DE LOS ALENATES EN LOS ACEROS INOXIDABLES	7
1.2 DIAGRAMA DE FASES DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....	9
1.2.1 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE LA ALEACIÓN HIERRO CROMO	9
1.2.2 DIAGRAMA TERNARIO.....	11
1.3 TIPOS DE ACEROS INOXIDABLES	13
1.3.1 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.	13
1.3.1.1 ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304.....	17
1.3.1.2 ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 316.....	18
1.3.2 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS Y MARTENSÍTICOS.	19
1.3.2.1 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS.....	19
1.3.2.2 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS.....	19
1.3.3 ACEROS INOXIDABLES DUPLEX.....	20
1.3.4 CUADRO COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE ACEROS INOXIDABLES MÁS COMUNES.....	21
1.4 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....	21

1.5	TIPOS DE CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES OCASIONADOS POR PROCESO DE SOLDADURA.....	22
1.5.1	PRECIPITACIÓN DE CARBUROS O CORROSIÓN INTERGRANULAR.....	23
1.5.2	FISURACIÓN POR CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.	26
1.5.3	CORROSIÓN GALVÁNICA	26
1.5.4	OTROS TIPOS DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES	28
1.5.4.1	CORROSIÓN POR PICADURA Y POR HENDIDURA	28
1.5.4.2	CAVITACIÓN	29
1.5.4.3	CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA	29
1.5.4.4	ATAQUE SELECTIVO DE FERRITA	29
1.5.4.5	CORROSIÓN POR CONTACTO	29
1.5.4.6	CORROSIÓN POR FATIGA	30
1.6	SOLUCIONES A LOS TIPOS DE CORROSIÓN	30
1.6.1	CORROSIÓN INTERGRANULAR.....	30
1.6.2	CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.....	31
1.6.3	CORROSIÓN POR PICADURA.....	31
1.6.4	CORROSIÓN POR CONTACTO.....	31
1.6.5	CORROSIÓN POR FATIGA.....	31
1.6.6	CORROSIÓN GALVÁNICA.....	32
1.7	TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES	33
1.7.1	TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN JUNTAS DE SOLDADURA.....	33
1.7.1.1	PRECALENTAMIENTO	33
1.7.1.2	TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA	34
2	LA SOLDADURA FUERTE DEL ACERO INOXIDABLE.	36
2.1	SOLDADURA FUERTE – BRAZING	36
2.1.1	COMPARACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA FUERTE (BRAZING) Y SOLDADURA BLANDA (SOLDERING).....	38
2.1.2	VENTAJAS DE SOLDADURA FUERTE	38
2.1.3	CONDICIONES DE SOLDADURA FUERTE	40
2.1.4	VARIABLES DE SOLDADURA FUERTE	41

2.1.5	DESVENTAJAS DE SOLDADURA FUERTE	41
2.1.6	MECÁNICA DEL BRAZING	42
2.1.7	CAPILARIDAD	43
2.1.8	PRECALENTAMIENTO.....	44
2.1.9	TIPOS DE SOLDADURA FUERTE	44
2.1.9.1	SOLDADURA FUERTE UTILIZANDO SOPLETE	45
2.1.9.2	SOLDADURA FUERTE EN HORNO	47
2.1.9.3	SOLDADURA FUERTE POR RESISTENCIA	48
2.1.9.4	SOLDADURA FUERTE POR INDUCCIÓN	48
2.1.9.5	SOLDADURA FUERTE POR INMERSIÓN.....	49
2.2	MATERIAL DE APORTE	49
2.2.1	SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE	51
2.2.1.1	GRUPOS DE MATERIAL DE APORTE PARA SOLDADURA EN ACERO INOXIDABLE	54
2.2.2	FUNDENTES.....	58
2.3	JUNTAS DE SOLDADURA.....	60
2.3.1	TIPOS DE JUNTAS DE SOLDADURA.....	60
2.3.1.1	UNIÓN A PRESIÓN	61
2.3.1.2	UNIÓN MECÁNICA	61
2.3.1.3	JUNTA MECÁNICA POR COMPRESIÓN	61
2.3.1.4	UNIONES PERMANENTES.....	62
2.3.2	DISEÑO DE LONGITUD DE TRASLAPE PARA JUNTA	64
2.3.3	HOLGURA.....	64
2.3.3.1	SELECCIÓN DE LA HOLGURA.....	67
2.3.4	LIMPIEZA	69
2.4	PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA FUERTE (BRAZING)	69
2.4.1	DIFICULTADES.....	71
2.5	INSPECCIÓN	72
2.5.1	IMPERFECCIONES	73
2.6	SOLDADURA FUERTE APLICADA AL ACERO INOXIDABLE Y AL COBRE.....	74

3	EXPANSIÓN DE LA TUBERÍA PARA REALIZAR LA JUNTA	
	TRASLAPES.....	78
3.1	GENERALIDADES DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE 304.....	78
3.1.1	VENTAJAS DE LA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE	79
3.1.2	USOS DE LA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE	80
3.2	MÉTODOS DE UNIÓN DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE.....	81
3.2.1	UNIONES ROSCADAS	81
3.2.2	JUNTAS A PRESIÓN EN FRÍO O POR ALTA COMPRESIÓN (HCC- HIGH HIDRAULIC COMPRESSION)	81
3.2.2.1	PROCEDIMIENTO PARA UNIÓN A COMPRESIÓN.....	82
3.2.2.2	ESTUDIO DE LA VIDA UTIL DE LOS ELASTÓMEROS	85
3.2.3	JUNTAS DE SOLDADURA	87
3.2.4	EXPANSIÓN (ABOCINADO).....	87
3.2.4.1	DISEÑO DEL DADO EXPANSOR	88
3.3	CÁLCULOS PARA EXPANSIÓN DE TUBERÍA.....	90
3.3.1	ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE DIMENSIONES.....	91
3.3.2	ANÁLISIS CILINDRO DE PAREDES DELGADAS (ESTADO BIAxIAL).....	94
3.3.2.1	ESFUERZO LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL (PRESIÓN INTERNA PERPENDICULAR).....	95
3.3.2.2	ESFUERZO LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL (PRESIÓN INTERNA APLICADA CON ÁNGULO)	96
3.3.3	ANÁLISIS DE ESBELTEZ	97
4	PROCESO EXPERIMENTAL	106
4.1	APLICACIÓN DE SOLDADURA EN TUBERÍA.....	107
4.1.1	SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE Y FUNDENTE	107
4.1.2	SELECCIÓN DEL SOPLETE PARA SOLDADURA FUERTE	111
4.1.3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA DESARROLLAR POSICIONAMIENTO, ALINEACIÓN Y LIMPIEZA.	113
4.1.4	SOLDADURA	114

4.1.5	ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS).....	127
4.2	ENSAYOS DE LAS PROBETAS	129
4.2.1	ENSAYO DE TRACCIÓN	129
4.2.1.1	NORMAS PARA ENSAYO DE TRACCIÓN.....	131
4.2.1.2	DIMENSIONES DE LAS PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACCIÓN.....	132
4.2.1.3	APLICACIÓN DE ENSAYO DE TRACCIÓN.....	133
4.2.2	ENSAYO DE DOBLADO	134
4.2.2.1	DIMENSIONES DE LAS PROBETAS PARA ENSAYO DE DOBLADO.....	137
4.2.2.2	REALIZACIÓN DE ENSAYO DE DOBLADO.....	137
4.2.3	PRUEBA DE HERMETICIDAD.....	138
4.2.3.1	NORMAS APLICABLES PARA ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA.....	139
4.2.3.2	DIMENSIONES DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA.....	145
4.2.3.3	HERMETICIDAD PARA EL ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA.....	145
4.2.3.4	PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA.....	146
4.2.4	MACROGRAFÍA.....	147
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN (PQR).....	148
5.1	INTRODUCCIÓN	148
5.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	151
5.2.1	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	151
5.2.2	ENSAYO DE DOBLADO	159
5.2.3	ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA.....	162
5.2.4	MACROGRAFÍA Y METALOGRAFÍA	165

5.2.4.1	MACROGRAFÍAS DE PROBETAS (SOLDADURA REALIZADA POR EMPRESA LOCAL)	165
5.2.4.2	MACROGRAFÍAS DE PROBETAS REALIZADAS EN LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.....	169
5.2.4.3	METALOGRAFÍA.....	174
5.3	REGISTRO DE PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN (PQR).	175
5.4	ANÁLISIS FINAL DE RESULTADOS	178
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	184
6.1	CONCLUSIONES.....	184
6.2	RECOMENDACIONES	185
	BIBLIOGRAFÍA	186
	ANEXOS	191
ANEXO 1	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	192
ANEXO 2	PROPIEDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....	193
ANEXO 3	TABLA DE CORROSIÓN.....	195
ANEXO 4	AUFHAUSER SILVER BRAZING ALLOYS REFERENCE GUIDE (1).....	199
ANEXO 5	AUFHAUSER SILVER BRAZING ALLOYS REFERENCE GUIDE (2).....	200
ANEXO 6	AUFHAUSER SILVER BRAZING ALLOYS REFERENCE GUIDE (3).....	201
ANEXO 7	AWS SFA A 5.8: Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding (APÉNDICE).....	202
ANEXO 8	NTE INEN 2260.....	208
ANEXO 9	METACONCEPT SOLDADURA FUERTE. METALES DE APORTE.....	217

CONTENIDO DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1	Diagrama Hierro Carbono	4
Figura 1. 2	Diagrama Hierro Cromo	9
Figura 1. 3	Influencia del Carbono ampliando el bucle Gamma	10
Figura 1. 4	Influencia del Níquel en la fase Gamma de un acero con 18% Cr .	12
Figura 1. 5	Aleaciones Eutectoides Fe-Aleante-C.....	12
Figura 1. 6	Desarrollo de los aceros inoxidable austeníticos.....	15
Figura 1. 7	a) Micrografía de un acero inoxidable austenítico, b) micrografía de precipitación de carburos (ataque intergranular) de un acero 304.	23
Figura 1. 8	Unión en fuerte de cobre y acero inoxidable 304 con temperatura mayor a 800°C.....	25
Figura 1. 9	Curvas de tiempo – temperatura – precipitación de $M_{23}C_6$ para aleaciones 18Cr-8Ni, a diferentes contenidos de carbono.	25

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1	Ángulos de mojado de metales de aporte para soldadura fuerte. ...	43
Figura 2. 2	Soldadura con soplete.....	46
Figura 2. 3	Diagrama constitucional Plata – Cobre.....	56
Figura 2. 4	Temperatura de fusión de soldadura y ciclo de fusión de soldadura	56
Figura 2. 5	Unión a presión	61
Figura 2. 6	Esfuerzo de corte unitario medio en la unión traslapada de soldadura fuerte y resistencia a la tensión unitaria media en el metal base en función de la distancia de traslapo.....	62
Figura 2. 7	Diseños de uniones traslapadas para soldadura fuerte que se usarán con esfuerzos bajos y altos	63
Figura 2. 8	Diseños de unión a tope para soldadura fuerte que aumentan la capacidad de unión (resistir esfuerzos altos y carga dinámica)	63

Figura 2. 9	Diseño de junta traslapada para Brazing.	64
Figura 2. 10	Resistencia de la unión como una función de la separación de la unión.....	65
Figura 2. 11	Accesorios de unión a soldar- dimensiones.....	67
Figura 2. 12	Dimensiones de accesorio de unión a soldar.....	68
Figura 2. 13	Extremos macho y hembra de la tubería de acero inoxidable.	68
Figura 2. 14	Limpieza de extremo macho y hembra de la tubería.....	70
Figura 2. 15	Distribución del material de aporte.....	70
Figura 2. 16	Limpieza de uniones de soldadura fuerte en acero inoxidable.....	71

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1	Desempeño del Sistema de tubería AISI 304	79
Figura 3. 2	Corte del tubo	82
Figura 3. 3	Inserción de tubo en accesorio	82
Figura 3. 4	Tubo Marcado	82
Figura 3. 5	Inserción del Tubo	83
Figura 3. 6	Unión por Compresión con Bomba Hidráulica	83
Figura 3. 7	Verificación con galga	83
Figura 3. 8	Bomba Hidráulica Manual Hidrinox.....	83
Figura 3. 9	Cortes de Tubos Unidos con Compresión.....	84
Figura 3. 10	Accesorios para unir tubos de la misma dimensión	84
Figura 3. 11	Anillos o ring para instalaciones de alta compresión.....	84
Figura 3. 12	Volumen específico en función de la temperatura.	86
Figura 3. 13	Abocardado de tubería con Prensa Hidráulica.....	88
Figura 3. 14	Tapón para ensayo de tracción – dado para abocardar	89
Figura 3. 15	Expansión de Tubería con dado expansor.....	89
Figura 3. 16	Dado expansor abocinador y tubo deformado	90
Figura 3. 17	Aplicación de fuerza sobre área inicial en un extremo de Tubería..	91
Figura 3. 18	Distribución de esfuerzos transversales y longitudinales ocasionados por presión interna.	94

Figura 3. 19 Distribución de esfuerzos transversales y longitudinales ocasionados por presión interna	96
Figura 3. 20 Cargas Críticas y Efecto de Pandeo en un elemento esbelto	98
Figura 3. 21 Forma de Pandeo de un elemento.....	99
Figura 3. 22 Cargas Críticas y Efecto de Pandeo en un elemento esbelto...100	
Figura 3. 23 Diagrama de la Teoría de Euler	101
Figura 3. 24 Diagrama de Teoría de Euler (Esfuerzo crítico en función de coeficiente de esbeltez)	102
Figura 3. 25 Expansor Abocinador	104
Figura 3. 26 Expansor Abocinador (3D)	105
Figura 3. 27 Expansor Abocinador.....	105

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1 Temperatura de fusión de soldadura fuerte	109
Figura 4. 2 Distancia de boquilla de soplete vs temperatura.....	113
Figura 4. 3 Calentamiento de la tubería con soplete	113
Figura 4. 4 Alineación de la junta	114
Figura 4. 5 Preparación – Limpieza de la tubería.....	114
Figura 4. 6 Precalentamiento de la junta.....	115
Figura 4. 7 Colocación del fundente (pasta) en la junta	115
Figura 4. 8 Calentamiento del fundente	116
Figura 4. 9 Calentamiento del fundente	116
Figura 4. 10 Soldadura fuerte aplicada a tubería de acero inoxidable (Figuras de izquierda a derecha: BAg2 y BCuP5)	117
Figura 4. 11 Temperatura de Precalentamiento (material BCuP5).....	120
Figura 4. 12 Temperatura de Precalentamiento (material BAg2)	121
Figura 4. 13 Tiempo de Precalentamiento (material BCuP5)	121
Figura 4. 14 Tiempo de Precalentamiento (material BAg2).....	122
Figura 4. 15 Temperatura de Soldadura (material BCuP5)	122
Figura 4. 16 Temperatura de Soldadura (material BAg2).....	123

Figura 4. 17	Temperatura de Soldadura (material BCuP5).....	123
Figura 4. 18	Tiempo de Soldadura (material BAg2)	124
Figura 4. 19	Temperatura de Postcalentamiento (material BCuP5)	124
Figura 4. 20	Temperatura de Postcalentamiento (material BAg2).....	125
Figura 4. 21	Tiempo de Postcalentamiento (material BCuP5).....	125
Figura 4. 22	Tiempo de Postcalentamiento (material BAg2)	126
Figura 4. 23	Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para material de aporte BAg2	127
Figura 4. 24	Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para material de aporte BCuP 5.....	128
Figura 4. 25	Mordazas de sujeción y varilla corrugada insertada en las probetas	130
Figura 4. 26	Tapones metálicos para realizar el ensayo de tracción y sujeción en la máquina.	131
Figura 4. 27	Ensayo de tracción – secciones a tope o traslape – diámetros pequeños, QB-462.1(e).	132
Figura 4. 28	Probeta para ensayo de Tracción	132
Figura 4. 29	Cupones para Ensayo de tracción.....	133
Figura 4. 30	Máquina Universal y sujeción de probetas.....	133
Figura 4. 31	Sujeción de probetas - Registro de carga máxima.....	134
Figura 4. 32	Secuencia del Ensayo de Tracción	134
Figura 4. 33	Ensayo de Doblado con Jig de rodillos según QB-466.2	135
Figura 4. 34	Ensayo de Doblado envolviendo alrededor del Jig (QB-466.3)	136
Figura 4. 35	Dimensiones de la máquina y probeta para ensayo de Doblado...137	
Figura 4. 36	Máquina y probetas para ensayo de doblado	138
Figura 4. 37	Secuencia del ensayo de doblado.....	138
Figura 4. 38	Cupones para Ensayo Hidrostático.....	145
Figura 4. 39	Máquina para Ensayo Hidrostático.....	146
Figura 4. 40	Válvula de ajuste y acople universal.	146

CAPÍTULO 5

Figura 5. 1	Esfuerzos transversales y Longitudinales que se generan por Presión interna.....	152
Figura 5. 2	(a) Rotura de unión BAg-2, (b) rotura de unión BCuP-5.....	154
Figura 5. 3	Extremo hembra de probeta BAg2 visto en microscopio.....	155
Figura 5. 4	Extremo macho de probeta BAg2 visto en microscopio.....	155
Figura 5. 5	Extremo macho de probeta BCuP5 visto en microscopio	155
Figura 5. 6	Extremo hembra de probeta BCuP5 visto en microscopio	156
Figura 5. 7	Esfuerzos de tracción, rotura, longitudinales y transversales.....	157
Figura 5. 8	Probetas de Ensayo de Tracción, holguras (mm), temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte, Material de Aporte.....	158
Figura 5. 9	Probetas BCuP-5 ensayadas	160
Figura 5. 10	Probetas BAg-2 ensayadas.....	160
Figura 5. 11	Ángulo en Ensayo de Doblado.....	160
Figura 5. 12	Probetas de Ensayo de Doblado, temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte, Material de Aporte.....	
Figura 5. 13	Fugas en probetas ensayadas	163
Figura 5. 14	Presión Hidrostática en relación al tiempo de ensayo.....	163
Figura 5. 15	Probetas de Ensayo de Hermeticidad, temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte, Material de Aporte.....	165
Figura 5. 16	Tubos de acero inoxidable con accesorios de cobre y bronce utilizados por una empresa local para realizar soldadura fuerte. ...	166
Figura 5. 17	Macrografía de la soldadura realizada en la Tubería de la figura 5.16.....	166
Figura 5. 18	Discontinuidades en material BCuP-5 de las probetas (empresa local)	167
Figura 5. 19	Falta de mojado en probetas de material BCuP-5 (empresa local)	167
Figura 5. 20	Macrografía de probetas con material BAg-2 (empresa local)	168
Figura 5. 21	Penetración irregular en probetas BAg-2 (empresa local).....	168
Figura 5. 22	Porosidad en probetas BAg-2 (empresa local).....	169
Figura 5. 23	Soldadura Fuerte en Tubos de acero inoxidable AISI 304.....	170

Figura 5. 24 Macrografía de Probeta E	170
Figura 5. 25 Macrografía de Probeta F	171
Figura 5. 26 Macrografía de Probeta G	171
Figura 5. 27 Macrografía de Probeta H.....	172
Figura 5. 28 Macrografía de Probeta I.....	172
Figura 5. 29 Macrografía de Probeta K.....	173
Figura 5. 30 Macrografía de Probeta N	173
Figura 5. 31 Metalografía Material de Aporte BCuP 5 (50x, 400x).....	175
Figura 5. 32 Metalografía Material de Aporte BAg 2. (100x, 400x).....	175
Figura 5. 33 Registro del Procedimiento de Calificación (PQR) – Material de Aporte BAg 2.....	176
Figura 5. 34 Registro del Procedimiento de Calificación (PQR) – Material de Aporte BCuP 5.	177

CONTENIDO DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1. 1	Comparación entre Acero Inoxidable y Acero al Carbono.....	2
Tabla1. 2	Características generales de los aceros inoxidable.....	5
Tabla1. 3	Aleantes e influencia en los aceros inoxidable.	7
Tabla1. 4	Desarrollo de los Aceros Inoxidable Austeníticos	16
Tabla1. 5	Propiedades Mecánicas mínimas a temperatura ambiente de aceros inoxidable Austeníticos.	17
Tabla1. 6	Composición química del acero inoxidable 304 y 304L	17
Tabla1. 7	Propiedades del acero inoxidable 304.	18
Tabla1. 8	Comparación de aceros inoxidable.....	21
Tabla1. 9	Serie Galvánica	27
Tabla1. 10	Factores que influyen en la corrosión galvánica.....	28

CAPÍTULO 2

Tabla 2. 1	Comparación de Soldering, Brazing y Welding.	38
Tabla 2. 2	Gases utilizados en la soldadura por soplete.	45
Tabla 2. 3	Combinaciones de metal base, metal de aporte	53
Tabla 2. 4	Materiales de aporte para soldadura fuerte de acero inoxidable	57
Tabla 2. 5	Aplicaciones de grupos de Metal de Aporte	58
Tabla 2. 6	Clasificación de fundentes para soldadura fuerte con metales de aporte para soldadura fuerte o latonado	60
Tabla 2. 7	Separación recomendada de la unión a la temperatura de soldadura fuerte.	66
Tabla 2. 8	Diseño de juntas con dos holguras para comparar resultados en juntas de acero inoxidable.....	69
Tabla 2. 9	Inspección de juntas de soldadura fuerte por ensayos destructivos y no destructivos	72
Tabla 2. 10	Comparación de Soldadura Fuerte para Cobre y Acero Inoxidable	75

CAPÍTULO 3

Tabla 3. 1	Especificaciones de Tubería AISI 304	79
Tabla 3. 2	Dimensiones de diámetros expandidos.....	90
Tabla 3. 3	Datos para cálculos de expansión de tubería AISI 304	91
Tabla 3. 4	Resumen de cálculos de esfuerzos en expansión de tubería	97
Tabla 3. 5	Esfuerzo crítico en función de la longitud del elemento esbelto	102
Tabla 3. 6	Esfuerzo y carga crítica en función de la longitud del elemento esbelto.....	103
Tabla 3. 7	Longitud máxima de la tubería	104

CAPÍTULO 4

Tabla 4. 1	Especificaciones de tubería de acero inoxidable AISI 304	108
Tabla 4. 2	Especificaciones técnicas de material de aporte	110
Tabla 4. 3	Especificaciones técnicas de gas para soplete	112
Tabla 4. 4	Datos obtenidos del proceso de soldadura en probetas de tracción.	117
Tabla 4. 5	Datos obtenidos del proceso de soldadura en probetas de ensayo hidrostático.....	118
Tabla 4. 6	Datos obtenidos del proceso de soldadura en probetas de Doblado.....	118
Tabla 4. 7	Datos obtenidos del proceso de soldadura en probetas de Macrografía.....	119
Tabla 4. 8	Tiempos y temperaturas promedio del proceso de soldadura fuerte.	126
Tabla 4. 9	Probetas para Ensayos	129
Tabla 4. 10	Dimensiones de la Máquina para Ensayo de Doblado	137
Tabla 4. 11	Normas consideradas para el Ensayo Hidrostático de las Probetas	142

CAPÍTULO 5

Tabla 5. 1	Resultados del ensayo de tracción.....	151
Tabla 5. 2	Esfuerzos de Tracción, Longitudinal, Transversal de las probetas ensayadas	153
Tabla 5. 3	Probetas de Ensayo de Tracción y temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte.....	157
Tabla 5. 4	Resultados del Ensayo de Doblado.....	161
Tabla 5. 5	Probetas de Ensayo de Doblado y temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte.	161
Tabla 5. 6	Resultados del Ensayo Hidrostático	162
Tabla 5. 7	Probetas de Ensayo de Hermeticidad y temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte.....	164
Tabla 5. 8	Resultados de la Inspección Macrográfica	169

RESUMEN

En el presente documento se comprueba la validez de la soldadura fuerte en tubería de acero inoxidable austenítico y se realiza este proceso de soldadura con junta traslape para tubería AISI/SAE 304 de 0.8 mm de espesor. El acero inoxidable es un material con buena resistencia mecánica y a la corrosión, lo que lo convierte en un material adecuado para conducir fluidos.

La característica inoxidable de estos aceros se debe a la presencia de Cromo. Por contener este aleante, es más difícil aplicar soldadura fuerte. Desde temperaturas de 425°C hasta 800°C el Cromo se desplaza hacia los bordes de grano (Precipitación de Carburos de Cromo) dejando esta zona debilitada y expuesta a corrosión intergranular. El proceso de soldadura fuerte en acero inoxidable debe realizarse con cuidado controlando las temperaturas de proceso y tiempos de exposición para evitar la sensibilización del material base. Este tipo de soldadura tiene como fundamento no fusionar el metal base con el metal de aporte, el metal de aporte ingresa por capilaridad en una junta cuya separación se diseña adecuadamente, y la temperatura solidus del material de aporte debe ser mayor a 450°C y menor a la de fusión del metal base.

El estudio experimental busca alcanzar uniones permanentes de las juntas de manera segura para evitar problemas como fugas del fluido que transporta la tubería.

Se determina que seleccionar adecuadamente la separación de la junta, material de aporte y realizar precalentamiento en un rango adecuado establecen mejores resultados.

Se realizaron bancos de probetas de tubería cuyas juntas fueron realizadas con dos materiales de aporte, en base de plata y cobre de los grupos BAg y BCuP respectivamente. También se realizó el diseño de la junta de traslape con holguras de 0.5 y 0.2 mm. Las probetas fueron sometidas a ensayos de tracción, doblado y prueba hidrostática para determinar la calidad de las juntas. Adicionalmente se realizó inspección visual macrográfica y metalografía para detectar defectos metalográficos y observar la forma como se produce la adherencia entre las superficies de soldadura.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo busca establecer un procedimiento para la realización de soldadura fuerte en tubería de acero inoxidable austenítico AISI 304 (espesor delgado). El objetivo es determinar variables o parámetros correctos que permitan aplicar temperaturas específicas del proceso sin sensibilizar el material base y obtener uniones herméticas con buena resistencia mecánica.

En el primer capítulo se tiene una descripción general de los aceros inoxidables. Se analiza la influencia de los aleantes y se describen los tipos de aceros inoxidables. Se describe la soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos, tipos de corrosión, soluciones y tratamientos térmicos. Un aspecto importante es la corrosión intergranular que se produce si el acero inoxidable se sensibiliza luego de exposiciones a altas temperaturas como en el proceso de soldadura fuerte.

El segundo capítulo corresponde a un estudio general de la Soldadura Fuerte (Brazing), ventajas, desventajas, tipos de soldadura fuerte, diseño de junta, selección del material de aporte, fundente, capilaridad, holgura, temperaturas y tiempos de exposición, procedimiento, inspección y comparación de soldadura fuerte en tubería de cobre y acero inoxidable.

En el tercer capítulo se describe a la tubería de acero inoxidable AISI 304, formas de realizar la expansión y cálculos para evitar dañar las paredes de la tubería.

En el cuarto capítulo se realiza el proceso experimental al aplicar soldadura fuerte a probetas utilizando dos holguras y dos materiales de aporte diferentes, se resume lo realizado en una Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS). Adicionalmente se realizan ensayos destructivos como tracción, doblado, hermeticidad y metalográficos para determinar parámetros que influyen en los resultados de las uniones.

En el quinto capítulo se analizan los resultados de la aplicación de soldadura fuerte en el acero inoxidable austenítico y se exponen los resultados de los ensayos en un Registro del Procedimiento de Calificación (PQR). En el sexto capítulo, conclusiones y recomendaciones obtenidas en este estudio se exponen para el lector.

CAPÍTULO 1

1 ESTUDIO DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO, ESPECIFICACIONES, APLICACIONES.

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ACERO INOXIDABLE.

Un acero inoxidable es una aleación a base de Hierro, en el que la propiedad de inoxidable se debe a un contenido de Cromo desde 10.5% hasta 30%, además de otros aleantes.

Las aplicaciones de esta aleación en ingeniería son extensas por su gran resistencia a la oxidación y corrosión a temperatura ambiente e inclusive a temperaturas altas. El Cromo es un elemento reactivo que al combinarse con el Oxígeno del aire forma en la superficie una capa de Óxido de Cromo, esta capa es fina, densa, no porosa, insoluble, tenaz, autoregenerante, depende del tipo de acero y de los diferentes tratamientos que se le den.

El acero inoxidable tiene varias aplicaciones: cocinas industriales, industria alimenticia, juguetería, hospitales, laboratorios e industria aeronáutica. Es un material que se muestra neutro frente a los alimentos, no forma cascarilla, no se oscurece con el tiempo, tiene una buena presencia estética "inmaculada" que es el calificativo "stainless" con el que se denomina a este material.

El acero inoxidable puede ser producido por procesos de fundición, los lingotes fundidos pueden ser forjados o laminados para posteriores procesos de extrusión y doblado. También pueden ser maquinados y se pueden realizar procesos de soldadura como: por arco (welding), fuerte (brazing), soldering (blanda).

Bajo el nombre de inoxidable el acero abarca alrededor de 130 composiciones químicas diferentes y cada una tiene propiedades distintas por lo que se debe especificar el acero inoxidable apropiado para cierta aplicación.

Mientras mayor sea el riesgo de corrosión en el servicio se deben usar aceros con mayor concentración de Cromo, por ejemplo el acero AISI 304 con 18% Cr y 8% Ni, es capaz de soportar condiciones atmosféricas rigurosas por más de 12 años.³¹

Por otra parte estos aceros no resisten la presencia de ácidos reductores como ácido clorhídrico o fluorhídrico, que lo atacan fuertemente.

Para obtener la máxima resistencia a la corrosión es recomendable mantener a estos aceros limpios y pulidos preservando la superficie de sustancias extrañas que pudieran albergarse en los poros o irregularidades de este material.

1.1.1 COMPARACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE CON ACEROS AL CARBONO.

Con la finalidad de incrementar el conocimiento de los materiales a continuación se presenta una tabla comparativa de las propiedades.

Tabla1. 1 Comparación entre Acero Inoxidable y Acero al Carbono

Parámetro	Acero inoxidable	Acero al Carbono
Aleantes.	Cromo y otros.	Ninguno.
% de Carbono.	0.035 - 0.28	0.03 - 2.1
Efecto de exposición al ambiente.	Película densa de Óxido de Cromo	Óxido de Hierro.
Soldabilidad.	Excelente.	A mayor contenido de carbono, menor soldabilidad (más duros y frágiles).
Tratamiento térmico.	No es necesario un tratamiento térmico pero se puede elevar la temperatura a 900°C y enfriar rápidamente.	Aptos y aumentan resistencia tenacidad y dureza.
Aplicaciones	Ambientes húmedos, agentes químicos, altas temperaturas de servicio.	Estructural: Ingeniería de construcción, civil.
Maquinabilidad y conformado (Endurecimiento por deformación)	Austenítico: Requiere cerca del 50 % más energía si se compara con un acero al carbono de espesor similar. En operaciones como doblado requiere 5 grados adicionales para compensar el retorno elástico.	Se endurece menos por deformación plástica.
Procesos de soldadura aplicables	Gas inerte (Tungsteno), arco de Plasma y MIG (gas inerte), soldadura fuerte.	Casi todos los procesos de soldadura.
Impacto ambiental (Higiene y reciclaje)	Excelente Los equipos quirúrgicos resisten las técnicas agresivas de limpieza y esterilización y al final de sus vidas útiles se pueden reciclar.	Bajo
Precio	Medio Se debe al alto precio del Níquel que conforma más del 60 por ciento del coste de fabricar acero austenítico.	Medio
Corrosión	Localizada: intergranular, picaduras o bajo tensión.	Uniforme

1.1.2 DIAGRAMA DE FASE DE LOS ACEROS AL CARBONO¹

El diagrama de equilibrio Hierro - Carbono, es una representación de las fases que experimenta la aleación en función de la temperatura, considerando que los calentamientos o enfriamientos son lentos de modo que la difusión de los átomos de Carbono en la estructura del Hierro tienen un tiempo suficiente para completarse.

La aleación presenta la solubilidad del Carbono en el Hierro, hasta el 2% de Carbono, el Hierro líquido al enfriarse tiende a expulsar el exceso en forma de un compuesto intermetálico llamado cementita (Fe_3C), característica propia de un acero. Sobre el 2% de Carbono el Hierro expulsa la cantidad excesiva de Carbono en forma pura o grafito (láminas o escamas que interrumpen la red del hierro) característica de una fundición.

El hierro es un material polimorfo ya que sobre los 910°C - 1400°C tiene estructura cúbica de caras centradas (austenita). El Carbono es un elemento de radio atómico pequeño y se desliza hacia un espacio desocupado en el centro de esta celda unitaria produciendo una solución sólida intersticial de Hierro y Carbono. Bajo 910°C el Hierro tiene estructura cúbica de cuerpo centrado con pocos intersticios entre átomos y por tanto la solubilidad del Carbono es menor.

Operaciones como forja y laminado se efectúan a 1093°C cuando el Hierro es cúbico de cara centrada.

El límite entre un acero y una fundición está alrededor del 2% en contenido de Carbono con una composición de baja forjabilidad y se denomina **ledeburita** (hasta 4,3% C), por otra parte en 0.77% C en donde se considera el punto eutectoide (727°C) se encuentra la **perlita** que es una mezcla de ferrita (88%) y **cementita** (12%).

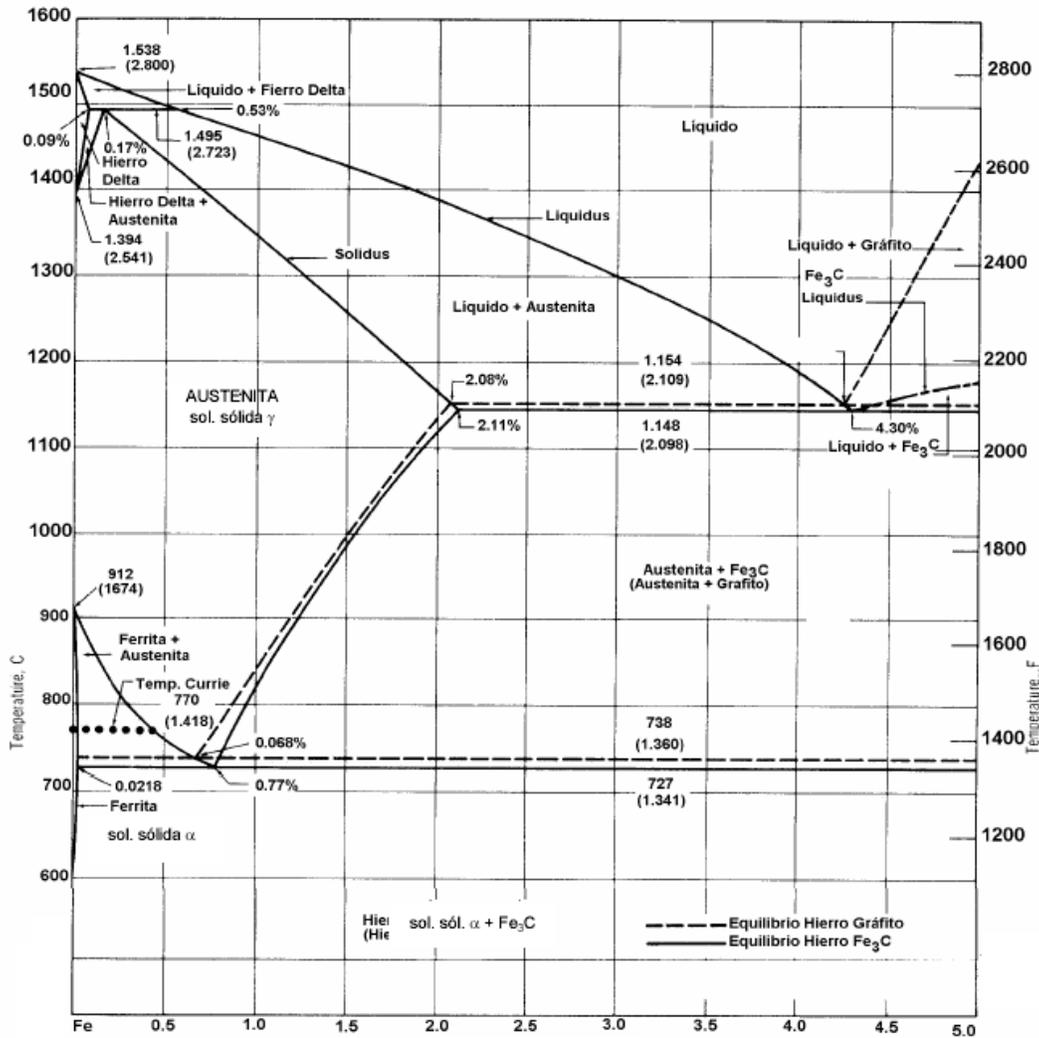


Figura 1. 1 Diagrama Hierro Carbono¹

En la aleación Hierro Carbono, a la composición y temperatura eutectoide en el calentamiento marca el inicio de la fase austenita, es decir:



1.1.3 ASPECTOS GENERALES DE LOS ACEROS INOXIDABLES³

Con el fin de ampliar el estudio y realizar una breve comparación, a continuación se presenta una tabla con propiedades generales de los aceros inoxidable: Austeníticos, Ferríticos y Martensíticos.

Tabla1. 2 Características generales de los aceros inoxidable³

Propiedad	Austeníticos		Ferríticos	Martensíticos
Designación comercial	Serie 200 Serie 300	Cr, Ni, Mn Cr, Ni	Serie 400 Cr	Serie 400 Cr, C
Endurecimiento	Por deformación en frío, pasando su estructura metalográfica a contener martensita. No se endurecen por tratamiento térmico.		No son tratables térmicamente y endurecen poco por deformación.	Por tratamiento térmico llegando sobre 1000 °C (austenita). Tiene buena templabilidad incluso en el aire.
Magnetismo	No son magnéticos en estado recocido. Después de endurecidos se vuelven magnéticos		Sí	Sí
Resistencia a la corrosión	Excelente, mejor que la de los ferríticos y martensíticos a altas temperaturas. Esta resistencia es superior a la de otros tipos de aceros inoxidables, debido a que el Ni actúa como estabilizante de la capa protectora de óxido.		Buena en estado de recocido.	Buena hasta 500°C.
Ventajas	Tienen mayor tenacidad que los ferríticos debido a mayor plasticidad por la estructura cúbica centrada en la cara, y su ductilidad los hace más idóneos para aplicar procesos de soldadura.		Resisten la corrosión inducida por cloruros, pitting, corrosión bajo tensión (cloruro a alta temperatura), por ácidos orgánicos, en medios cáusticos, para la producción de la urea. Aumentan sus propiedades mecánicas mediante elementos intersticiales como Carbono y Nitrógeno.	Mayor dureza y son utilizados para herramientas, cuchillería, etc.
Soldabilidad	Excelente		Buena. Soldadura frágil por problema de crecimiento de grano (no se puede dar un tratamiento térmico de recristalización).	Buena. Soldadura frágil, tiende a la fisuración. Necesita precalentamiento (200-300 °C) y postcalentamiento de revenido (600°C-750°C).
Temperatura de uso	Temperaturas criogénicas y elevadas hasta aproximadamente los 925°C pero con riesgo de sensibilización.		A 400 y 530 °C de exposición se fragilizan.	Luego de realizado el temple es necesario un revenido a 600°C.

Aplicación	<p>Industria química, farmacéutica, aeronáutica, naval, alimenticia, petroquímica y de transporte.</p> <p>Recipientes y cañerías.</p>	<p>Resistencia mecánica 50% mayor que los aceros al carbono.</p> <p>Utensilios de industria química (405, 430, 446).</p> <p>Intercambiadores de calor, plantas de procesamiento de petróleo o gas natural.</p>	<p>Álabes de turbinas (410, 416).</p> <p>Herramientas quirúrgicas, cojinetes, válvulas (440), equipo químico, aplicaciones aeronáuticas.</p>
Estructura metalográfica	Austeníticos	<p>Formada por austenita en estado recocido. La adición mínima de 8% de Níquel transforma el acero inoxidable en austenítico por ser un estabilizador de esta fase del hierro.</p> <p>La austenita o hierro γ tiene un sistema de cristalización cúbico centrado en la cara y existe cuando el material se halla entre 910 y 1400°C no sufre transformaciones de fase.²</p>	
	Ferríticos	<p>Hasta los 911° C el Hierro cristaliza en una estructura cúbica centrada en el cuerpo, denominada ferrita o hierro α. El Cr es formador de Ferrita. Debe limitarse el % C hasta 0,1 para evitar ser martensíticos.</p>	
	Martensíticos	<p>La martensita es un micro constituyente de los aceros templados que se forma por enfriamiento rápido desde la fase austenítica. Se puede obtener martensita enfriando a temperatura ambiente. Esta estructura sobresaturada de Carbono en Hierro α se forma en condiciones de no equilibrio.</p> <p>Tienen el mayor contenido de C (0,1% hasta 1%) que los otros aceros y a medida que incrementa el C tiende a cambiar su estructura cristalina de BCC a tetragonal centrada en el cuerpo.</p> <p>Si se desea templearlos es necesario un revenido de alivio de esfuerzos a 600°C, lo que confiere un endurecimiento adicional.</p>	
Conformabilidad	Austeníticos	<p>Excelente</p> <p>La estructura cristalina FCC tiene un alto grado de plasticidad y esto implica que la fase austenítica transmita su tenacidad, reducción en área, y excelente resistencia al impacto aun a bajas temperaturas.</p>	
	Ferríticos	<p>Muy Bueno</p> <p>Es un material dúctil y maleable responsable de la buena forjabilidad de las aleaciones con bajo contenido en Carbono y es ferromagnético hasta los 770 °C (temperatura de Curie a la que pierde dicha cualidad). La ferrita puede disolver muy pequeñas cantidades de Carbono. Reducciones (85% antes del recocido de recristalización) durante el laminado en frío es una variable en el control de la deformabilidad.</p>	
	Martensíticos	<p>Bajo</p> <p>Alto contenido de Carbono convierte frágil a la estructura, la estructura martensítica después de la cementita es el constituyente más duro de los aceros.</p>	

1.1.4 INFLUENCIA DE LOS ALENATES EN LOS ACEROS INOXIDABLES ⁴

Algunos aleantes influyen en las propiedades de los aceros inoxidables, los más importantes se mencionan en la tabla a continuación.

Tabla1. 3 Aleantes e influencia en los aceros inoxidables.⁴

ALEANTE	CARACTERÍSTICAS		
Cromo	<p>Aumenta la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, la inoxidables, etc.</p> <p>Se emplea en cantidades diversas desde 0,30 a 30 % y se aplican en aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidables, y los de resistencia en caliente.</p> <p>Formador de carburos, proporciona a los aceros características de inoxidables y refractarios, además que se utiliza para revestimientos embellecedores.</p> <p>Formador de ferrita (alfágeno).</p>		
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico
	16 - 20%	10.5 –30 %	11– 18 %
Níquel	<p>La adición de 2 a 5% en los aceros al carbono para una misma dureza aumenta su resistencia y limite de elasticidad, sin disminuir la tenacidad.</p> <p>Sirve para cementación, para piezas de gran resistencia y en aceros inoxidables favorecen la formación de austenita (gammágeno) a temperatura ambiente.</p> <p>El Níquel no suele formar carburos ni compuestos inter metálicos. Aumenta la capacidad de temple de los aceros al disminuir la velocidad crítica de enfriamiento además que evita el crecimiento de grano en los tratamientos térmicos.</p> <p>A mayores contenidos de Ni en el acero, este muestra mayor facilidad a formar martensita.</p> <p>Influye para que los aceros resistan temperaturas elevadas y la corrosión.</p>		
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico
	7 – 20%	0	Hasta 1%
Molibdeno	<p>Este elemento mejora notablemente la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia al desgaste de los aceros, además aumenta la pasividad y resistencia química de los aceros inoxidables a los ácidos reductores, estabiliza la ferrita, favorece la resistencia mecánica en caliente de los aceros austeníticos.</p> <p>Se añade cantidades de alrededor del 6% en los aceros inoxidables ferríticos, austeníticos y dúplex para mejorar su resistencia a la corrosión por cloruros, particularmente para la corrosión por picadura y por hendidura.</p>		
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico
	6%	6%	0

Silicio	<p>Es un desoxidante que se añade intencionalmente en todos los aceros con objeto de evitar que aparezcan poros y otros defectos internos. Estabilizador de la ferrita. En concentraciones entre 4% a 5% en peso, incrementa la resistencia a la corrosión. Reduce la capacidad de temple al aire, aumenta la fluidez del acero fundido por lo que se le suele aumentar en materiales de aporte. El Silicio forma Siluros de Hierro y compuestos intermetálicos con el Cromo, todos los cuales fragilizan el acero.</p>		
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico
	Hasta 0.75%	Hasta 1%	Hasta 1%
Manganeso	<p>Se añade en todos los aceros debido a que neutraliza la influencia del Azufre y Oxígeno, que surgen en el proceso de fabricación cuando el acero está líquido. Si los aceros no tuvieran Manganeso, no se podrían laminar ni forjar. El Manganeso actúa también como desoxidante y evita, que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material. Es gammágeno dependiendo de la cantidad de Níquel. Su efecto en las propiedades mecánicas es mínimo. Inhibe la fragilidad en caliente al formar Sulfuro de Manganeso.</p>		
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico
	5 - 20 % (serie 200) Hasta 2% (serie 300)	Hasta 1%	Hasta 1%
Azufre	<p>Se considera un elemento perjudicial pero su presencia es positiva para mejorar la maquinabilidad. Cuando el porcentaje de Azufre es alto puede causar poros en la soldadura. El Azufre con el Hierro forma sulfuro, que provoca el desgranamiento del material. El Azufre es neutralizado por el Manganeso al formarse MnS. El contenido de Mn debe ser aproximadamente cinco veces la concentración de S para que se produzca la reacción, así al eliminarse los gases causantes se obtiene una mejor fundición.</p>		
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico
	Hasta 0.03%	Hasta 0.03%	Hasta 0.03%
Fósforo	<p>Es un elemento perjudicial, pues disminuye la ductilidad y forma Fosfuro de Hierro que es sumamente frágil. Aunque se considera un elemento perjudicial en los aceros, porque reduce la ductilidad y la tenacidad, haciéndolo quebradizo, a veces se agrega para aumentar la resistencia a la tensión y mejorar la maquinabilidad.</p>		
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico
	Hasta 0.04%	Hasta 0.04%	Hasta 0.04%
Carbono ³	<p>Es un elemento gammágeno, el cual amplía el campo de estabilidad de la austenita en las aleaciones Hierro Cromo. En composiciones mayores de 0.22 % en peso de Carbono, el acero se vuelve austenítico y sensible a los procedimientos habituales de temple.</p>		
	Austenítico	Ferrítico	Martensítico

	*0.035 - 0.08% ambientes corrosivos *<0.035% para soldar *0.25% para resistencia a altas temperaturas	0.08 hasta 0.2 %	0.2 a 0.28 %
Otros	Nitrógeno	Es un elemento gammágeno que se puede utilizar en lugar del Níquel para abaratar costos, no provoca la disminución en la resistencia a la corrosión, ni dificulta la fabricación ni la soldadura.	
	Aluminio	Mejora la resistencia a la corrosión en ambientes salinos.	
	Titanio	Se usan para estabilizar y desoxidar el acero, mantiene estables las propiedades del acero a alta temperatura.	

1.2 DIAGRAMA DE FASES DE LOS ACEROS INOXIDABLES

1.2.1 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE LA ALEACIÓN HIERRO CROMO³

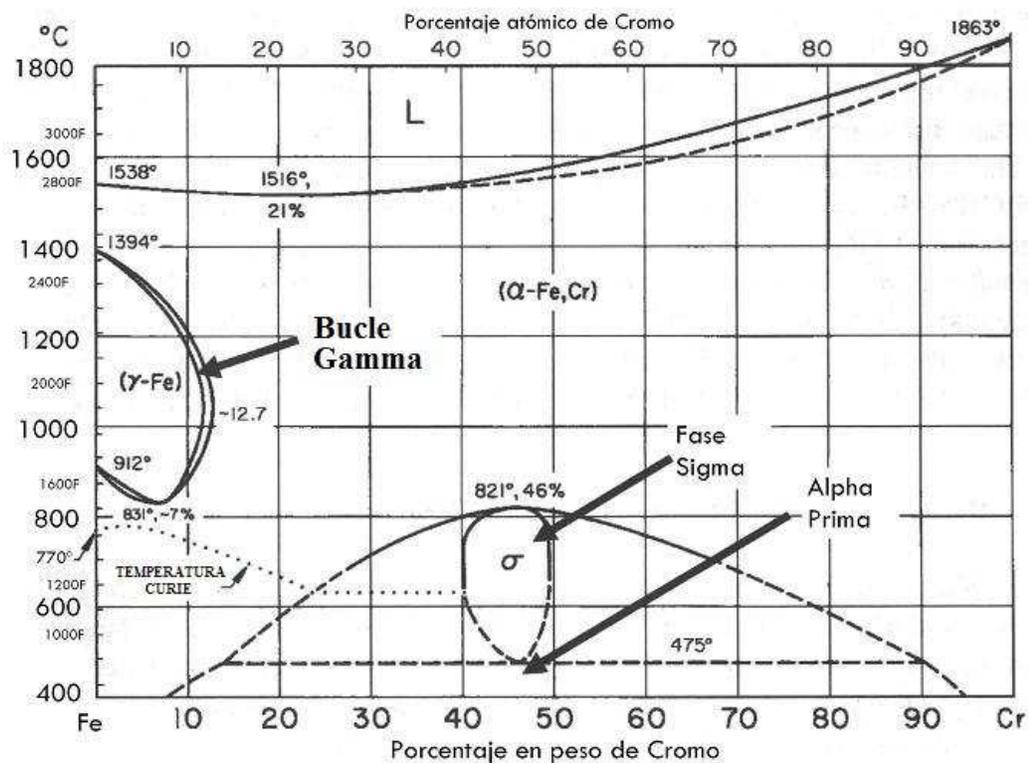


Figura 1. 2 Diagrama Hierro Cromo⁵

La fase austenítica está encerrada hasta 13% de Cromo pero puede ampliar sus límites hacia la derecha conforme se aumente el contenido de Carbono en la aleación.

La cantidad de Carbono influye en la obtención de estructuras ferríticas, en la figura 1.3 se observa que, al calentar la aleación con 0% de C y contenidos desde a 13 a 30 % de Cr la estructura no cruza líneas de austenización y se mantiene como ferrita incluso hasta el punto de fusión. Sin embargo se considera acero inoxidable ferrítico con composiciones desde 10.5 hasta 30% de Cromo.

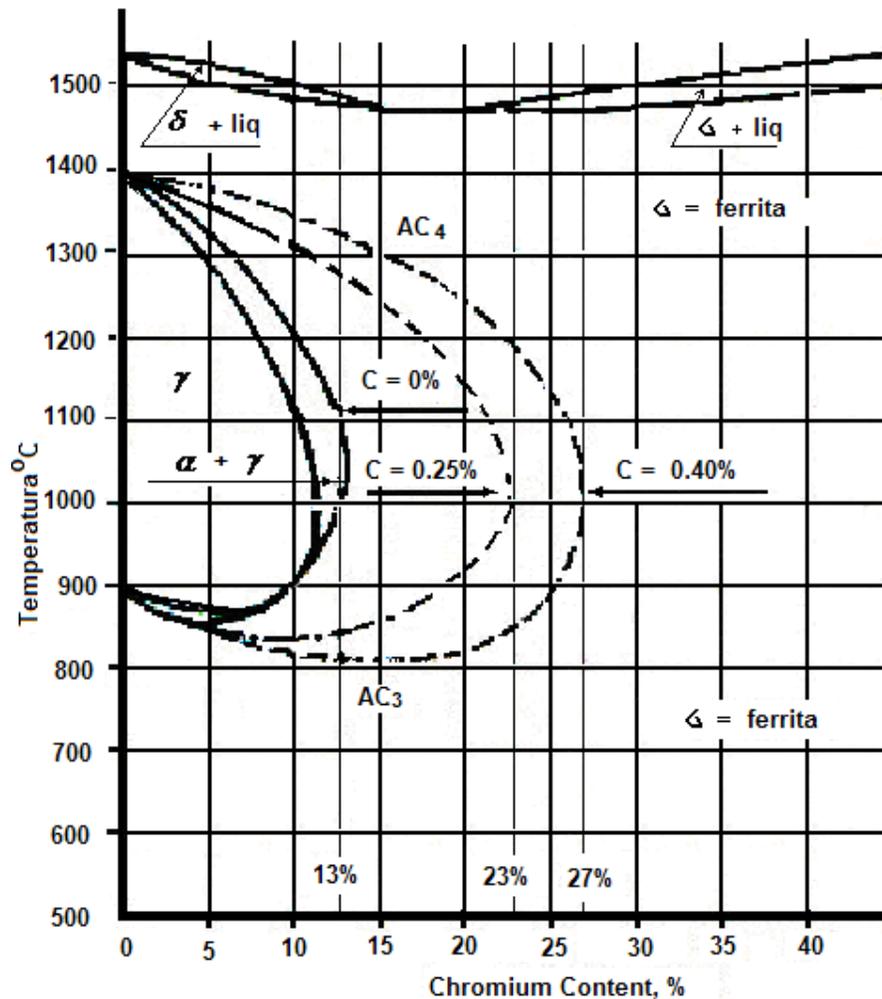


Figura 1.3 Influencia del Carbono ampliando el bucle Gamma³

Se limita el contenido de Cromo a 30% ya que con contenidos superiores de este aleante se genera una estructura de plasticidad y ductilidad reducida conocida como fase sigma (46%Cr-54%Fe).

La fase sigma tiene una estructura tetragonal y constituye un compuesto intermetálico duro que fragiliza toda la estructura. Aparece en el enfriamiento

desde 870°C hasta 530°C y enfriamientos lentos hasta 475°C donde ocurre la mayor fragilización. Se puede reducir su formación con enfriamiento rápido que retenga la estructura ferrítica.

Al aumentar el Carbono (hasta 0.4%) se favorece la formación de estructuras martensíticas ya que la zona austenítica aumenta. Para tal efecto el contenido de Cromo debe ser limitado (hasta 20%) de manera que al calentar la aleación transforme a austenita y se consiga aceros inoxidable martensíticos con temple incluso al ambiente. El contenido de Carbono además proporciona mayor dureza al material lo que hace posible la aplicación en equipo quirúrgico.

La estructura ferrítica presenta problemas de crecimiento de grano, causado por la falta de recristalización que ocurre con el cambio austenítico y el resultado es disminuir la tenacidad. La solución es un tratamiento de recristalización con deformación previa pero en procesos de soldadura no se lo puede realizar.

El Hidrógeno produce fragilización del acero inoxidable ferrítico, este problema no afecta a los Austeníticos y por tanto en procesos de soldadura, donde este elemento está presente, es más fácil su aplicación.

1.2.2 DIAGRAMA TERNARIO

El acero inoxidable austenítico, es una aleación compuesta por varios aleantes como el Cromo y Níquel que se hallan en mayor representación.

Un diagrama ternario ocupa 3 dimensiones espaciales, donde el plano de la base indica las tres composiciones y la elevación proporciona la temperatura.²

La figura 1.4 indica las secciones verticales del diagrama de equilibrio ternario de un acero inoxidable austenítico manteniendo constante el porcentaje de Cromo. Cada sección es un diagrama de fase Hierro Carbono para un acero con una cantidad específica de Cromo y Níquel.

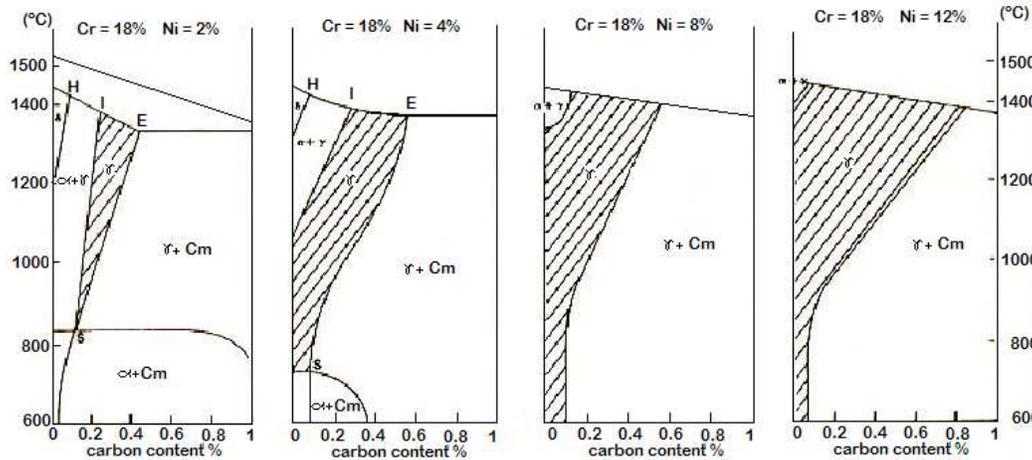


Figura 1. 4 Influencia del Níquel en la fase Gamma de un acero con 18% Cr³

La figura 1.5 muestra la influencia de aleantes sobre la temperatura y composición eutectoide de los aceros.

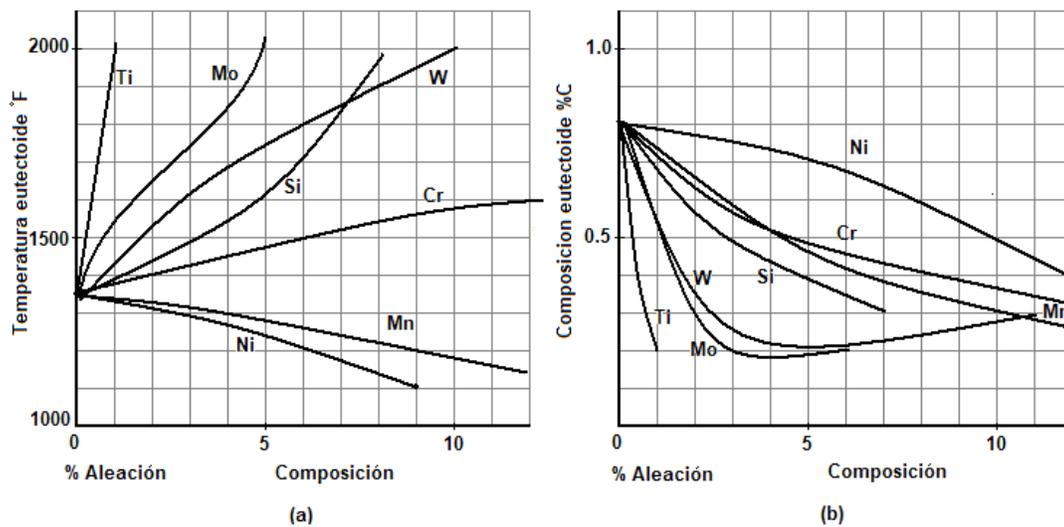


Figura 1. 5 Aleaciones Eutectoides Fe-Aleante-C. Efecto de la adición de aleaciones sobre (a) la temperatura de la reacción eutectoide, (b) sobre el contenido de carbono en el eutectoide.²

A medida que el contenido de Cromo y Níquel aumentan en el acero, el contenido de Carbono en la composición eutectoide decrece progresivamente. Además porcentajes mayores de Níquel determinan menor temperatura eutectoide. Esto permite identificar que los aleantes mencionados influyen para la formación de la fase austenítica.

1.3 TIPOS DE ACEROS INOXIDABLES

Desde el punto de vista metalográfico los aceros inoxidable se clasifican en cuatro grupos: Ferríticos, Martensíticos, Austeníticos y Dúplex.

1.3.1 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.²

Los aceros inoxidable austeníticos se pueden encontrar con distintas composiciones químicas, unos con bajo y otros con alto contenido de Carbono, algunos de composición estabilizada y otros de alta aleación. Cada uno de los aceros tiene propiedades que los caracterizan haciéndolos específicos para alguna aplicación así por ejemplo los de bajo Carbono tienen aplicaciones para condiciones sanitarias.

Los aceros convencionales (tipos: 301, 302, 303, 304, 305, 308, 309, 310, 316 y 317) pueden ser endurecidos con trabajo en frío más no por tratamientos térmicos, pero debido a procesos de soldadura un recocido subsecuente (mayor a 900°C) puede requerirse para una óptima resistencia a la corrosión, ductilidad, etc. Luego del recocido se necesita de enfriamiento en agua o aire.

Los aceros de bajo carbono (0.03% máximo), donde la precipitación de carburos intergranulares es baja, son: 304L, 316L y 317L siendo "L" la denominación en inglés de "Low Carbon".³

Los aceros austeníticos de composiciones estabilizadas son 321, 347 y 348, aquellos con alto grado de Nitrógeno: 201, 202, 304N, 316N, y la serie de aleaciones Nitronic y los austeníticos de alta aleación : 317LM, 317 LX, JS700, JS777, 904L, AL-4X, 2RK65, Carpenter 20Cb-3, Sanicro 28, AL-6X, AL-6XN, y 254 SMO. Estos aceros tienen buena resistencia a la corrosión de cloruros.

Los aceros inoxidable Austeníticos son aleaciones constituidas por Níquel y Cromo en mayor proporción. El Níquel es el aleante gammágeno que influye en la formación del campo austenítico.

En los aceros con 8% de Níquel y 18% de Cromo, el material se encuentra en la fase austenita a la temperatura ambiente.

La austenita tiene mejores propiedades de ductilidad y tenacidad debido a la plasticidad de la estructura cúbica centrada en las caras.

El Níquel mantiene la estructura austenítica a temperatura ambiente y debajo de ella, por eso estos aceros no producen martensita al templarse. La deformación en frío puede determinar la formación de estructuras martensíticas. Se obtienen con procesos de recocido a temperatura de 1000°C lo que impide la formación de Carburos de Cromo y esfuerzos residuales.

Los tratamientos térmicos en aceros inoxidable austeníticos generan aumento de grano pero a diferencia de los aceros al Carbono, no se provoca fragilidad elevada.

Presentan buena resistencia al impacto (mayor tenacidad) a bajas temperaturas por eso se usan en aplicaciones criogénicas. Tienen resistencias mecánicas altas 515 MPa (75 ksi) y alrededor de los 210 MPa (30 ksi) como resistencia mínima a la fluencia a temperaturas ambiente, presentando elongaciones significantes (35% hasta 45%) durante cargas de tracción.

No son magnéticos y resisten mejor la corrosión intergranular, pero se debe mantener el contenido de Carbono inferior al 0.08%.

En procesos de soldadura es conveniente contenidos inferiores a 0.03% de Carbono, e incluir aleantes como Titanio y Molibdeno para impedir la formación de Carburos de Cromo en los bordes de grano a temperaturas altas de manera que el Cr continúe en solución sólida en el Hierro y no se precipite.

La industria química y petroquímica los usa por su alta resistencia a la corrosión después de procedimientos de soldadura, además que la estructura austenítica mantiene alta ductilidad en estas condiciones.

La soldadura por arco de estos aceros se realiza de manera cuidadosa manteniendo temperaturas bajas en la zona afectada por el calor y el metal base con: cordones y arcos cortos, bajas corrientes, tiempos de enfriamiento entre cordones.

En la soldadura de estos aceros, por su menor conductividad térmica que los aceros al carbono, se requiere una menor cantidad de calor.

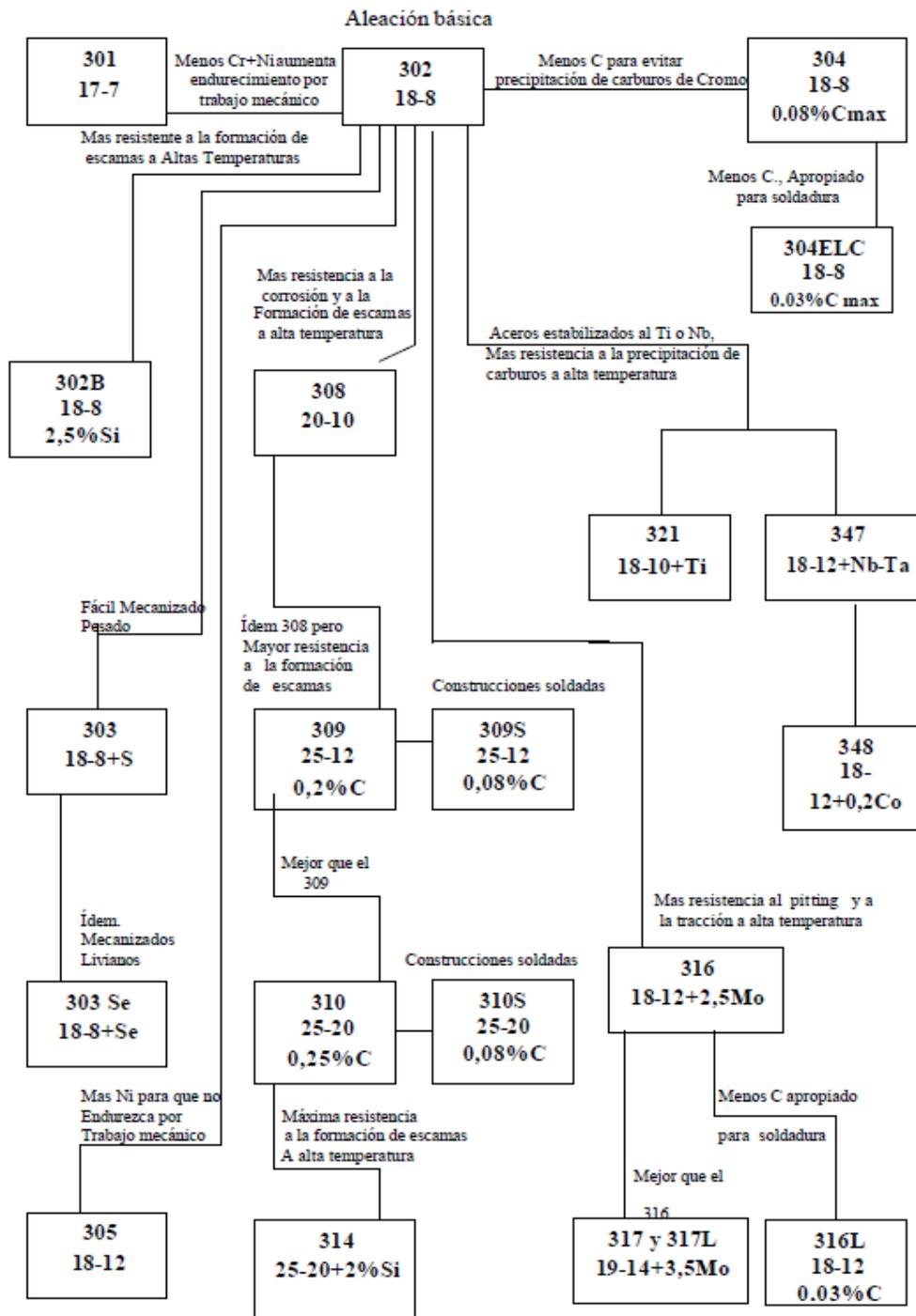


Figura 1. 6 Desarrollo de los aceros inoxidable austeníticos.³

Los tipos más comunes de aceros inoxidable austeníticos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla1. 4 Desarrollo de los Aceros Inoxidable Austeníticos ³

Tipo	Descripción
302	Aleación básica con 18% de Cr y 8% de Ni.
302B	Se agrega Silicio para mejorar la resistencia a la formación de escamas a alta temperatura.
303	Agregado de S (0,15 min.) al grado 302 para mejorar maquinabilidad.
304	Menos %C (0,08%) que el 302 para mejorar resistencia a corrosión intergranular.
304L	Menos de 0,03% C (para reducir riesgos de corrosión intergranular.
304N	Agregado de N para aumentar la resistencia mecánica.
308	Agregado de Cr y Ni (20-10) para mejorar resistencia a la corrosión y a la formación de escamas. Se usa como aporte en soldadura.
309/309S	Mas Cr y Ni para aumentar resistencia a la formación de escamas a alta temperatura.
310/310S	Mas Cr y Ni para aumentar aun mas la resistencia a la formación de escamas a alta temperatura.
316	Agregado de 2-3%Mo mejora resistencia al Pitting y a la tracción a alta Temperatura.
316N	Agregado de 0,15% N para aumentar resistencia mecánica.
316F	Agregado de S y P para mejorar Maquinabilidad.
316L	Disminución del %C para mejor resistencia a Corrosión Intergranular en Soldadura.
316LN	Agregado de 0,15%N para aumentar resistencia mecánica.
317	Mas Cr y Ni (19-14+3,5%Mo) mejora resistencia a la corrosión.
317L	Menos C para mejorar resistencia a la Corrosión intergranular especialmente en Soldadura.
347	Acero Estabilizado con Nb y Ta para formar carburos de Nb y Ta y no de Cr.
348	Acero Estabilizado con Ta y Co limitados para aplicación nuclear.
321	Acero Estabilizado con Ti para formar carburos de Ti en vez de carburos de Cr.
303	Agregado de S (0,15 min.) al grado 302 para mejorar maquinabilidad.
202	Se reemplaza parcialmente el Níquel por N y Mn. 8% Mn y 0,25N.
205	Se reemplaza parcialmente el Níquel por N y Mn 15% de Mn y 0,35N.
201	Se reemplaza parcialmente el Níquel por N y Mn. 6% Mn y 0,25N.
314	Se incrementa el Si para aumentar la resistencia a la formación de escamas a alta temperatura.
303	Se agrega S para aumentar maquinabilidad.
303 Se 330	Se agrega Se para aumentar maquinabilidad y mejorar terminación superficial Más Ni (18-35) para aumentar resistencia al shock térmico y carburización.

Entre 425°C y 800°C se produce precipitación de Carburos de Cromo que debilitan el material afectando la ductilidad.⁶

Las temperaturas de servicio de estos aceros puede ser hasta los 760 °C o incluso mayores, pero la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión se

limita a estas temperaturas. Estos aceros tienen buena soldabilidad, si se toman precauciones.

Económicamente tienen mayor costo que los martensíticos y que los ferríticos de medio y bajo grado de Cromo, debido al gran contenido de aleantes.

Tabla1. 5 Propiedades Mecánicas mínimas a temperatura ambiente de aceros inoxidables Austeníticos.⁷

Aleación	Resistencia a la tracción		Resistencia a la fluencia		Elongación [%]	Reducción en área [%]
	[MPa]	[ksi]	[MPa]	[ksi]		
302	515	75	205	30	40	50
304	515	75	205	30	40	50
304L	480	70	170	25	40	50
308	515	75	205	30	40	50
309	515	75	205	30	40	50
310	515	75	205	30	40	50
316	515	75	205	30	40	50
316L	480	70	170	25	40	50
317	515	75	205	30	40	50
321	515	75	205	30	40	50
330	480	70	205	30	30	----
347	515	75	205	30	40	50

La resistencia a la corrosión uniforme, a la corrosión por picaduras y a la corrosión en resquicios normalmente aumenta con los niveles de Cromo y Molibdeno, mientras que para aumentar la resistencia a la corrosión bajo tensión, se necesitan altos niveles de Níquel y Molibdeno.

1.3.1.1 Acero Inoxidable Austenítico AISI 304.

No requieren un tratamiento de recocido posterior a procesos de soldadura (espesores delgados), o conformabilidad en frío.

El acero AISI 304L, tiene menor contenido en carbono y esto mejora las propiedades anticorrosivas del material.

Tabla1. 6 Composición química del acero inoxidable 304 y 304L⁸

Grado		Porcentaje						
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
304	Máx	0.08	2	1	0.045	0.03	18-20	8-10.5
304L	Máx	0.03	2	1	0.045	0.03	18-20.1	8-12

El bajo contenido de Carbono favorece a la poca precipitación de carburos en la zona afectada por el calor durante la soldadura por ende una susceptibilidad más baja a la corrosión intergranular.

Tabla 1. 7 Propiedades del acero inoxidable 304. ⁷

Propiedades	Métricas	Inglesas	Observaciones
Propiedades físicas			
Densidad	8 g/cc	0.289 lb/in ³	-
Propiedades mecánicas			
Dureza Rockwell B	70	70	-
Dureza Vickers	129	129	Convertida desde Rockwell B
Resistencia a la rotura	505 MPa	73200 psi	0% de trabajado en frío
Resistencia a la fluencia	215 MPa	31200 psi	-
Elongación a la rotura	70%	70%	En 50 mm (2 in)
Módulo de Elasticidad	193 – 200 GPa	28000 – 29000 ksi	-
Relación de Poisson	0,29	0,29	-
Impacto Charpy	325 J	240 ft-lb	-
Módulo de corte	86 GPa	12500 ksi	-
Propiedades eléctricas			
Resistividad eléctrica	$7,2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$	$7,2 \times 10^{-5} \cdot \text{cm}$	A 20 °C. A 650 °C: $1,6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$.
Permeabilidad magnética	1.008	1.008	
Propiedades térmicas			
Calor específico	0.5 J/g-°C	0.12 BTU/lb-°F	-
Punto de fusión	1400 – 1455 °C	2550 – 2650 °F	-
Solidus	1400 °C	2550 °F	-
Liquidus	1455 °C	2650 °F	-
Conductividad térmica	16,2 W/cm.°C	112 BTU in/hr-ft ² .°F	A 20 °C
Coefficiente de expansión térmica	18.7 $\mu\text{m/m}\cdot\text{°C}$	10.4 $\mu\text{in/in}\cdot\text{°F}$	De 0 a 650 °C

1.3.1.2 Acero Inoxidable Austenítico 316

Este acero inoxidable puede poseer una cantidad de Mo de hasta un 3%. El Mo le proporciona una mejor resistencia a la corrosión que el AISI 304 (en particular a la corrosión por picaduras y a la corrosión en resquicios en medios con iones cloruro). Al igual que el acero AISI 304, el tipo 316 posee alta soldabilidad. En general, no es necesario someterlo a un tratamiento térmico de

recocido posterior al proceso de soldeo, cuando se aplica soldadura en espesores finos.³

La variante AISI 316L posee un bajo contenido en Carbono, que la hace inmune a la sensibilización por la precipitación de Carburos de Cromo en los límites de grano. Así, esta versión se emplea frecuentemente en la soldadura de componentes de espesores gruesos. Por su parte, la estructura austenítica le proporciona una alta tenacidad.

1.3.2 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS Y MARTENSÍTICOS.³

1.3.2.1 Aceros Inoxidable Ferríticos

Obedecen al diagrama de fases Hierro Cromo. El acero inoxidable más simple contiene solamente Hierro y Cromo. Los aceros ferríticos pueden tener entre: 10,5 % hasta 30% Cr, y se mantiene con estructura cúbica centrada en el cuerpo siempre que no atravesase el campo de austenización que está limitado por el contenido de carbono.

A 10.5 % de Cromo su resistencia a la corrosión es mínima (solamente agua y no medios más agresivos). Los ferríticos presentan estructura cúbica de cuerpo centrado que tiene una plasticidad limitada lo que determina menor tenacidad que los Austeníticos.

Presentan susceptibilidad a la corrosión intergranular. La ductilidad y tenacidad aumenta con el incremento de temperatura.

Presentan menor endurecimiento por trabajo en frío y tienen mejor conformabilidad que los aceros austeníticos. Son no templables, no magnéticos y de baja conductividad térmica. En relación a los aceros austeníticos su costo es 70% menor.

1.3.2.2 Aceros Inoxidable Martensíticos.

Se generan por un temple desde la austenización de una aleación Hierro Cromo, dentro de los límites del bucle austenítico en el diagrama Hierro Cromo.

En estado de recocido estos aceros son ferríticos, pero se convierten en martensíticos con un enfriamiento más rápido (aire o medio líquido) desde una

temperatura superior a la crítica. No contienen más de 18% de Cromo (generalmente menor al 14%) y contienen una cantidad suficiente de Carbono para producir endurecimiento, el exceso de Carbono induce a mayores precipitaciones de Carburos de Cromo (quedando contenidos menores a 10% de Cromo) con lo que se pierden las propiedades de inoxidable.

Estos aceros pueden ser templados, revenidos y además son magnéticos. Después del temple al aire se los recoce a 700°C por 4 horas luego de lo cual se aumenta la temperatura hasta 850°C y se enfría lentamente 55°C por hora, en un horno, hasta 540°C y luego enfriarlos al aire hasta la temperatura ambiente.

Tienen alta templabilidad (facilidad de formar martensita).

1.3.3 ACEROS INOXIDABLES DUPLEX

Tienen Cromo, Molibdeno y aleantes estabilizadores gammágenos como Níquel y Nitrógeno que controlan las fases de austenita. Los elementos aleantes contribuyen a la formación de ferrita, estabilizando ambas fases de manera que la estructura resultante reúne ductilidad y mejor resistencia a la corrosión.

Son aceros de ($C < 0.03\%$), con más Cr ($20\% < Cr < 30\%$), para mantener la resistencia a la corrosión de los aceros Austeníticos y menos Ni ($5\% < Ni < 8\%$), para aumentar el contenido de ferrita con el objeto de incrementar la resistencia en medios corrosivos (cloruros) a alta temperatura.

Se mejora la resistencia a la corrosión Intergranular ya que los Carburos de Cromo tienden a precipitar en la interfase Ferrita-Austenita. El Cromo que se disuelve es de la fase de ferrita produciéndose rápida difusión y homogenización. Esto impide altas concentraciones de Cr en los bordes de grano y así menor corrosión.

Tienen más tenacidad que los Ferríticos y resisten a la corrosión por picaduras y bajo tensión.

1.3.4 CUADRO COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE ACEROS INOXIDABLES MÁS COMUNES.

En la tabla a continuación se presentan aspectos generales de aceros inoxidable austeníticos, ferríticos y martensíticos comunes.

Tabla1. 8 Comparación de aceros inoxidables

parámetro	304	304L	316	430	410
TIPO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	FERRÍTICO	MARTENSÍTICO
Aplicación	Decoración, industria y en ambientes costeros, equipos de cocina. Aplicaciones interiores y exteriores de los edificios en atmósferas urbanas normales.	Decoración e industria y en ambientes costeros.	Este tipo de acero está indicado para las zonas de costa donde los haluros (principalmente cloruros) están presentes en el aire.	Aplicaciones internas o estéticas.	Combinan la dureza de los ferríticos con la resistencia a la corrosión y la deformabilidad de los austeníticos, y se usan habitualmente para la cuchillería.
Soldabilidad y deformabilidad	Adecuadas y permiten crear buenos acabados y juntas invisibles	Excelente	Excelente	Buena	Buena
Resistencia a la corrosión	Buena	Excelente	Mejora la resistencia del acero inoxidable a la corrosión por picaduras.	Buena	Buena

1.4 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros al Cr – Ni presentan buena aptitud para la soldadura, se pueden realizar casi todos los procesos y obtener buenas uniones si son aplicados adecuadamente.

Los puntos de fusión (1425° C - 1475°C) y la conductividad térmica de los aceros inoxidables son más bajos en comparación a los aceros al carbono, por lo que cualquier proceso de soldadura debe aplicarse con cantidades bajas de calor ya que éste al transmitirse lentamente tiende a localizarse en la junta de soldadura.

Se debe evitar que la zona afectada por el calor permanezca mucho tiempo en el rango de temperaturas de sensibilización, por lo que en la soldadura se

deben usar bajas temperaturas entre pases para incrementar la tasa de enfriamiento.

Las uniones de soldadura pueden alcanzar una resistencia mecánica alta sin necesidad de aplicar al área de unión un tratamiento térmico posterior. El material de aporte influye en la resistencia mecánica, pero debido al calor que se alcanza se pueden llegar a tener precipitaciones de carburos.

El grado de precipitación de carburos depende del tiempo y de la temperatura, pero puede evitarse si se reduce al mínimo el ciclo de operación de la soldadura. Por ejemplo si se utilizan metales de aportación que funden 870°C y se evita un enfriamiento lento a 425°C , prácticamente no ocurrirá precipitación de carburos.

El Carbono reduce rápidamente la resistencia a la corrosión cambiando las propiedades del acero inoxidable, por esta razón se debe controlar su presencia en la varilla de aporte, fundente o gases protectores. Así se hace necesario que la unión se proteja con fundente, para retener los elementos aleantes y excluir impurezas, además de controlar la humedad que da lugar a porosidades.

1.5 TIPOS DE CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES OCASIONADOS POR PROCESO DE SOLDADURA

Los aceros inoxidables austeníticos son seleccionados por su alta resistencia a la corrosión, a elevadas temperaturas las tasas de corrosión aumentan y se produce pérdida de material en el tiempo. Varios factores pueden influir para producir corrosión ya sea ésta general, por picadura, inter granular, bajo tensión, por hendidura, galvánica, etc.

La sensibilidad a la corrosión puede aumentar debido a los cambios metalúrgicos combinados con los esfuerzos residuales provocados por procesos de soldadura por esta razón debe darse un especial cuidado al aplicar soldadura en los aceros inoxidables porque un resultado no deseable puede ocasionar corrosión intergranular o corrosión bajo tensión.

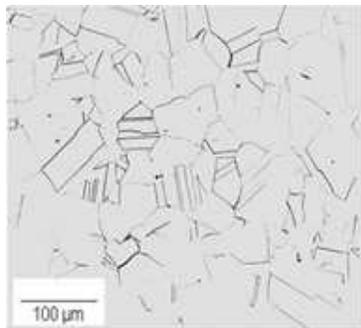
1.5.1 PRECIPITACIÓN DE CARBUROS O CORROSIÓN INTERGRANULAR.

El mecanismo de corrosión más peligroso en las soldaduras de aceros inoxidable, es el ataque intergranular (IGA) y a este se asocia el fenómeno de fisuración por la corrosión provocada de tensiones intergranulares. Este ataque es común en la zona afectada por el calor (ZAC) de los aceros inoxidable austeníticos y resulta de una condición metalúrgica llamada sensibilización.⁷

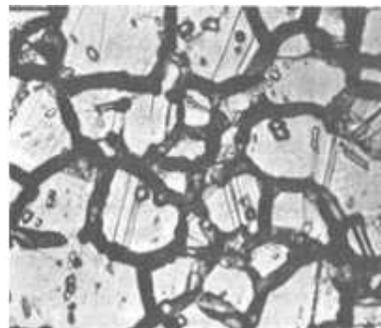
En el rango de temperaturas entre los 425 a 800 °C⁶ se produce la precipitación de carburos de Cromo (Cr_{23}C_6) por difusión hacia los límites de grano, dando como resultado la sensibilización de estos aceros.

La reducción de Cromo en la zona adyacente al límite de grano vuelve a la zona susceptible a la corrosión. En el caso de que la junta se someta a sus condiciones de servicio con atmósferas corrosivas, la zona sensible (con bajo contenido de Cromo) sufrirá corrosión, y en caso de que la corrosión sea bastante severa puede llegar a formar grietas y luego a un desprendimiento de los granos (escamas de material).

Al aplicar el calor para efectuar la soldadura, en la zona que se une se produce un gradiente de temperatura entre la temperatura del proceso y la temperatura ambiente. Así en las proximidades de la zona fundida se encuentran zonas con temperaturas comprendidas entre 425 °C y 800 °C temperatura en la que el Carbono tiende a combinarse con el Cromo que precipitan en las uniones de los granos de la matriz austenítica.



a)



b)

Figura 1. 7 a) Micrografía de un acero inoxidable austenítico, b) micrografía de precipitación de carburos (ataque intergranular) de un acero 304.⁷

La pérdida de Cromo por precipitación es más elevada dependiendo del tiempo que se mantenga la zona afectada en el campo del rango de temperatura de sensibilización y cuanto mayor sea el contenido de Carbono.

Algunos aceros se han creado para no tener problemas con la precipitación de carburos, pero si bien son aptos desde el punto de vista de soldabilidad, no sustituyen en todos los casos a los otros aceros que tienen propiedades favorables desde otros puntos de vista.

Estos aceros son aquellos con contenido máximo de Carbono de 0,030% y así el fenómeno de precipitación de carburos es casi inexistente y para condiciones de servicio excepcionales el contenido de Carbono debe ser inferior al 0,02%.

El Ti o Nb estabilizan a los aceros (elementos presentes en los tipos 321 y 347), estos elementos tienen mayor afinidad por el Carbono que el Cromo y así forman carburos más estables sin alterar el contenido de Cromo del acero.⁶

Los demás aceros con contenidos de Carbono no tan bajos o que no son estabilizados no deben ser desechados por presentar el inconveniente de sensibilización a la precipitación de carburos. Se pueden utilizar sin precaución especial siempre que, en servicio el medio no sea excesivamente hostil para que se tema la corrosión de la zona sensibilizada.

La precipitación de carburos puede limitarse mediante la selección de un adecuado proceso de soldadura y una técnica depurada, en la figura 1.8 se observa la precipitación de carburos en la unión entre dos metales disímiles al utilizar soldadura fuerte a temperaturas mayores de 800 °C (llama oxiacetilénica). Si las condiciones de corrosión en servicio son severas, se puede remediar la sensibilización provocando la nueva puesta en solución de los carburos mediante un tratamiento de hiper-templado clásico del conjunto de la pieza unida por soldadura.⁶

Al aplicar tratamientos térmicos de alivio de tensiones debe tomarse en cuenta que el rango de temperaturas, donde se realiza el tratamiento, se traslapa con el rango de temperaturas donde se produce la precipitación de carburos. Al

aplicar tratamientos térmicos postsoldadura como el alivio de tensiones hay que evitar sensibilizar a la junta.



Figura 1. 8 Unión en fuerte de cobre y acero inoxidable 304 con temperatura mayor a 800°C

En la Figura 1.9 se indica como a menores contenidos de carbono existe menor susceptibilidad a la formación de carburos.

Los aceros de bajo Carbono tienen una excelente soldabilidad, no existe riesgo de agrietamiento, además de tener una notable maleabilidad. En comparación con los aceros de los otros grupos, presentan el inconveniente de tener un límite elástico débil.

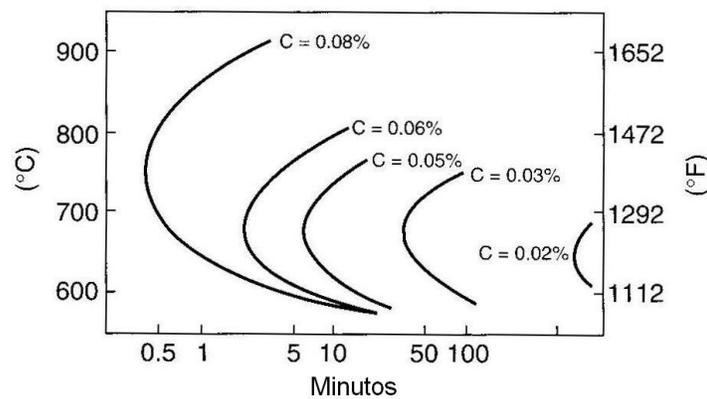


Figura 1. 9 Curvas de tiempo - temperatura - precipitación de $M_{23}C_6$ para aleaciones 18Cr-8Ni, a diferentes contenidos de carbono.

Otra solución a la precipitación de carburos puede ser usar aceros recocidos para remover los esfuerzos del trabajado en frío ya que estos aceleran la corrosión intergranular.

A temperaturas mayores a los 850 °C, estos carburos se disuelven en la matriz austenítica, por lo que la zona adyacente al límite de fusión no presenta carburos de cromo.⁷

También se puede aplicar un tratamiento térmico de alivio de tensiones que se logra calentando la junta hasta temperaturas entre los 900 a 1100 °C. A estas temperaturas los carburos que se formaron en los límites de grano se disuelven en la matriz. Luego, se procede a enfriar rápidamente para evitar que la junta permanezca en el rango de temperaturas de sensibilización. El problema es que el enfriamiento brusco puede provocar la distorsión, y es impráctico si las piezas son demasiado grandes.

Cuando se requiere una buena resistencia mecánica y no existe gran preocupación por la corrosión intergranular, los aceros inoxidable, con contenidos de Carbono en el rango de 0,04 - 0,10% son recomendados. La precipitación de una fina red de Carburos de Cromo, tan perjudicial bajo el punto de vista de la corrosión, se torna benéfica cuando lo que interesa son las propiedades mecánicas.

1.5.2 FISURACIÓN POR CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.⁹

La sensibilización en los aceros puede llevar a la fisuración bajo tensión originada por corrosión intergranular en aceros inoxidable austeníticos y ferríticos. Este tipo de corrosión depende también de los diseños de soldadura o condiciones que provoquen altos esfuerzos residuales o concentradores de esfuerzos. Con mayor frecuencia este tipo de fisuración se desarrolla en medios con soluciones cloruradas.

Elementos sometidos a tracción suelen ser más susceptibles que los sometidos a compresión. Estas fuerzas pueden ser externas (aplicando carga) o internas que provienen de deformaciones o de diferencias de dilatación a consecuencia de un tratamiento térmico o una soldadura.

1.5.3 CORROSIÓN GALVÁNICA⁹

La corrosión galvánica (acción localizada) puede darse cuando una unión entre dos metales disímiles está sumergida en una solución que actúa como

electrolito. En un medio corrosivo, los dos metales diferentes forman unos electrodos cortocircuitados y constituyen una celda electroquímica. De ello resulta la disolución del electrodo anódico, mientras que el cátodo permanece inalterable.

El potencial variará según la posición ocupada por los metales y aleaciones en el cuadro de las series galvánicas que se acompaña.

Tabla1. 9 Serie Galvánica⁹

EXTREMIDAD PROTEGIDA CATÓDICA	METALES MAS NOBLES
	Oro Grafito Plata
Pasivo	Acero inoxidable tipo 316 Acero inoxidable tipo 310 Acero inoxidable tipo 446 Acero inoxidable tipo 304 Acero inoxidable tipos 301 y 302 Acero inoxidable tipo 434 y 430 Acero inoxidable tipo 410
Pasivo	80% Ni - 20% Cr Inconel 60% Ni - 15% Cr
	Níquel Metal Monel Cuproníquel Bronce Cobre Latón
Activo	80% Ni - 20% Cr Inconel 60% Ni - 15% Cr
	Níquel Estaño Plomo
Activo	Acero inoxidable tipo 316 Acero inoxidable tipo 310 Acero inoxidable tipo 304 Acero inoxidable tipos 302 y 301 Acero inoxidable tipo 446 Acero inoxidable tipos 434 y 430 Acero inoxidable tipo 410
	Fundición de hierro Cadmio Aluminio 2S Zinc Magnesio en aleaciones Magnesio
EXTREMIDAD CORROIDA ANODICA	METALES MENOS NOBLES

Los factores que influyen en la corrosión galvánica se mencionan en la tabla a continuación.

Tabla1. 10 Factores que influyen en la corrosión galvánica.

Factores que influyen la corrosión galvánica ⁹	
Conductividad del circuito	Debe existir contacto entre metales diferentes en una solución de alta conductividad.
Potencial entre ánodo y cátodo	El metal que ocupa la posición más alta en la serie constituye el cátodo. El otro metal es el ánodo (es el que resulta atacado por la acción de la celda). El potencial incrementa cuanto más apartadas unas de otras son las posiciones ocupadas por cada metal en la serie. Los aceros inoxidable en estado pasivo figuran en la serie justo a continuación de la plata, del grafito y del oro. Así pues, en una solución oxidante, los aceros inoxidable pasivos suelen constituir el cátodo, mientras que serán los otros metales los que serán atacados. Cuando la solución es reductora, el acero inoxidable se vuelve activo y los metales tales como el cobre y el bronce constituirán el cátodo y acelerarán la corrosión del acero inoxidable.
Áreas relativas del cátodo y ánodo	El área relativa de las superficies influye en la acción galvánica. Un ánodo pequeño con un cátodo grande produce una corriente de elevada densidad y acelera la corrosión en el ánodo. Nunca utilizar piezas de sujeción de aluminio para acero inoxidable pero viceversa el empleo resulta satisfactorio.
Relación geométrica entre superficies de distintos metales.	Un borde o esquina de un metal menos noble no deberá estar en contacto con el centro de un área de gran superficie del material cátodo si llega a formarse una celda galvánica.

Así por ejemplo, el uso de ácido clorhídrico, para sustituir un material de limpieza normal, puede destruir la película pasiva del acero inoxidable.

1.5.4 OTROS TIPOS DE CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES

1.5.4.1 Corrosión Por Picadura y Por Hendidura ⁹

Esta corrosión se produce básicamente por existir un par galvánico, en general los aceros inoxidable son catódicos (protegidos de corrosión galvánica) en relación al resto de los aceros ordinarios.

La picadura afecta a una superficie muy pequeña de los aceros inoxidable mientras que el resto permanece intacto, estos puntos afectados se convierten en ánodos dando origen a un par galvánico. La diferencia de potencial entre los dos elementos del par es de 0.5 a 0.6 V en el caso del acero 18Cr-8Ni.

El Cromo, Molibdeno, Tungsteno, y Nitrógeno son elementos que mejoran la resistencia a la corrosión por picadura y por hendidura.

Cuando esta corrosión se produce en presencia de cloruros ácidos, tales como el Cloruro Férrico y el Cloruro Sódico se denomina corrosión por pinchazos de alfiler.

1.5.4.2 Cavitación ⁹

Se obtiene por formación de picaduras o cavidades bajo el efecto dinámico de un líquido. El fenómeno se debe a los choques de burbujas de vapor (varias veces en el mismo sitio) en las zonas de depresión, el vapor se condensa bruscamente bajo la influencia de un aumento de presión y como efecto se produce desprendimiento del material.

Los aceros inoxidable, austeníticos o martensíticos, presentan mayor resistencia a la cavitación que los aceros poco aleados.

1.5.4.3 Corrosión Microbiológica ⁷

Ocurre generalmente en medios acuosos donde las bacterias aeróbicas atacan al material, lo que provoca que el material presente picaduras u hoyos. La presencia de residuos biológicos y productos corrosivos presentes en agua fresca o de mar causan dichas picaduras.

Los aceros inoxidable austeníticos son particularmente susceptibles a este tipo de corrosión si existe la presencia las dos fases austenita y ferrita (dúplex) en la microestructura.

1.5.4.4 Ataque Selectivo de Ferrita ⁷

La presencia de ferrita es necesaria para evitar fisuración en juntas de soldadura de aceros inoxidable austeníticos. En ciertos ambientes donde se manufactura urea, o se trabaja con ácidos orgánicos, la ferrita es selectivamente atacada en este tipo de aceros.

1.5.4.5 Corrosión Por Contacto ⁹

En el acero inoxidable si se incrusta una diminuta partícula de acero al carbono, una escama de óxido, cobre u otra sustancia extraña, puede ser

motivo suficiente para destruir la pasividad en el punto de contacto. La partícula extraña actúa como ánodo. La acción electroquímica disuelve lo contaminado e iones de hidrógeno se liberan haciendo que el acero inoxidable se vuelva activo en ese punto. La acción de picado puede proseguir después de haber sido eliminada la partícula extraña (se ha constituido una celda activa-pasiva).

1.5.4.6 Corrosión Por Fatiga ⁹

Los esfuerzos aplicados o tensiones residuales combinados con agentes ligeramente corrosivos sobre cualquier metal o aleación pueden agrietar o quebrar al mismo. Las soluciones de cloruro son muy perjudiciales al provocar el agrietamiento de los aceros inoxidables austeníticos.

Son muy susceptibles las piezas que han estado sometidas a un fuerte trabajo en frío, pero el acero recocido puede también agrietarse cuando se lo somete a condiciones difíciles (el agrietamiento se produce fácilmente en soluciones calientes que en frías).

1.6 SOLUCIONES A LOS TIPOS DE CORROSIÓN ⁹

1.6.1 CORROSIÓN INTERGRANULAR

La precipitación de carburos puede ser eliminada por uno de los tres procedimientos indicados a continuación:

a) Por tratamiento térmico de normalizado: Luego de aplicar un proceso de soldadura, calentar el acero hasta una temperatura alta para disolver los carburos (900°C), y luego enfriar rápidamente (en agua o aire) evitando que se vuelva a precipitar el carburo. Para un normalizado efectivo, toda la pieza deberá ser tratada y no solamente la zona afectada por el calor.

En procedimientos de soldadura no se debe exponer la junta a temperaturas de sensibilización por tiempos prolongados.

b) Utilizando acero con contenido menor a 0,03 % de Carbono.

c) Utilizando un acero estabilizado: el Titanio, Molibdeno o el Niobio se combinan con el Carbono y evitan las precipitaciones perjudiciales, ya que hay más atracción por estos elementos que el Cromo. Los aceros estabilizados son

necesarios para todo servicio que implique prolongadas exposiciones a las temperaturas entre 425° C y 800 °C.

1.6.2 CORROSIÓN BAJO TENSIÓN

Las grietas comienzan a partir de una picadura, para reducir la tendencia a este tipo de fisuración se puede aplicar tratamientos térmicos postsoldadura de alivio de tensiones, evitando sensibilizar el material. Otra solución es eliminar la mayor cantidad posible de cloruros en los medios donde el acero prestará servicios. También se puede evitar el problema al usar aceros de gran pureza (costos altos) ya que el N, P, As, Sb, Bi y Al, hacen a los aceros susceptibles a este tipo de corrosión.

El incremento de la resistencia a la corrosión bajo tensión se consigue por influencia del Níquel y Molibdeno.

1.6.3 CORROSIÓN POR PICADURA

El Molibdeno contenido en los tipos 316 y 317 aumenta la resistencia al picado. Las superficies limpias y en buen estado tienen mayor resistencia al picado, grietas, fisuras y bolsas de estancamiento deberán ser eliminadas.

Evitar las soluciones que contengan cloruros tales como el Cloruro Férrico y el Cloruro Sódico. La presencia del ión cloruro en mayor concentración que la previsible corroe al acero inoxidable, por ejemplo la limpieza con soluciones de Hipoclorito.

1.6.4 CORROSIÓN POR CONTACTO

Un acero inoxidable en servicio deberá tener una superficie limpia y libre de escamas de óxido, de aceite, pequeñas partículas metálicas procedentes de herramientas, o cualquier material extraño. Una superficie limpia y lisa, así como la ausencia de arañazos y grietas reduce el riesgo de que se produzca este tipo de corrosión.

1.6.5 CORROSIÓN POR FATIGA

Se produce este tipo de corrosión cuando el acero inoxidable está sometido simultáneamente a un estado de tensión y a un medio corrosivo específico, se

puede prevenir el daño a través de un tratamiento térmico (tipo 315 y 317 mayor resistencia en condición de recocido), un aumento de sección de la pieza o reducción de la carga aplicada además de eliminar agentes críticos del ambiente como cloruros.

Para eliminar completamente las tensiones internas, sin perjuicio para la resistencia a la corrosión, se deberá tratar térmicamente por encima de 927 °C, con enfriamiento rápido (los carburos permanecen en solución). Los recipientes grandes deben ser sometidos a un tratamiento de revenido a 648 °C únicamente para los tipos 304 L, 316 L, 317 L, 321 y 347.⁹

Otra forma de prevenir esta corrosión es evitar toda cavidad donde se recoja agua durante el ciclo de operaciones, acumulándose una concentración de sales en la misma.

Evitar unir por soldadura metales con coeficientes de dilatación diferentes cuando el elemento deba ser calentado durante las operaciones. (Los tipos de la serie 300 se dilatan aproximadamente de 1 a 1 1/2 veces más que los tipos de la serie 400).

Utilizar los tipos con un máximo de 0,03% de Carbono, 304 L, 316 L, y 317 L, para reparar recipientes respectivamente de los tipos 304, 316 y 317 siempre que se desee reducir localmente las tensiones después de hecha la reparación.

Evitar el curvado cíclico que tensa el acero inoxidable por encima de su resistencia a la deformación o límite de elasticidad.

1.6.6 CORROSIÓN GALVÁNICA

Los materiales distintos ocupan un lugar en la tabla galvánica separándose en cátodos y ánodos, mientras mayor sea la separación, mayor es el riesgo de corrosión, por lo que se debe evitar que se formen estos pares, por ejemplo evitar reparaciones del acero inoxidable con materiales disímiles, evitar que el ambiente de servicio constituya un electrolito (humedad, medio acuoso) y evitar pequeñas áreas del metal menos noble (ánodo) no utilizar elementos de sujeción de aluminio para el acero inoxidable.

1.7 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES ⁷

La selección de un tratamiento térmico óptimo para aliviar las tensiones es difícil, ya que aquel que provea de un adecuado alivio de tensiones puede perjudicar la resistencia a la corrosión del acero inoxidable.

El alivio de tensiones generalmente no es aconsejable a menos que el ambiente de las condiciones de servicio sea conocido o sospeche causar corrosión bajo tensión, si el alivio de tensiones parece justificado debe darse de manera precavida cuidando los factores metalúrgicos.

La carburización es un fenómeno importante en los aceros inoxidables austeníticos, (especialmente en los de bajo contenido de carbono); pues el aumento de carbono aumenta la posibilidad de formación no deseada de Carburos de Cromo, por lo que toda sustancia carburante debe ser eliminada. No así en los aceros inoxidables martensíticos el carbono proporciona la dureza que se desea en rodamientos o en filos de herramientas.

La limpieza antes de aplicar el tratamiento térmico es de gran importancia, debe evitarse todo contacto con materias que contengan Carbono mientras el acero esta calentándose.

1.7.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN JUNTAS DE SOLDADURA

1.7.1.1 Pre calentamiento ⁷

Las temperaturas altas en los pre calentamientos disminuyen la tasa de enfriamiento, lo que tiene poco efecto sobre la transformación ferrita austenita, ya que esta transformación ocurre a temperaturas bien elevadas, con lo que temperaturas altas de pre calentamiento no tienen influencia en la formación de martensita. La temperatura de pre calentamiento debe ser menor que el rango de sensibilización para evitar la precipitación de carburos.

Se producen problemas de fisuración en cordones de soldadura en estructuras martensíticas, este inconveniente puede revertirse con pre calentamiento de la soldadura a 200°C ³, el pre calentamiento a esta temperatura se puede aplicar a

la soldadura de aceros inoxidable austeníticos para una mejor calidad del proceso de soldadura.

1.7.1.2 Tratamiento Térmico Post Soldadura ⁷

La mayoría de las juntas de aceros inoxidable austeníticos no requieren tratamiento térmico post soldadura. Sin embargo, el tratamiento térmico post soldadura deberá ser seleccionado si la intención de aplicarlo sea para aliviar tensiones o modificar la microestructura.

Los problemas de corrosión asociados con las soldaduras en los aceros inoxidable austeníticos suelen localizarse en la zona afectada por el calor. Si el ambiente de servicio es conocido por atacar las zonas sensibilizadas que contienen carburos intergranulares o si se requiere la máxima resistencia a la corrosión, un tratamiento térmico de solución post soldadura a temperaturas de recocido o normalizado debe usarse para disolver los carburos.

Métodos de calentamiento localizado, como la inducción de frecuencia alta o baja o el calentamiento de resistencia, deben ser analizadas cuidadosamente debido a que el tratamiento térmico puede producir una zona adyacente sensibilizada.

La soldadura debe ser enfriada rápida y uniformemente, al menos durante el rango aproximado de temperaturas entre los 900 hasta los 430 °C, para mantener el carbón en solución (evitar formación de carburos de cromo). Enfriamiento en agua o en chorro de agua es necesario para secciones gruesas, mientras que enfriamientos en aire es apropiado para secciones delgadas, el enfriamiento en agua puede generar tensiones residuales. ⁷

Óxidos de escala se formarán en la superficie del acero tratado a menos que se usen atmósferas protectoras. El óxido tiene que ser removido mediante maquinado, granallado, chorro de arena, o con impregnación de ácidos. Esta operación puede ser perjudicial si la soldadura tiene superficies premaquinadas.

Incluso tiempos cortos de exposición a temperaturas entre los 430 hasta el 900°C puede sensibilizar y reducir la resistencia a la corrosión del acero a

menos que se use aceros inoxidables de extra bajo grado de Carbono o estabilizados.

De todas maneras la necesidad de tratamientos térmicos de alivio de tensiones se debe a que el coeficiente de expansión térmica de los aceros inoxidables es mayor que los aceros al carbono, y su coeficiente de conducción térmica es muy bajo. Por lo que el momento que se funde material de soldadura en la junta y en su posterior solidificación se crean esfuerzos residuales, los cuales reducen las propiedades mecánicas de la junta de soldadura.

Cualquier calentamiento que no exceda los 450°C es seguro, y cualquier reducción en los esfuerzos residuales reducirá la susceptibilidad para ciertos mecanismos de corrosión.

Tratamientos térmicos postsoldadura de uniones disímiles pueden ser complicados. Es esencial para estas soldaduras que el ciclo de tratamiento térmico a utilizar sea apropiado para ambos materiales. En estructuras martensíticas para evitar la fisuración de cordones de soldadura se realizan tratamientos térmicos postsoldadura con temperaturas del orden de los 600 a 750° C.³

CAPÍTULO 2

2 LA SOLDADURA FUERTE DEL ACERO INOXIDABLE.

El objetivo del desarrollo de esta investigación es realizar soldadura fuerte en tubería de acero inoxidable AISI 304, que por contener Cromo al igual que las aleaciones de acero inoxidable en general no permiten una fácil aplicación de procesos de soldadura.

El método de soldadura fuerte requiere de habilidad y un estudio riguroso para producir una junta de calidad, fiable y satisfactoria.

Inicialmente la técnica se usaba para producir estructuras que fueran difíciles de unir usando métodos tradicionales. Para ello la idea era rellenar el espacio de la junta entre dos metales con metal fundido y permitir su solidificación.

2.1 SOLDADURA FUERTE – BRAZING.

El fundamento de la soldadura blanda y fuerte es que no se produzca fusión del material base. En la soldadura fuerte el punto de fusión del material de aporte debe estar sobre los 450°C (840°F) pero menor que el punto de fusión de los metales base.¹⁰

La soldadura fuerte resulta mejor que utilizar soldadura por fusión en circunstancias donde: los metales tienen poca soldabilidad, cuando se tengan materiales base disímiles, el calor de la soldadura sea intenso y por ende se dañen los componentes a unir (espesores delgados), cuando la geometría de unión es complicada y no se presta fácilmente para aplicar métodos de soldadura por fusión.

Tres criterios básicos definen y diferencian a la soldadura fuerte:¹¹

1. En la unión mediante este proceso no debe ocurrir fusión en el metal base.
2. El metal de aporte debe tener una temperatura de liquidus mayor a 450° C (840° F).

3. Acción capilar: El material de aporte debe penetrar las superficies a ser unidas por efecto capilar lo que depende del diseño de la junta y la separación entre las superficies a unir.

Si se emplea correctamente la soldadura fuerte se puede obtener una unión con mayor resistencia mecánica que la del metal de aporte y la del metal base.

En la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos es práctica generalizada mantener la temperatura del material base lo más baja posible, puede requerirse un calentamiento a 500 °C en aleaciones de Níquel de una manera controlada, para evitar precipitaciones de carburos que producen fragilidad.

En algunos procesos de soldadura por arco se crean gradientes altos de temperatura en el metal alrededor de la soldadura, lo que puede ocasionar una corrosión intergranular localizada por tiempos de exposición altos (TIG, MIG, Oxiacetilénica).

El mayor problema con los aceros inoxidable austeníticos es el calor aplicado, ya que calentarlo a temperaturas mayores a 425°C causa difusión atómica modificando las propiedades del metal. A estas temperaturas el Cromo se difunde hacia los límites granulares para formar Carburos de Cromo creando grietas en la superficie y reduciendo la resistencia a la corrosión.

Es necesario el calentamiento antes de colocar el material de aporte y la unión debe estar protegida por un fundente. Para calentar al metal base se puede usar soplete con gas Metano, Propano o la mezcla GLP y la llama reductora debe prevenir la formación de óxidos en la superficie. El operador debe dirigir la llama eficazmente para asegurar que el tiempo de exposición sea correcto, así se evitan concentraciones de calor y gradientes de temperatura. El acetileno con oxígeno es una mezcla de gases utilizados en la soldadura fuerte pero requieren mayor control porque alcanzan mayores temperaturas.

Antes de efectuar la soldadura se deben limpiar las superficies a unir para obtener mejores resultados. Los cambios metalúrgicos que acompañan a la soldadura fuerte están limitados a reacciones de solidificación e interfaz entre

el metal de aporte y base. La soldadura fuerte tiene una amplia gama de aplicaciones desde juguetería hasta vehículos aeroespaciales.¹¹

2.1.1 COMPARACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA FUERTE (BRAZING) Y SOLDADURA BLANDA (SOLDERING).¹⁰

El proceso de soldadura fuerte es muy similar al de soldadura blanda con respecto a la superficie metalúrgica, sin embargo difieren por el tipo de materiales a ser unidos, material de aporte, selección de fundente, y métodos de calentamiento. Se deben tomar en cuenta las consideraciones económicas que involucran al material de aporte, la tecnología del proceso y técnicas de inspección o prueba. La resistencia mecánica de soldadura fuerte se encuentra entre 70 000 PSI mientras que la resistencia mecánica de la soldadura blanda alcanza los 7000 PSI aproximadamente.

Tabla 2.1 *Comparación de Soldering, Brazing y Welding.*¹⁰

Parámetro	Proceso		
	Soldering	Brazing	Welding
Temperatura de fusión del material de aporte (solidus)	< 450° C (<840° F)	> 450° C (>840° F) Menor al punto de fusión del material base.	>450° C (>840° F)
Metal Base	No se funde	No se funde	-
Protección por medio de fundente	Requerida	Opcional	Opcional
Fuentes de calor	Horno, resistencia.	Soplete, inducción, horno, resistencia.	Plasma, arco sumergido, tungsteno, resistencia.
Tendencia a quemar o deformar el material base	Atípica	Atípica	Distorsión potencial y deformación del metal base.
Esfuerzo residual	-	-	Alrededor del área soldada.

2.1.2 VENTAJAS DE SOLDADURA FUERTE^{10,11}

Varias ventajas se pueden deducir de la soldadura fuerte:

- No se funden los metales base.
- Se pueden unir metales distintos (materiales fundidos con metales forjados y metales con no metales).
- Existen diversos métodos para calentar el material de aporte y llegar a la temperatura de soldadura.

- Las uniones son dúctiles.
- Capacidad para juntar metales base de diferentes espesores incluso delgados.
- Se requiere menos calor y energía que en la soldadura por fusión.
- Reducción de problemas de la zona afectada por el calor en el metal base.
- Posibilidad de aplicar la soldadura en lugares inaccesibles en los que no es posible realizar procesos de soldadura por fusión.
- Este método puede automatizarse.
- Posibilidad de abaratar el costo de fabricación de ensamblajes complejos y de múltiples componentes.
- Método simple para obtener áreas de junta extensas o cordones considerables.
- Temperatura de la junta cercana a la del metal base.
- Excelente distribución de esfuerzos y buenas propiedades de transferencia de calor.
- Capacidad para producir tolerancias de precisión.

Se puede aplicar soldadura a formas complejas con secciones variables teniendo poca distorsión y buena precisión de la junta.

A diferencia de la soldadura por arco (welding) en la cual la aplicación de intensidad de calor en áreas pequeñas genera desalineamiento, introduce esfuerzos residuales y la fusión puede perforar el material; La soldadura fuerte solo proporciona el calor necesario y con ello se mantiene el alineamiento de la junta.

- Conserva recubrimientos (se usa para mantener estética).

- Las uniones requieren poco o ningún acabado.
- Económico cuando se aplica en serie.
- Se pueden desarmar las uniones después de la unión por soldadura.
- Para metales base que se desean uniones metalúrgicas con alta resistencia pero conservando la resistencia del metal base.

Debido a que la aplicación de calor no tiene que ser localizada, la industria manufacturera se ve beneficiada del proceso ya que se puede automatizar con más facilidad. De esta manera y con las condiciones adecuadas de separación de junta y forma de calentamiento, el proceso de soldadura fuerte no depende mucho de la habilidad del soldador. La automatización se simplifica entonces a los métodos de aplicación de calor a través de sopletes, hornos, bobina de inducción, resistencia eléctrica.

2.1.3 CONDICIONES DE SOLDADURA FUERTE ¹²

Para obtener una soldadura fuerte en buenas condiciones es indispensable tomar en consideración los siguientes aspectos:

- Seleccionar el material de aporte apropiado.
- Protección de la unión con fundente o atmósfera inerte para evitar oxidaciones. En caso de usar fundente, seleccionarlo de acuerdo al material de aporte.
- Control de temperaturas de precalentamiento y soldadura.
- Velocidad adecuada del proceso.
- Diseño de la junta considerando la holgura adecuada que depende del material de aporte.
- Habilidad del operador.
- Limpieza de las superficies a unir.

- Correcta alineación de las piezas en la junta.

2.1.4 VARIABLES DE SOLDADURA FUERTE

Las variables del proceso de soldadura fuerte son:

- Temperatura: Pre calentamiento, Calentamiento (Soldadura).
- Tiempo de exposición.
- Metal de aporte.
- Protección de la unión.
- Junta (diseño).
- Tasa de material de aporte.
- Método de calentamiento.
- Postcalentamiento.

2.1.5 DESVENTAJAS DE SOLDADURA FUERTE ¹¹

Las desventajas de la soldadura fuerte son:

- La resistencia de la unión por lo general es menor que en una unión por fusión.
- La resistencia mecánica de la unión es menor que la resistencia de la varilla de aporte y de los metales base.
- Si los metales unidos por soldadura fuerte tienen una aplicación con altas temperaturas de servicio, la unión puede debilitarse.
- El color de la varilla de aporte puede no coincidir con el metal base.
- Algunos procesos de soldadura fuerte requieren de personal técnico capacitado para aplicar el proceso.

- Metalográficamente la soldadura fuerte es heterogénea, se halla compuesta del metal base y el material de aporte. Esto genera diferentes propiedades químicas y físicas sobre todo en los límites de la zona formado por la interfaz, que a veces se extiende a toda la junta.
- Para determinar la resistencia mecánica de la soldadura fuerte, no se aplican los criterios de la teoría de elasticidad y plasticidad de cuerpo metálico homogéneo (donde los esfuerzos son transmitidos uniformemente desde un elemento diferencial al inmediato siguiente). En una junta para soldadura fuerte compuesta de varios materiales con diferentes características de resistencia, los esfuerzos causados por cargas externas no tienen distribución uniforme.
- A pesar de que las temperaturas que se alcanzan en brazing son bajas, pueden afectar las propiedades de los metales que van a ser unidos. Por ejemplo piezas obtenidas por trabajo en frío pueden sufrir crecimiento de grano si la temperatura de brazing se halla sobre la temperatura de recristalización (1/3 temperatura de fusión) de estos metales base. Las propiedades mecánicas obtenidas después de un tratamiento térmico pueden ser alteradas por el calor de brazing.
- Como todo proceso de soldadura, brazing produce (HAZ) zona afectada por el calor con una micro estructura alterada. El ancho de la zona varía con la fuente de transmisión de calor. En general en brazing HAZ es menos aguda que en otros procesos.

2.1.6 MECÁNICA DEL BRAZING ¹⁰

El brazing permite la unión de los metales con una limitada disolución y deformación plástica del metal base, esto gracias a que la temperatura del proceso de unión está limitada a la temperatura del liquidus del material de aporte. Son los aleantes de este material de aporte que permiten tener temperaturas del liquidus (Liquidus: es la temperatura más alta a la cual el material de aporte está completamente fundido, también se considera como la mínima temperatura a la cual tiene lugar el proceso brazing) sobre los 450°C

(840°F) y bajo la temperatura del solidus del material base. El material de aporte es distribuido por capilaridad en el espacio cerrado de la junta.

2.1.7 CAPILARIDAD^{10,11}

La capilaridad es un principio físico importante y dominante que garantiza una buena unión. Es resultado de la tensión superficial entre los metales base y el material de aporte protegido por un fundente, y promovido por el ángulo de contacto entre el metal base y el metal de aporte. Se tienen mejores resultados cuanto menor y más regular es el espacio entre las piezas a unir.

El flujo capilar del metal de soldadura fuerte depende de su tensión superficial, de sus características de mojado, y de las reacciones físicas y metalúrgicas que tenga con el metal base, el fundente y óxidos superficiales del metal base. La tensión superficial, a medida que el fundente se desliza por el metal base, va formando un ángulo como se indica en la figura 2.1 y de este ángulo depende si el metal moja o no la superficie.

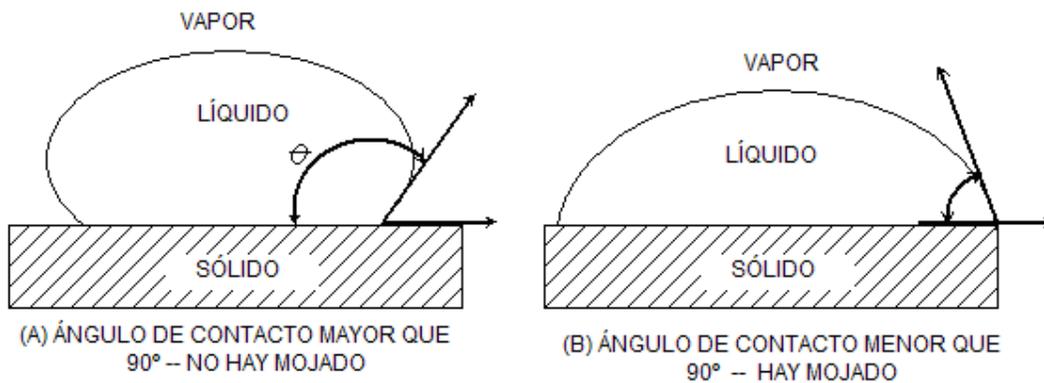


Figura 2.1 *Ángulos de mojado de metales de aporte para soldadura fuerte.*¹¹

En ocasiones el mojado se promueve con fundentes que desplazan o eliminan la mayor cantidad de óxidos. Durante el proceso de soldadura en la temperatura máxima (material de aporte líquido) se puede tener erosión en el metal base. Luego del depósito del metal de aporte, cuando éste se enfría, los efectos subsecuentes pueden estar bajo control de fenómenos de difusión.

La atracción capilar entre el metal base y el metal de aporte es mucho mayor que aquella entre el metal base y el fundente, por esta razón el metal de aporte desplaza al fundente.

Una fluidez elevada es una característica deseable en las varillas de aporte ya que la acción capilar podría ser insuficiente para atraer un metal de aporte viscoso a una unión que embona con una buena holgura.

2.1.8 PRECALENTAMIENTO

El precalentamiento es clave porque ayuda a disminuir la cantidad de tiempo de calor que se aplicará a la junta para conseguir una buena soldadura.

Después de realizar la junta, se calienta aproximadamente al 20 o 30% de la temperatura de liquidus para que ayude al fundente y al metal de aporte a fluir al interior de la unión.¹³ La temperatura de precalentamiento debe ser de 200°C aproximadamente como en el caso de la soldadura de aceros inoxidables martensíticos con el fin de evitar fisuras en el cordón de soldadura.³ El método de suministro de calor más sencillo es empleando soplete con combustible como gas natural, propano, butano, mezcla GLP u oxiacetileno. Se regula la llama del soplete para que sea ligeramente reductora, esta llama presenta en el interior, un dardo fino de color azul cerca de la boquilla del soplete. Enseguida, la llama se debe dirigir sobre la junta. El proceso continúa calentando la junta uniformemente, lo que se consigue con el movimiento continuo de la llama.

2.1.9 TIPOS DE SOLDADURA FUERTE ¹¹

Existen varios métodos para realizar el proceso de soldadura fuerte (Brazing), el calentamiento puede proveerse de diversas maneras:

- Por soplete
- Con horno
- Por inducción
- Por resistencia
- Por inmersión
- Al infrarrojo

Con cualquier método de calentamiento la temperatura del rango brazing (temperatura en que el material de aporte ya se funde y puede aplicarse a la unión) no debe variar y la penetración de varilla de aporte debe darse por efecto físico capilar.

Se pueden automatizar todos los procesos mencionados anteriormente, la automatización puede incluir inspección durante la realización de la unión pero ésta se justifica cuando la producción es en serie, en grandes cantidades y además se obtienen ahorros significativos.

2.1.9.1 Soldadura Fuerte Utilizando Soplete ¹¹

El calentamiento se realiza con uno o más sopletes de gas, dependiendo de la temperatura que se requiera, se puede emplear Acetileno, Propano, Butano y quemar con aire comprimido u Oxígeno.

Tabla 2. 2 Gases utilizados en la soldadura por soplete.

Gas	Temperaturas	Observaciones
Aire – gas natural	Temperaturas de flama más bajas, mínimo calor.	Para unir piezas pequeñas y secciones delgadas. Se puede controlar para no tener sobrecalentamiento.
Oxígeno – gas natural Oxígeno – propano Oxígeno – butano	Temperaturas de flama más altas	Con flama neutral se obtienen buenos resultados en cualquier aplicación.
Oxi acetilénica	Temperaturas altas (3200 °C máximo)	Se debe controlar la temperatura y tiempo de exposición.
Oxi hidrógeno	Temperaturas de flama bajas	Aluminio, aleaciones no ferrosas. El exceso de hidrógeno ayuda a limpiar y protegerla unión.

Es recomendable mover el soplete para evitar calentamiento local, es posible mecanizar y automatizar el movimiento del o los sopletes si fuese el caso de unir con soldadura elementos en serie.

Al momento de efectuar la soldadura se debe mantener el extremo de la varilla de aportación constante en la llama, sin agitarla en el baño de soldadura. Es

mejor balancear la llama de delante hacia atrás siguiendo el eje de unión y no transversalmente.¹¹

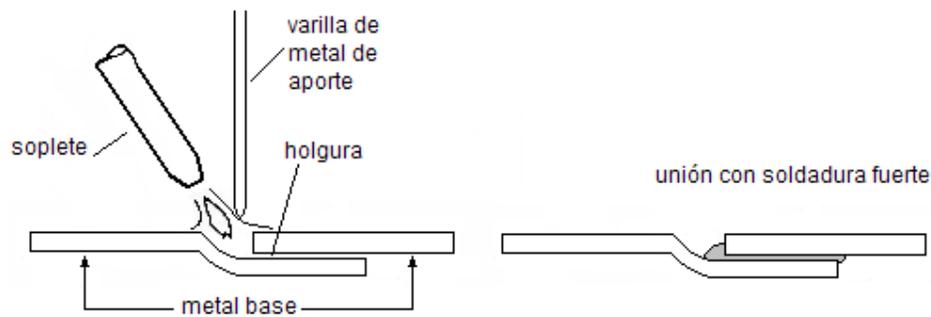


Figura 2. 2 Soldadura con soplete

Este proceso necesita protección con fundente. No es bueno sobrecalentar el metal base y el metal de aporte ya que puede difundirse con rapidez y salir de la unión por efecto de la gravedad.

La soldadura debe realizarse en un solo pase, en caso extremo de hacer repeticiones debe precalentarse la unión por delante del lugar donde se empiecen dichas repeticiones, como regla general si se requieren varias pasadas se debe usar soldadura por arco.

La técnica con soplete es la más sencilla, el operador puede ver la unión que está realizando y controlarla, el calor está direccionado a la unión pero la productividad en este caso es baja.

Un inconveniente de utilizar soplete es que una pequeña fracción del calor producido se utiliza para fundir el metal y se obtiene mayor zona afectada por el calor, además de la dificultad de mantener constante la composición de la llama, por consiguiente existe el riesgo de combustión excesiva del elemento de aleación (llama excesivamente oxidante) o de una carburación (llama excesivamente reductora), por tanto se tiene incertidumbre sobre la calidad real de unión. La boquilla del soplete debe ser pequeña para que produzca el calor necesario.

El soplete sin embargo puede emplearse para soldadura de chapas delgadas hasta 1 mm.

Al finalizar la soldadura se debe proteger el metal fundido manteniéndolo bajo la llama reductora hasta la solidificación del material de aporte.¹³

2.1.9.2 Soldadura Fuerte En Horno ¹¹

Este proceso es utilizado: si los elementos a unir pueden sostenerse dentro del horno por medio de guías, cuando la varilla de aporte puede colocarse en contacto con las superficies a unir, al realizar varias uniones simultáneamente, para calentar de manera uniforme elementos complejos y evitar calentamiento local.

Se pueden usar hornos eléctricos o a gas pero es necesario un control automático y es fundamental proteger la unión con fundente.

Los elementos se calientan en el horno hasta llegar al rango brazing y el metal de aporte que puede ser en forma de alambre, limaduras, cilindros, polvo, pasta, se diluye y penetra en la unión. Es necesario calentar hasta lograr que el metal de aporte fluya al interior de la unión, no se debe sobrecalentar ya que se daría una excesiva interacción entre los metales de aporte y base; el tiempo de calentamiento depende del espesor de las partes a unir.

Existen varios tipos de hornos: de lotes, de vacío (aplicación en campo aerospacial y nuclear), continuos que necesitan aire o atmósfera controlada. Los hornos tipo lote calientan por individual cada carga de trabajo mientras que los hornos continuos reciben flujo constante de elementos para unir.

En el caso de calentamiento por horno el proceso consiste en limpiar las superficies de unión, colocar la junta y colocar el material de aporte con el fundente, la entrada de los elementos al horno generalmente es por bandas transportadoras.

La regulación de la llama es importante, lo ideal es utilizar llama neutra o ligeramente reductora.

Una variación de la soldadura fuerte en horno es la soldadura fuerte al infrarrojo, el calentamiento se suministra por radiación luminosa de onda larga que proviene de lámparas de cuarzo de alta intensidad (5000 watts energía

radiante). Con ayuda de reflectores se enfoca la radiación a los elementos de unión.

2.1.9.3 Soldadura Fuerte Por Resistencia ¹¹

Por medio de los electrodos se conduce corriente eléctrica, las piezas a unir forman parte del circuito eléctrico, el material de aporte es colocado previo al paso de corriente y los fundentes en este caso se escogen según su conductividad.

El procedimiento es como la soldadura por puntos, es decir las piezas son sostenidas por dos electrodos que generalmente son de tungsteno, molibdeno, grafito y en ocasiones de acero.

Para el caso de las varillas de aporte con contenido de plata es necesario proteger la unión con atmósfera o usar fundente húmedo debido a que los fundentes secos se comportan como aislantes.

Al igual que en los otros casos debe haber limpieza previa y al sostener la junta entre los electrodos ya debe estar colocada la varilla de aporte y el fundente.

Las desventajas en este caso es que se puede producir un sobrecalentamiento al no tener un control de cantidad de corriente o sobrepasar el tiempo de exposición con lo que se obtendría oxidación. En los casos en que el metal base tiene espesor grande dificulta que la corriente circule uniformemente por la superficie, además que los electrodos pueden sufrir daños.

La presión debe mantenerse en el transcurso del paso de corriente para que se llegue al rango brazing y el enfriamiento rápido que se da luego de que el material de aporte ya fluye por la unión facilita el desalojo del fundente. El control del tiempo de exposición es realizado por el operador.

2.1.9.4 Soldadura Fuerte Por Inducción ¹¹

En este caso el calentamiento es proporcionado por corriente eléctrica inducida. Los elementos que se van a unir se comportan como el secundario en cortocircuito de un transformador, y se colocan dentro de la bobina (refrigerada

con agua) que conduce corriente alterna, el calentamiento se produce por la resistencia al paso de corriente por parte del metal base.

Al igual que en la soldadura con horno, el material aporte y el fundente se colocan previamente asegurándose que toda la superficie a ser soldada se caliente por igual.

Las frecuencias varían de 10 a 450 Hz, el calentamiento por inducción es muy rápido y el diseño de la junta es minucioso.

2.1.9.5 Soldadura Fuerte Por Inmersión¹¹

Existen dos métodos: en baño de metal fundido y en baño químico fundido.

El método de *baño de metal fundido* consiste en calentar un crisol de grafito hasta la temperatura necesaria para que el metal de aporte fluya, se debe garantizar que el tamaño del crisol y el método de calentamiento sean los correctos para alcanzar la temperatura de soldadura fuerte. Sirve para unir elementos pequeños y requiere de fundente.

El método de *baño químico fundido* requiere calentamiento del fundente en un recipiente hasta el rango de temperatura de soldadura fuerte, en este caso el material de aporte se coloca previamente y se requiere de limpieza y precalentamiento de las piezas para garantizar que la temperatura del fundente sea menor que el rango de temperatura brazing. La limpieza posterior es obligatoria debido a que el fundente se adhiere a la unión.

2.2 MATERIAL DE APORTE

Inicialmente el proceso de soldadura fuerte era realizado por orfebres cuyo objetivo era unir metales preciosos. Por razones estéticas la combinación inicial fue latón - bronce – plata y se determinó que se podrían alcanzar temperaturas de fusión menores que las del latón, con buena adherencia y una mejor resistencia a la corrosión. Sin embargo innumerables combinaciones de plata cobre y zinc evolucionaron como consecuencia de la investigación para hallar menores puntos de fusión. De esta forma se desarrollan las combinaciones plata – latón, latón - plomo - estaño que revolucionarían el mercado y se

convertirían en los materiales de aporte disponibles para soldadura fuerte y blanda.¹⁰

Empíricamente la soldadura fuerte (Brazing) desarrolló la técnica de soldar con materiales de aporte cuyo punto de fusión sea bajo. Se utilizó estaño y plomo como material de aporte así también combinaciones de plata, cobre, arsénico las cuales rápidamente alcanzaban bajos puntos de fusión.¹⁰

Posteriormente las aleaciones de latón fueron desarrolladas y se encontró mejores resultados al unir cobre, plata y estructuras metálicas porque proveen de mayor resistencia mecánica de la junta, sin embargo generan temperaturas más altas.¹⁰

La selección de los grupos de materiales de aporte depende de las propiedades que se deseen obtener.

Para la unión por soldadura fuerte de aceros inoxidable se utilizan aleaciones de plata, cobre y cobre-zinc. Por ejemplo para una buena resistencia a la corrosión se usa aleaciones de plata-cinc. Si se desea alcanzar una buena resistencia mecánica no es recomendable ocupar material de aporte con fósforo porque se forman fosfuros de níquel en la unión y esto la vuelve frágil y quebradiza.¹⁰

Las varillas de aporte que tienen mayor contenido de Plata (Ag) poseen mayor fluidez en estado líquido siendo ésta una ventaja para el efecto capilar ya que así puede penetrar en espacios muy limitados (menor a un milímetro) formando uniones limpias. Hay que tomar en cuenta que mientras mayor sea el contenido de Plata (Ag) mayor es el costo del metal de aporte y menor el punto de fusión.

En el flujo de metal de aporte influyen consideraciones dinámicas como fluidez, la viscosidad, la gravedad, y los efectos de las reacciones metalúrgicas entre el metal de aporte y el metal base.

Los metales de aporte deben tener las siguientes propiedades:^{10,11}

- Las uniones de soldadura fuerte deben tener propiedades físicas y mecánicas apropiadas según la aplicación que vayan a tener.

- Temperaturas de fusión compatibles con las del material base.
- Tener fluidez necesaria en el rango de temperatura fuerte para penetrar en la unión por acción capilar.
- Capacidad de mojar las superficies de los metales base y adherirse a ellos para formar la unión.
- Composición química homogénea y estable para minimizar licuación. (Los metales de aporte propensos a la licuación fluyen lentamente y solamente penetran en uniones con grandes holguras).
- En una unión de soldadura fuerte el material de aporte no debe difundirse, diluir, erosionar el metal base o formar compuestos frágiles para no alterar las propiedades iniciales o tener propiedades que no cumplan los requisitos de la aplicación destinada al producto terminado.

Los metales de aporte puros tienen buena fluidez pero cuando se tienen combinaciones de dos metales, las propiedades cambian dependiendo de sus proporciones.

Con holguras adecuadas según el diseño de la junta, las aleaciones con rango brazing estrechos fluyen libremente por las superficies a ser unidas.

2.2.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE ¹¹

Existen cuatro factores principales para seleccionar el metal de aporte:

- Debe ser compatible con el metal base y con el diseño de la junta.
- Requisitos de servicio del ensamble (temperatura de servicio, vida útil, esfuerzos de carga, condiciones corrosivas.)
- Cumplir con la temperatura de soldadura fuerte que se requiera.
- Método de calentamiento.

Los metales de aporte con Cobre y Zinc sirven para la unión de metales ferrosos y no ferrosos, la resistencia a la corrosión de este metal de aporte no es suficiente para unir cobre, bronce y acero inoxidable.

En ocasiones es apropiado utilizar metales de aporte con Cobre y Fósforo por tener propiedades auto fundentes.

Para la mayor parte de metales ferrosos y no ferrosos (excepto Aluminio y Magnesio) se pueden usar metales de Plata.

Las aleaciones de Cobre y Plata contienen Cinc o Cadmio para disminuir las temperaturas liquidus o solidus, el Cinc combinado con Cadmio produce el efecto de mojar metales del grupo del hierro pero no se alean con ellos.

El Cadmio reduce las temperaturas de solidus y liquidus lo que incrementa la fluidez para efectuar la unión, tomando en cuenta que los óxidos de Cadmio son peligrosos para la salud.

El Litio metálico reduce los óxidos en el caso de unir por soldadura fuerte el acero inoxidable sin protección con fundente. Los Metales de aporte de Níquel generalmente se usan para aceros inoxidables de series 300 y 400, acero al carbono y aceros de baja aleación.

El manual de soldadura AWS recomienda grupos de materiales de aporte que se observan en la siguiente tabla, dependiendo del material base que se vaya a unir se pueden escoger los materiales de aporte.

Tabla 2.3 Combinaciones de metal base, metal de aporte ¹¹

	Al y sus aleaciones	Mg y sus aleaciones	Cu y sus aleaciones	Aceros al carbono y de baja aleación	Hierro Colado	Acero inoxidable	Ni y sus aleaciones	Ti y aleac.	W, Mo, Ta, Cb y aleaciones (metales refractarios)	Aceros De herramienta
Al y sus aleaciones	BAISi									
Mg y sus aleaciones	X	BMg								
Cu y sus aleaciones	X	X	B Ag,BAu, BCuP,RBCuZn	B Ni						
Aceros al carbono y de baja aleación	BAISi	X	B Ag,BAu, RBCuZn,B Ni	B Ag,BAu,BCu RBCuZn,B Ni						
Hierro Colado	X	X	B Ag,BAu, RBCuZn,B Ni	B Ag, RBCuZn, B Ni	B Ag,RBCuZn, B Ni					
Acero inoxidable	BAISi	X	B Ag,B Au	B Ag,BAu,BCu, B Ni	B Ag,BAu,BCu, B Ni	B Ag,BAu, BCu,B Ni				
Ni y sus aleaciones	X	X	B Ag,BAu, RBCuZn,B Ni	B Ag,BAu,BCu RBCuZn,B Ni	B Ag,BCu RBCuZn	B Ag,BAu, BCu,B Ni	B Ag,BAu, BCu,B Ni			
Ti y aleaciones	BAISi	X	B Ag	B Ag	B Ag	B Ag	B Ag	Y		
W, Mo, Ta, Cb y aleaciones (metales refractarios)	X	X	B Ag, B Ni	B Ag,B Cu ,B Ni*	B Ag, BCu, B Ni*	B Ag, BCu, B Ni*	B Ag, BCu, B Ni*	Y	Y	
Aceros de herramienta	X	X	B Ag,BAu, RBCuZn,B Ni	B Ag,BAu,BCu RBCuZn,B Ni	B Ag,BAu, RBCuZn,B Ni	B Ag,BAu, BCu,B Ni	B Ag,BAu, BCu RBCuZn, B Ni	X	X	B Ag,BAu, BCu RBCuZn, B Ni

X: No se recomienda, aunque se puede usar con técnicas especiales para ciertas combinaciones de metales disímiles.

Y: No es posible hacer generalizaciones sobre estas combinaciones. Consultar el Manual de Soldadura fuerte para averiguar cuáles metales se pueden usar.

*: Existen metales de aporte de soldadura fuerte especiales y se usan con éxito con combinaciones de metales específicas.

Metales de Aporte:

BAISi: Aluminio

B Cu P:

Cobre Fósforo

B Au: Base de Oro

BMg: Base de Magnesio

B Ag: Base de Plata

RBCuZn

Cobre Zinc

B Cu: Cobre

B Ni: base de Níquel

De acuerdo a la Tabla 2.3, para soldadura de acero inoxidable con acero inoxidable se pueden utilizar metales de aporte de los grupos BAg, BCu, BNi, BAu.

2.2.1.1 Grupos de Material de Aporte para soldadura en Acero Inoxidable ¹⁴

El grupo BAg sirve para realizar uniones en fuerte de materiales ferrosos y no ferrosos a excepción del Aluminio y Magnesio. Estos materiales de aporte tienen buena fluidez en juntas traslapadas o a tope siempre y cuando se utilice una holgura adecuada. Algunos de estos materiales contienen Cinc y Cadmio, y deben utilizarse con atmósfera o fundente protector. Es una varilla de aporte fácil de manejar tomando la precaución de ventilar el lugar de trabajo por el contenido de Cadmio.

El Grupo BAu se utiliza principalmente con metales base como Cobalto, Níquel, fundiciones o cuando se requieran uniones con buena ductilidad o resistencia a la corrosión. Se utiliza para unir espesores delgados con técnicas de soldadura fuerte en horno, por inducción y por resistencia sin necesidad de fundente, en caso de requerir protección se puede usar ácido bórico (bórax). El costo de los materiales de este grupo es elevado.

Los grupos BCu, RBCuZn se utilizan para unir metales ferrosos y no ferrosos, debe evitarse sobrecalentamiento en el grupo cobre-cinc. El grupo BCu puede utilizarse para juntar metales ferrosos, aleaciones de cobre y aleaciones de Níquel que requieren protección gaseosa en soldadura fuerte en horno. Los metales con tendencia a precipitar carburos de cromo necesitan fundente. Este grupo contiene en su composición 99.9 % de Cobre que al ser disímil con algunos metales ferrosos puede inducir corrosión galvánica.

El grupo RBCuZn se utiliza para juntar acero, cobre, aleaciones de cobre, níquel, aleaciones de níquel y acero inoxidable, cuando no es importante la resistencia a la corrosión debido a que el rango brazing se halla entre los 900°C y 980°C por ausencia de plata. Presenta en su composición química Cu, Zn, Sn, Mn, Fe, Pb, Al, Si, Ni. Se puede usar en procesos de brazing con soplete, horno, inducción, pero con ácido bórico como fundente protector.

El grupo BCuP se usa principalmente para unir cobre y aleaciones de cobre. Tiene algunas limitaciones de uso en plata, tungsteno y molibdeno como materiales base. La aleantes de estos metales de aporte son cobre, plata y fósforo. El grupo no debe usarse en metales ferrosos, con base de níquel (más del 10%) y aleaciones cobre níquel, porque tienden a formar uniones con intercaras frágiles. Se debe utilizar fundente para aleaciones de cobre y otros materiales. Cuando se une directamente cobre, la varilla debe tener fundente propio.

El grupo BNi se usa para resistencia a la corrosión y en aplicaciones de elementos sometidos al vacío. Se pueden usar mediante procesos de soldadura fuerte por soplete, inducción, horno y requieren fundente protector. Las temperaturas del solidus son de 970°C aproximadamente.

Tomando en cuenta las propiedades, rangos de temperatura, bajos puntos de fusión, costos, y facilidad de obtener en el mercado se trabajará con materiales de aporte del grupo BAg correspondientes a la aleación 1700 (35% de Ag), y de grupo BCuP la varilla 1801 (15% de Plata) de Castolin Eutectic, empresa comercial que recomienda 0.2 mm de holgura por lado en la junta.

Las aleaciones de plata para soldadura fuerte tienen rangos de temperaturas menores que las aleaciones de cobre y cinc, y no produce problemas de corrosión galvánica.

En el diagrama constitucional Plata – Cobre (figura 2.3), en la fase sólidos se tienen temperaturas de comienzo de fusión de las aleaciones y entre la unión de las líneas sólidos y líquido está el punto eutéctico que es la temperatura donde se funde la aleación, en el punto eutéctico la aleación se comporta como un metal puro. Cuanto más grande sea la separación entre la temperatura sólida y temperatura líquida, la aleación tendrá menor fluidez lo que no conviene en la capilaridad¹¹ (tabla 2.4 Rango (S-L)).

Es difícil aplicar la técnica de soldadura fuerte en el acero inoxidable, los óxidos de la superficie que también lo protegen de la corrosión impiden a los metales de aporte mojar la superficie. Se necesitan flujos especiales que desplacen a éstos óxidos, las aleaciones con Plata sirven para uniones de acero inoxidable.

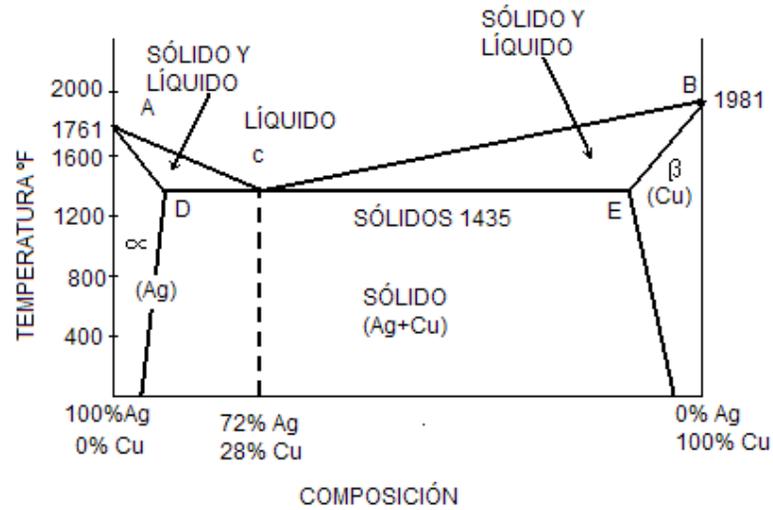


Figura 2. 3 Diagrama constitucional Plata - Cobre.¹¹

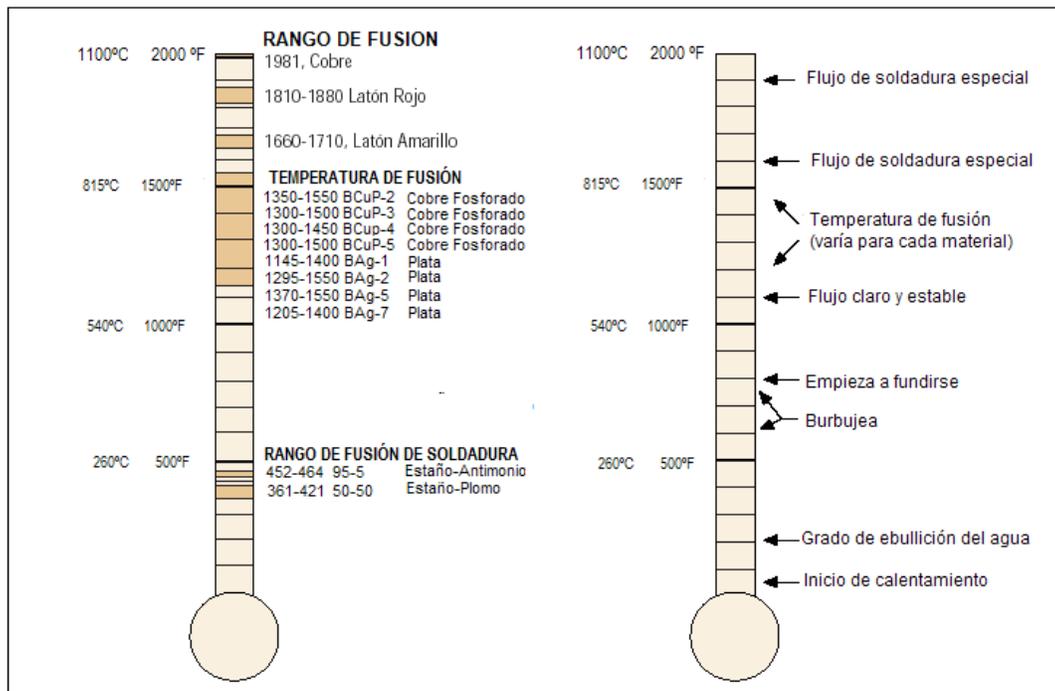


Figura 2. 4 Temperatura de fusión de soldadura y ciclo de fusión de soldadura¹⁵

La serie de los aceros inoxidable 300 son sensibles a las altas temperaturas y el operador debe tener cuidado para no aplicar calor por demasiado tiempo, unir metales base de dimensiones delgadas requiere de una gran habilidad. Aplicar soldadura a estos aceros sin obtener defectos toma años de práctica sin importar el proceso que se use y los defectos son difíciles de eliminar o corregir. Varios materiales de aporte pueden ser útiles para aplicar en el acero inoxidable y se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 2. 4 Materiales de aporte para soldadura fuerte de acero inoxidable.^{11, 12, 13, 14, 16, 17}

677	APLICACIÓN	HOLGURA (in)	HOLGURA (mm) promedio.	TEMPERATURA						COMPOSICIÓN				PRECALENTAMIENTO		Rango (S-L)	COLOR	
				Melt (°F)	Melt (°C)	Flow (°F)	Flow (°C)	Range brazing (°F)	Raago brazing (°C)	%Cu	%Ag	%P	%Cd	°C	°F			
GRUPO BCuP																		
320	cobre, bronce	0.001-0.003	0.05	1310	710	1460	793	1350-1550	732-843	92.75	0	7.25	0	198	365	83	Copper Yellow	Buena fluencia.
45-800	cobre, bronce	0.001-0.003	0.05	1190	643	1300	704	1350-1500	732-816	91	2	7	0	176	325	61	Light Copper	Adición de Ag p
45-780	tubos de cobre	0.003-0.006	0.1	1190	643	1495	813	1325-1500	718-816	89	5	6	0	203	374	169	Light Copper	Para unir tubos
45-781	cobre, bronce, latón	0.002-0.005	0.09	1190	643	1420	771	1300-1500	704-816	88.25	5	6.75	0	193	355	128	Light Copper	Usado como an
	cobre, bronce	0.001-0.003	0.05	1190	643	1325	718	1275-1450	691-788	86.75	6	7.25	0	180	331	75	Light Copper	Fluencia media
45-770	cobre, bronce, latón	0.002-0.006	0.1	1190	643	1475	802	1300-1500	704-816	80	15	5	0	200	369	158	Light Copper	Buena resistenc
GRUPO BAg																		
	ferrosos, no ferrosos	0.002-0.006	0.1	1125	607	1375	746	1375-1575	745-860	35	25	0	13.5	187	344	139	Light Yellow	Mayor consumo
Cd 605-720	ferrosos, no ferrosos	0.002-0.006	0.1	1125	607	1260	682	1260-1400	681-760	30	25	0	17.5	171	315	75	Light Yellow	Requiere mayor
Cu 600-690	ferrosos, no ferrosos	0.005-0.01	0.2	1125	607	1310	710	1310-1550	710-843	27	30	0	20	178	328	103	Light Yellow	Mayor consumo
Cu 610-700	metales féreos y no féreos	0.002-0.006	0.1	1125	607	1295	702	1295-1550	702-843	26	35	0	18	175	324	94	Light Yellow	Apropiado para
Cu 620-635	ferrosos, no ferrosos,	0.001-0.005	0.08	1125	607	1145	618	1145-1400	618-760	15	45	0	24	155	286	11	Light Yellow	Menor rango de
Cu 620-640	ferrosos, no ferrosos	0.005-0.01	0.2	1160	627	1175	635	1175-1400	635-760	15.5	50	0	18	159	294	8	Light Yellow	Solamente con
Ni 635-685	juntas universales	0.005-0.01	0.2	1170	632	1270	688	1270-1500	688-816	15.5	50	0	16	172	318	56	Light Yellow	Adición de níque
GRUPO BAg libre de Cd																		
Sn 680-760		0.002-0.006	0.1	1270	687	1435	779	1435-1625	779-885	40	25	0	0	195	359	92	Light Yellow	Bajos límites de
650-750	Cu, plata-níquel, no ferrosos	0.002-0.006	0.1	1250	677	1410	766	1410-1600	766-871	38	30	0	0	191	353	89	Light Yellow	Buen enfriamier
680-750	disímiles, féreos, no féreos	0.002-0.006	0.1	1265	685	1390	754	1390-1545	754-841	32	35	0	0	189	348	69	Light Yellow	Rangos de temp
Ni 670-780	acero inoxidable	0.002-0.006	0.1	1240	671	1435	779	1435-1650	779-899	30	40	0	0	195	359	108	Light Yellow	Excelentes prop
Sn 640-680	acero, cobre, aleaciones cobre	0.002-0.006	0.1	1200	649	1310	710	1310-1550	710-843	30	40	0	0	178	328	61	Light Yellow	Rangos de temp
660-740	metales féreos y no féreos	0.002-0.006	0.1	1225	663	1370	743	1370-1550	743-843	30	45	0	0	186	343	81	Yellow White	Excelente para
	metales féreos y no féreos	0.002-0.006	0.1	1270	688	1425	774	1425-1600	774-871	34	50	0	0	193	356	86	Yellow White	Uniones para ap
Sn 620-650	Plata	0.001-0.005	0.08	1145	618	1205	652	1205-1400	652-760	22	56	0	0	163	301	33	White	Excelentes prop
670-720	Plata	0.001-0.005	0.08	1240	671	1325	718	1325-1550	718-843	20	65	0	0	180	331	47	White	Buen color para
	Plata	0.001-0.005	0.08	1275	691	1360	738	1360-1550	738-843	20	70	0	0	184	340	47	White	Buen color para

Entre la temperatura Solidus y Liquidus, los materiales con menores diferencias tienen menores temperaturas de fusión y altos contenidos de Plata.

Mientras el contenido de Plata sea alto, menor es la diferencia entre los rangos de temperatura solidus y liquidus (tabla 2.4 (Rango (S-L))), pero para estos casos los costos son elevados.

Tabla 2.5 *Aplicaciones de grupos de Metal de Aporte*^{15,16,17,27,28}

Aplicación común	Material
Plomería HVAC, refrigeración y sistemas rociadores antifuegos	BCuP 2,3,4,5 y BAg 1,5,7.
Tubería	Grupo BCuP y BAg
Uniones de metales disímiles	BAg
Industria alimenticia y farmacéutica, Se aplica para acero, cobre, níquel, plata y sus aleaciones.	BAg 5,7, BAg 28
Uniones cobre - cobre	BCuP 3,5,2,6
Se usan para aceros, aceros inoxidable, níquel y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, carburos metálicos, oro y sus aleaciones, plata y sus aleaciones, platino y tungsteno.	BAg 1, 1A , 2, 2A y 33

2.2.2 FUNDENTES

En el caso de soldadura fuerte los problemas en las uniones se dan por formaciones de óxidos, formaciones de nitruros y carburos que surgen por los aumentos de temperatura. Los casos mencionados que no son deseables se pueden controlar con atmósferas protectoras, fundentes, vacío e incluso con varillas de aporte que son autofundentes.

El fundente es un material que tiene la capacidad de disolver los óxidos metálicos sólidos y prevenir la formación de nuevos óxidos. La acción principal consiste en disminuir las tensiones superficiales con mejor fluidez del metal de aporte, reduciendo luego los residuos de óxidos presentes en el metal base.¹¹

En ocasiones la soldadura fuerte se realiza mediante el uso de un gas activo como el Hidrógeno, un gas inerte o en el vacío. La ventaja de realizar el proceso de soldadura con un ambiente gaseoso es que no necesita realizar limpieza posterior y asegura la ausencia de un residuo de fundente que puede terminar siendo corrosivo.¹¹

Los fundentes protectores de la unión deben ser colocados luego de cumplir con un proceso de limpieza. Es importante la limpieza previa para que el

fundente no forme grumos y deje espacios descubiertos, la forma de aplicación puede ser con brocha, por inmersión, rociado a mano, etc.

Cuando el metal base es acero inoxidable o cobre, o el ciclo de calentamiento es largo el fundente debe ser concentrado, pues éste reacciona con oxígeno, y cuando se satura pierde la efectividad.¹¹

La viscosidad del fundente se puede reducir sin dilución y se calienta a 50 o 60°C (120 o 140°F)¹⁷, una vez que se calienta reduce su tensión superficial y se adhiere al metal con mayor facilidad.

Se escogen según el material de aporte que se vaya a utilizar, generalmente las empresas comercializadoras de materiales de aporte sugieren el fundente, y tiene varias presentaciones, puede ser líquido, en polvo o en pasta.

Si el fundente es líquido o en forma de pasta debe aplicarse con brocha en la junta a unir cuando está fría. Si se presenta en forma de polvo se introduce la varilla de aporte en el recipiente que contenga el fundente, previamente la varilla puede calentarse para que haya más adhesión del polvo, la varilla así revestida se gira alrededor de la unión y se obtiene la fusión del fundente que penetra en el intersticio de la misma, precediendo de este modo a la aleación del metal de aporte.

Se encuentran también en el mercado varillas de metal de aporte, revestidas de fundente que, al aplicarlas a la unión calentada, actúan de forma similar a lo expuesto en el procedimiento anterior.

El manual de soldadura AWS clasifica los fundentes de acuerdo al tipo de material de aporte con el que se vaya a realizar la unión (Tabla 2.6).

Los fundentes más comunes que se comercializan son en polvo. Este método de aplicación consiste en diluirlo en agua, obteniendo una pasta que se aplica con un pincel en las partes de contacto de la unión entre las piezas.

Se debe aplicar una capa uniforme que cubra por completo las superficies de unión, los fundentes comúnmente se aplican como líquidos para garantizar la cobertura de la unión.

Tabla 2. 6 Clasificación de fundentes para soldadura fuerte con metales de aporte para soldadura fuerte o latonado.¹¹

Clasificación*	Forma	Tipo de metal de aporte	Intervalo de temperaturas de actividad	
			°C	°F
FB1-A	Polvo	BAlSi	1080 - 1140	580 - 615
FB1-B	Polvo	Balsa	1040 - 1140	560 - 615
FB1-C	Polvo	Balsa	1000 - 1140	540 - 615
FB2-A	Polvo	BMg	900 - 1150	480 - 620
FB3-A	Pasta	B _{Ag} y B _{CuP}	1050 - 1600	565 - 870
FB3-C	Pasta	B _{Ag} y B _{CuP}	1050 - 1700	565 - 925
FB3-D	Pasta	B _{Ag} , B _{CuP} , B Ni, B Au, y RBCuZn	1400 - 2200	760 - 1205
FB3-E	Líquido	B _{Ag} y B _{CuP}	1050 - 1600	565 - 870
FB3-F	Polvo	B _{Ag} y B _{CuP}	1200 - 1600	650 - 870
FB3-G	Suspensión	B _{Ag} y B _{CuP}	1050 - 1600	565 - 870
FB3-H	Suspensión	B _{Ag}	1050 - 1700	565 - 925
FB3-I	Suspensión	B _{Ag} , B _{CuP} , B Ni, B Au, y RBCuZn	1400 - 2200	760 - 1205
FB3-J	Polvo	B _{Ag} , B _{CuP} , B Ni, B Au, y RBCuZn	1400 - 2200	760 - 1205
FB3-K	Líquido	B _{Ag} y RBCuZn	1400 - 2200	760 - 1205
FB4-A	Pasta	B _{Ag} y B _{CuP}	1100 - 1600	595 - 870

* El fundente 3B que aparecía en la tercera edición del Manual de Soldadura fuerte, 1976, ha sido discontinuado, el tipo 3B se ha dividido en los tipos FB3C y FB3D.
Nota: La selección de una designación de fundente para un tipo específico de trabajo se puede basar en la forma, el tipo de metal de aporte y la descripción de esta tabla, pero la información aquí presentada generalmente no basta para seleccionar el fundente correcto

La mayoría de fundentes son peligrosos y no deben entrar en contacto con la piel especialmente en caso de presentar heridas. La soldadura fuerte que se realiza con soplete requiere fundente para reducir la cantidad de óxidos de cromo presentes en este tipo de aceros. El fundente queda en la periferia de la unión luego que se solidifica el material de aporte. Al final del proceso de soldadura es necesario eliminar los rastros de fundente del ensamble de soldadura fuerte. Estos residuos se pueden eliminar con agua caliente, si el fundente se satura con óxidos tiene consistencia vidriosa es más difícil de eliminar.¹⁷ No se debe utilizar ácido nítrico en aleaciones que contengan cobre o plata.

2.3 JUNTAS DE SOLDADURA

2.3.1 TIPOS DE JUNTAS DE SOLDADURA

De acuerdo a la aplicación que se va a dar a la unión de soldadura y al material base, se escoge el material de aporte que cumpla las condiciones requeridas. Para el diseño de la junta se toma en cuenta la holgura, longitud de traslape y

longitud de inserción (garganta), como parámetros principales de la junta de soldadura.

Se pueden realizar uniones de tramos de tubería de diversas maneras:

2.3.1.1 Unión a Presión ¹⁸

Aquella en la cual la hermeticidad se obtiene usando una herramienta específica para comprimir un accesorio o ensanchar un tubo para permitir la formación de la unión.

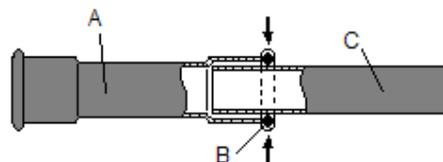
2.3.1.2 Unión Mecánica ¹⁸

Empalme entre 2 tuberías mediante accesorios o elementos que proporcionan hermeticidad sin que haya continuidad entre los materiales de la tubería. Las uniones mecánicas pueden ser desmontables o no y son de diferentes tipos: abocinado, roscado, de anillo, de ajuste y acoples por compresión entre otros.

En una conexión abocinada la hermeticidad se obtiene por la compresión entre las paredes cónicas y esféricas de dos metales en contacto.

2.3.1.3 Junta Mecánica Por Compresión ¹⁹

Unión donde la hermeticidad se consigue aplicando presión sobre las paredes de la tubería y los componentes de la unión mediante un elemento de material plástico.



A: accesorio para unión a presión
B: anillo elástico para hermeticidad
C: tramo de tubería

Figura 2. 5 *Unión a presión*

En el mercado existen varios accesorios como codos, unión en "T", puentes, uniones simples, etc. El proceso consiste en insertar en el acople el tramo de tubería que se desea unir, cada acople contiene un anillo que sirve de empaque. Con una máquina se realiza la presión entre el acople, el anillo y el tramo de tubería. Existen tres tipos de anillos: los anillos negros sirven para unir tubería de conducción de agua en condiciones ambientales, los anillos blancos

sirven para calefacción y los de color amarillo sirven para uniones que transportan flujos derivados de hidrocarburos.

2.3.1.4 Uniones permanentes

Las uniones de soldadura fuerte generalmente tienen gran área y espacios entre superficies a unir que son muy reducidas.

Dos tipos de juntas se pueden utilizar con el proceso de soldadura fuerte:

Unión a traslape: las uniones traslapadas ofrecen eficiencia alta, facilidad de fabricación, pero las distintas secciones entre metal base se convierten en concentradores de esfuerzos especialmente si se tienen cambios considerables entre las secciones transversales.¹¹

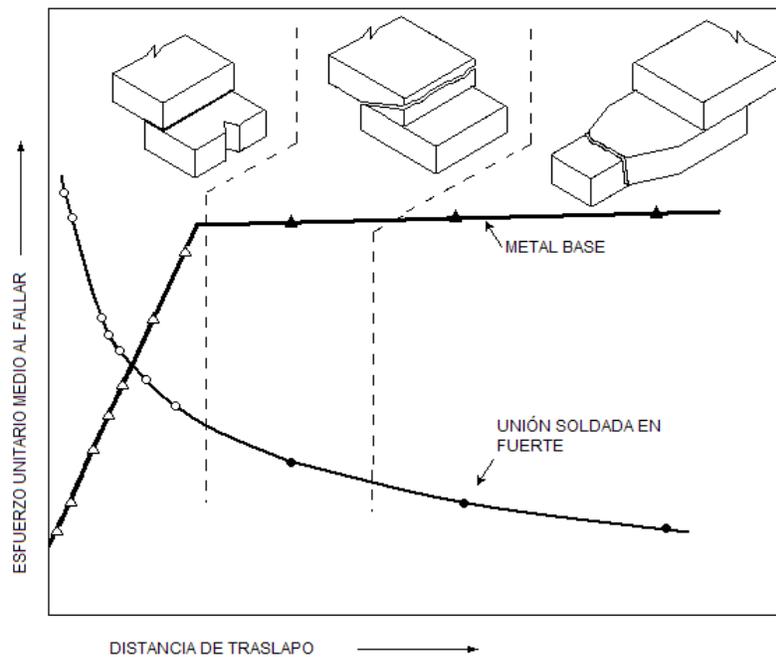


Figura 2. 6 *Esfuerzo de corte unitario medio en la unión traslapada de soldadura fuerte y resistencia a la tensión unitaria media en el metal base en función de la distancia de traslape (los símbolos huecos representan fallas en el metal de aporte, los símbolos llenos representan fallas en el metal base)¹¹*

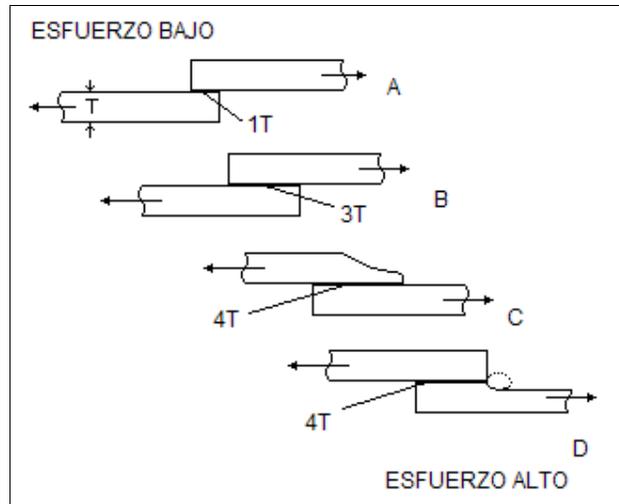


Figura 2. 7 Diseños de uniones traslapadas para soldadura fuerte que se usarán con esfuerzos bajos y altos¹¹

Unión a tope: la resistencia de la unión depende de la resistencia mecánica del metal de aporte. Dependiendo del espesor del metal base, la unión a tope es difícil de preparar, la alineación en este caso es complicada.

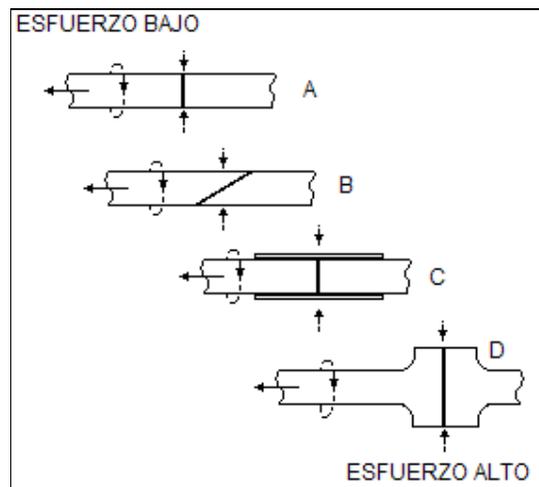


Figura 2. 8 Diseños de unión a tope para soldadura fuerte que aumentan la capacidad de unión para resistir esfuerzos altos y carga dinámica

La resistencia mecánica de una junta con soldadura fuerte es alta, la naturaleza del enlace interatómico es tal que incluso una junta simple, bien diseñada tendrá igual o mayor resistencia mecánica que la del metal base. Los filetes de la soldadura brazing son excelentes, la superficie del menisco del filete de soldadura como la curva alrededor de las esquinas tienen una forma ideal para resistir la fatiga.

2.3.2 DISEÑO DE LONGITUD DE TRASLAPE PARA JUNTA

La resistencia de la junta de soldadura depende de la longitud del traslape, resistencia del material de aporte, continuidad de la junta. Una fórmula sencilla sirve para determinar la longitud mínima de traslape.

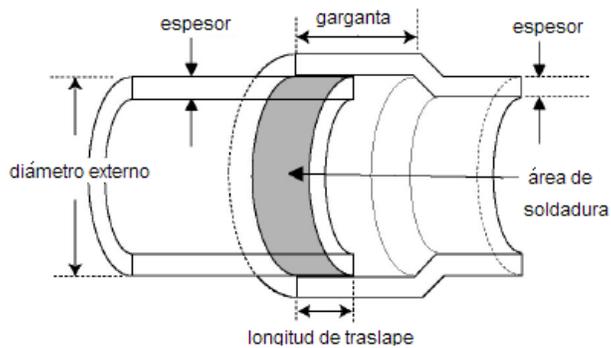


Figura 2. 9 Diseño de junta traslapada para Brazing.²⁰

$$X = \frac{tW}{0,8L}$$

Ecuación 2. 1 Distancia mínima de traslape²⁰

De la ecuación 2.1:

X: longitud mínima de traslape

t: resistencia mecánica del material base: 77000 psi²⁶

W: espesor de la tubería: 0,8 mm

L: Resistencia mecánica del material de aporte: (50500 psi - promedio Bag2 y Bcup5).³⁸

De los cálculos se puede determinar que la mínima longitud de traslape es $X = 1,52$ mm. Los accesorios normalizados de venta comercial de cobre tienen una longitud de garganta de 12.7 mm.

2.3.3 HOLGURA

La holgura es un aspecto importante que debe estar bien definido para obtener el efecto de capilaridad eficiente, aspectos indispensables en el proceso de soldadura fuerte.

Las superficies en las que se va a aplicar la soldadura deben embonar de manera que el espacio entre ellas sea el adecuado para que el material de aporte se distribuya por acción capilar. El efecto capilar es el fenómeno que

manifiesta el material de aporte en estado líquido de fluir libremente a través de la holgura.

Las uniones que se van a unir por proceso de soldadura fuerte deben tener separaciones entre 0.025 a 0.25 mm (0.001 a 0.01 in).¹¹ Algunas empresas comercializadoras de material de aporte para soldadura fuerte recomiendan holguras entre 0,05 y 0,2 mm. ^{13, 37.}

La separación de la junta influye en el desempeño mecánico de la unión, la holgura influye de la siguiente manera:

- Restricción del flujo plástico del metal de aporte por un metal base de mayor resistencia.
- Posibilidad de que el fundente quede atrapado.
- Acción capilar.
- Posibilidad de discontinuidad del material de aporte (poros).
- Cantidad de metal de aporte a depositar.

La holgura influye directamente en la resistencia mecánica de la unión como se observa en la figura 2.10 a continuación.

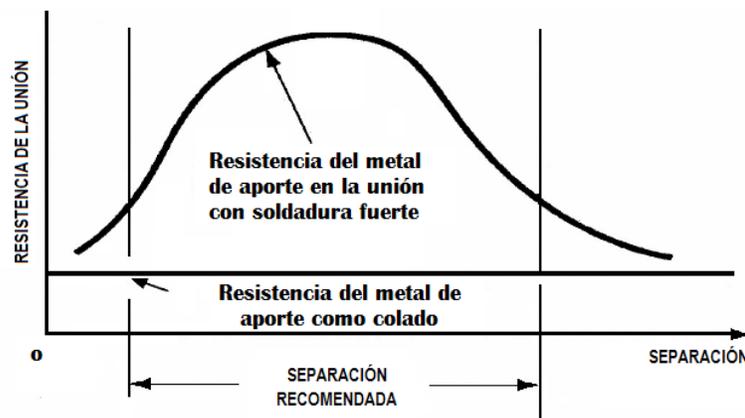


Figura 2. 10 Resistencia de la unión como una función de la separación de la unión.²¹

Si la holgura es pequeña el material de aporte tiene buena fluencia debido al efecto capilar, pero si la separación es demasiado pequeña el fundente puede quedar atrapado evitando que ingrese material de aporte, lo que conlleva a defectos (porosidades que actúan como concentradores de esfuerzos). Por el contrario, si la holgura es demasiado grande, la varilla de aporte fluirá alrededor del fundente teniéndose como resultado inclusiones de fundente.¹¹

En caso de tener distintos materiales a unir se debe calcular la separación ideal en base a las expansiones térmicas de cada material, los metales base deben tener buena resistencia y ceder durante el enfriamiento.

En el manual de soldadura AWS para soldadura fuerte se recomiendan las holguras dependiendo del grupo de material de aporte que se vaya a utilizar.

Tabla 2.7 Separación recomendada de la unión a la temperatura de soldadura fuerte.¹¹

Clasificación del metal de aporte de la AWS	Pulgadas	Milímetros	Separación de la unión ^b
Grupo BAISi	0.006-0.010	0.15-0.25	Para longitud de traslapeo menor que 6.35mm (1/4 pulg.)
	0.010-0.025	0.25-0.61	Para longitud de traslapeo menor que 6.35mm (1/4 pulg.)
Grupo B CuP	0.001-0.005	0.03-0.12	
Grupo B Ag	0.002-0.005	0.05-0.12	Soldadura fuerte con fundente (mineral)
	0.001-0.002 ^c	0.03-0.05	Soldadura fuerte en atmósfera (fundentes de fase gaseosa)
Grupo B Au	0.002-0.005	0.05-0.12	Soldadura fuerte con fundente (mineral)
	0.000-0.002 ^c	0.00-0.05	Soldadura fuerte en atmósfera (fundentes de fase gaseosa)
Grupo B Cu	0.000-0.002 ^c	0.00-0.05	Soldadura fuerte en atmósfera (fundentes de fase gaseosa)
Grupo B Cu Zn	0.002-0.005	0.05-0.12	Soldadura fuerte con fundente (mineral)
Grupo B Mg	0.004-0.010	0.10-0.25	Soldadura fuerte con fundente (mineral)
Grupo B Ni	0.002-0.005	0.05-0.12	Aplicaciones generales (fundentes o atmósferas)
	0.000-0.002	0.00-0.05	Tipos de flujo libre, soldadura fuerte en atmósfera
b. separación sobre el radio cuando intervienen anillos, tapones o miembros tubulares. En algunas aplicaciones puede ser necesario usar la separación recomendada sobre el diámetro para asegurar que no haya una separación excesiva si toda la separación está de un solo lado. Una separación excesiva produce huecos, sobre todo si se suelda en fuerte en una atmósfera de alta calidad (fundente en fase gaseosa). c: para obtener resistencia mecánica máxima se debe usar un embonamiento a presión de 0.001 mm/mm o in/in, de diámetro.			

Un buen diseño tiene uniones que eviten grandes concentraciones de esfuerzos alrededor de la soldadura fuerte, o que éstos se distribuyan uniformemente en el metal base.

2.3.3.1 Selección de la Holgura

El proceso de soldadura fuerte para acero inoxidable y cobre es similar. Para cobre existen normas colombianas o chilenas, las dimensiones de extremos machos y hembras se puede determinar en la figura a continuación.

Designación convencional de los tubos ¹⁾		Extremo macho			Extremo hembra			Espesor del metal e	Diámetro interior del accesorio O
		Diámetro exterior A		Longitud k	Diámetro interior F		Profundidad G		
pulg	mm	min.	máx.	min.	min.	máx. ²⁾	min.	min.	min.
1/8 ³⁾	3	6,30	6,38	7,87	6,40	6,50	7,87	0,48	4,57
1/4	6	9,47	9,55	9,65	9,58	9,68	7,87	0,58	7,62
3/8	10	12,62	12,73	11,18	12,75	12,85	9,65	0,66	9,91
1/2	13	15,80	15,90	14,22	15,93	16,03	12,70	0,74	13,21
5/8	16	18,97	19,07	17,53	19,10	19,20	15,75	0,79	16,00
3/4	19	22,15	22,25	20,57	22,28	22,38	19,05	0,84	18,80
1	25	28,50	28,63	24,64	28,65	28,75	23,11	1,02	24,89

1) Para designación de los accesorios de unión, ver cláusula 4.
2) Para ovalidad, ver 5.5.2.

Figura 2. 11 Accesorios de unión a soldar- dimensiones.²²

La norma NCh 2674 se refiere a “Cobre y aleaciones de Cobre - Accesorios de unión estampados a soldar y roscados para tubos de cobre”.

La holgura en la norma NCh2674 se puede obtener de la resta de los diámetros interior del segmento hembra y del diámetro exterior del acople macho ($F - A$) de la figura 2.11 con lo que se obtiene un rango de 0.13 a 0.23 mm en total para tubería de 1/2 pulgada de diámetro nominal.

Esta norma incluye gráficos para secciones a unir con dimensiones especificadas en la figura 2.12, a continuación se indican estos accesorios para uniones traslapadas.

El accesorio que se busca realizar es tipo hembra y se va a obtener por expansión.

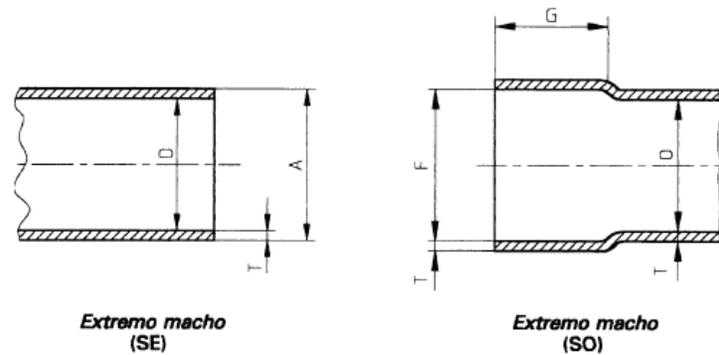


Figura 2. 12 Dimensiones de accesorio de unión a soldar²²

El manual de soldadura AWS determina que, para materiales de aporte en base de plata y protección de fundente mineral, la holgura deberá estar entre 0.05 a 0.12 mm (Tabla 2.7). La norma chilena NCh2674 recomienda para tubos de 12.7 mm (1/2 pulgada) de diámetro nominal, una holgura de de 0.13 a 0.23 mm, algunas empresas dedicadas a la venta de materiales de aporte con base de plata para soldadura fuerte recomiendan, usar 0.03 mm a 0.12 mm de holgura para juntas traslapadas menores a 25 mm.^{12, 37.}

A continuación se indica la figura (2.13) del extremo macho y hembra en la tubería de acero inoxidable y en la tabla 2.8 se especifican dos tipos de holgura con los que se trabajará para comparación de resultados.

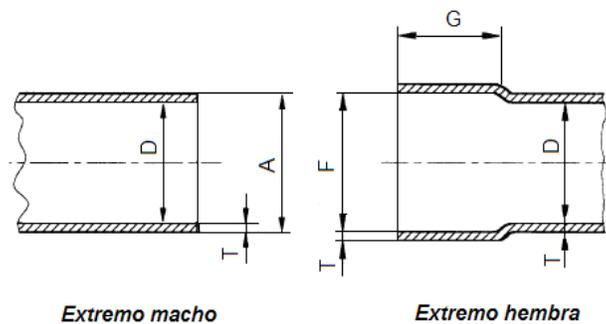


Figura 2. 13 Extremos macho y hembra de la tubería de acero inoxidable.²²

La desviación máxima permitida en el alineamiento angular de cualquier orificio debe ser 5 mm / m (0.5 %). En la siguiente tabla se indican dimensiones a utilizar en las juntas de soldadura de tubería de acero inoxidable.

Tabla 2. 8 *Diseño de juntas con dos holguras para comparar resultados en juntas de acero inoxidable.*

Designación del tubo			Holgura final por lado (mm)	Extremo macho(mm)		Extremo hembra (mm)		
Pulgadas	Milímetros	Espesor (T)mm		De (A)	Di (D)	De (F+2T)	Di (F)	Garganta (G)
1/2.	12.7	0.8	0,2	15,88	14.28	17,88	16,28	12.7
1/2.	12.7	0.8	0,5	15,88	14.28	18,48	16,88	12.7

2.3.4 LIMPIEZA

Algunos de los elementos que impiden que el metal de aporte fluya de manera uniforme en el proceso de unión son: las grasas, suciedad, aceites y óxidos por lo que las superficies deben estar limpias.

La limpieza es efectiva dependiendo del tipo de junta, metal base, su manipulación, forma de almacenamiento y condiciones atmosféricas. Luego del proceso de limpieza es recomendable efectuar la soldadura de manera inmediata.

El desengrasado se puede realizar con disolventes de petróleo, con vapor, limpieza alcalina (mezclas de silicatos, fosfatos, carbonatos, detergentes, jabones, agentes humectantes), limpieza con emulsión (hidrocarburos, ácidos grasos, agentes humectantes, activadores), limpieza electrolítica (anódica o catódica).¹¹

La limpieza de óxidos e incrustaciones se puede realizar con ácidos tipo fosfato, o baño químico salino (electrolítico o no electrolítico), acetona, alcohol industrial.

La ventaja de la limpieza mecánica es dejar ásperas las superficies de empalme lo que mejora el flujo capilar y el mojado para que el material de aporte penetre en la unión, este tipo de limpieza se puede realizar con moladora, limado, lijado, maquinado, cepillado con alambre, material abrasivo como arena o alúmina.

2.4 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA FUERTE (BRAZING)

Cortar el tubo, verificar que el corte sea perpendicular, se redondean las aristas para eliminar rebabas y realizar una limpieza de los extremos a unir, se puede utilizar también una desbastadora con debidas precauciones. Una vez cortados los tubos en las dimensiones que se requieran para realizar la unión, se procede a expandir el extremo hembra (como se indica en el siguiente capítulo).

La limpieza, por facilidad se realiza con lija, lima o cepillo metálico, es necesario limpiar el interior del extremo hembra y el exterior del extremo macho.



Figura 2. 14 Limpieza de extremo macho y hembra de la tubería.²³

Preparar la junta una vez que se haya limpiado el metal base. Para obtener una holgura distribuida en el diámetro se insertan separadores.

Se regula la llama del soplete como neutra o ligeramente reductora, precalentar la junta, colocar el fundente y aplicar la llama para calentar el tubo hasta conseguir la fusión del fundente.

Luego colocar la punta de la varilla de aporte hasta fundir una gota que deberá recorrer por toda la separación. La región a ser unida debe calentarse a una temperatura mínima de 450°C.

Los tubos se encuentran alineados verticalmente, así el efecto capilar distribuye el material de aporte por toda la unión, en esta posición la gravedad es favorable. Al distribuir el material de aporte, se debe evitar un tiempo prolongado de sobrecalentamiento.



Figura 2. 15 Distribución del material de aporte

Limpiar la soldadura sobrante con un cepillo o paño seco mientras todavía esté pastoso, dejando un filete alrededor del extremo de la conexión a medida que se enfría. Se puede lavar con agua fría o caliente para eliminar los residuos de fundente.



Figura 2. 16 *Limpieza de uniones de soldadura fuerte en acero inoxidable*

2.4.1 DIFICULTADES

- Si la soldadura no fluye o tiende a hincharse, es porque existe oxidación en las superficies metálicas o faltó mayor calentamiento de las piezas que van a ser unidas.
- Si la junta comienza a oxidarse al ser calentada, indica muy poco fundente y la temperatura es muy elevada.
- Si la soldadura se niega a entrar en la unión y tiende a escurrirse fuera de cualquiera de las partes de unión, indica que el accesorio está recalentado, que la cañería no está lo suficientemente caliente o ambos. En los dos casos, debe interrumpirse la operación, desarmar, volver a limpiar y aplicar de nuevo fundente en la unión.
- Si la aleación de soldadura, en estado fundido, no se distribuye regularmente por los intersticios de la unión y tiende a formar gotas sobre la superficie, entonces significa que las superficies a soldar no están desoxidadas y no dejan que la aleación las moje, o que no están suficientemente calientes.

- Si la aleación no penetra por los intersticios de la unión, pero escurre sobre la superficie exterior, entonces se debe a un insuficiente calentamiento del elemento macho y/o al recalentamiento del elemento hembra, generalmente el accesorio.

2.5 INSPECCIÓN ⁶

La inspección es obligatoria con el fin de proteger al usuario final, fugas de flujos contaminantes resultan peligrosas para la salud o situaciones catastróficas pueden darse.

Las pruebas pueden ser destructivas o no destructivas y las discontinuidades se clasifican por estar asociadas a requisitos dimensionales, a discontinuidades normalizadas, o asociadas al metal base de la unión.

Las pruebas no destructivas sirven para detectar discontinuidades, obtener indicios que permitan determinar las causas de irregularidades en el proceso de fabricación, etc.

Tabla 2. 9 Inspección de juntas de soldadura fuerte por ensayos destructivos y no destructivos

PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS ¹¹		
PRUEBA	GENERALIDADES	IMPERFECCIONES
INSPECCIÓN VISUAL	Prueba preliminar, la unión debe estar libre de grasa, pintura, óxidos, fundente bloqueadores, etc.	<ul style="list-style-type: none"> - Revela falta de embonamiento. - Alineación - Inexactitudes dimensionales - Flujo insuficiente de metal de aporte. - Agujeros - Grietas - Porosidad - Daños térmicos al metal base
FUGAS	<ul style="list-style-type: none"> - Sumergir recipiente a presión en agua y observar si se producen burbujas. - Presurizar el ensamble y cerrar el recipiente determinando en un rango de tiempo si disminuye la presión interna. - Aplicar solución jabonosa y presurizar el ensamble para observar si se produce burbujeo. - Prueba hidrostática: aplicar presión y observar si hay fugas de fluido. 	Determinar la hermeticidad de un recipiente cerrado usando aire, gas o líquido no tóxico, es decir determinar cualquier tipo de defecto que conlleve a fugas para evitar accidentes catastróficos.

TINTAS PENETRANTES	La eficiencia de esta prueba depende del diseño de la junta. Penetrantes fluorescentes entran en las aberturas por efecto capilar que luego es retirado de la superficie con un revelador blanco para ser observado con luz ultravioleta y si el penetrante es colorado se puede observar con luz ordinaria.	- Determinar existencia de grietas - Porosidades - Defectos superficiales - Flujo incompleto de material de aporte.
RADIOGRÁFICA	Las uniones deben tener espesor uniforme y la exposición debe ser normal a la unión. Las áreas de unión en las que no hay metal de aporte se ven más oscuras que en el área de soldadura.	- Detecta falta de adhesión o flujo incompleto del metal de aporte.
PRUEBAS DESTRUCTIVAS		
PRUEBA	GENERALIDADES	RESULTADOS
METALOGRAFÍA	Recorte de secciones unidas en fuerte y su preparación para examen macroscópico y microscópico.	- Detecta si existe porosidad - Flujo deficiente de metal de aporte. - Erosión del metal base. - Difusión del metal de aporte. - Embonamiento incorrecto - Revela microestructura de la unión.
TENSIÓN O CORTE	La junta debe estar bien diseñada y al realizar la prueba se observa si la probeta falla en el metal base o en la unión.	- Determina la resistencia mecánica de la unión.
DOBLADO	Se realiza el ensayo utilizando un jig de doblado determinado en normas.	Se observa como se separan los metales base.

2.5.1 IMPERFECCIONES ¹¹

Algunos de los defectos se nombran a continuación:

POROS, FALTA DE LLENADO: estos defectos producen reducción de resistencia mecánica o proveen caminos para fugas.

- Resultado de limpieza inadecuada
- Separación excesiva.
- Gases atrapados.
- Movimiento de piezas por mala sujeción.
- Falta de material de aporte.

ATRAPAMIENTO DE FUNDENTE: Reduce vida de servicio de la unión.

GRIETAS: Reducen tanto la resistencia mecánica como la vida de servicio, actúan como concentradores de esfuerzos donde se pueden producir fallas por fatiga.

SOLDADURA INSATISFACTORIA:

- No hay mojado (no hay flujo capilar y quedan discontinuidades).

La falta de mojado puede deberse a un metal de aporte no adecuado, una baja temperatura o mala técnica, tiempo corto de exposición, limpieza inadecuada, poco fundente protector, embonamiento deficiente, holgura incorrecta.

- Mojado excesivo: demasiado material de aporte incluso en lugares donde no es necesario.

El mojado excesivo puede resultar por la aplicación de una temperatura alta, de tiempo de exposición excesivo, demasiado material de aporte.

- Erosión: ataca el metal de aporte al metal base y reduce el espesor original.

La Erosión puede ser resultado de altas temperaturas, demasiado tiempo de exposición, material de aporte en gran cantidad, cambios de holguras, piezas trabajadas en frío, metales de aporte con rangos por encima de liquidus.

2.6 SOLDADURA FUERTE APLICADA AL ACERO INOXIDABLE Y AL COBRE

La soldadura fuerte se aplica para realizar las juntas de unión de tuberías que conducen gas licuado de petróleo para instalaciones residenciales, comerciales e industriales.

Estas instalaciones usan tuberías de plástico y metálicas. Se puede usar tubería cuya composición química no sea atacada por el gas combustible, ni por el medio exterior con el que estén en contacto, se autoriza usar tubería rígida o flexible tanto de acero inoxidable como cobre, o tubería de acero al carbono (negro o galvanizada por inmersión en caliente con mínimo cédula 40). Para el caso del acero inoxidable y el cobre se utiliza soldadura fuerte. La tubería negra se une por soldadura eléctrica al arco y para diámetros nominales

menores o iguales a 50 mm se puede usar soldadura oxiacetilénica. Se permite hacer uniones cobre – acero (varilla de aporte de cobre con puntos de fusión mayor a 850°C) o cobre–acero inoxidable (soldadura fuerte) siempre y cuando en los 2 casos se intercale accesorios de bronce.²⁴

En la Tabla 2.10 se detallan las características más importantes de los metales base permitidos para tubería unida por soldadura fuerte cuyo objetivo es la conducción de gas licuado de petróleo.

Tabla 2. 10 Comparación de Soldadura Fuerte para Cobre y Acero Inoxidable

ALEANTES			
	Cobre	Acero inoxidable 304	
Tubería permitida según INEN 2260	Tubería rígida o flexible, sin costura según la norma ASTM B 88 (Especificación estándar para cañerías y tubos de bronce y cobre sin costura, 2002) tipo K o L. ²⁴	Tubería flexible corrugada tipo CSST fabricada según especificaciones de norma ANSI/AGAL C1. Tubería rígida tipo AISI 304, AISI 316 fabricada según ASTM A240. ²⁴	
Aleantes del metal base	Cobre tipo K o L. C12200 (99.9 % Cu y 0.028% P) cobre desoxidado con alto contenido de fósforo. ²⁵	Contienen 18 - 20 % de Cr, 8 % Ni, C < 0.08%, aleantes como Si (1%) y Mn (2%), mejoran las resistencia a la corrosión, P (0.045%), S (0.03%). ⁸	
Observaciones	Se puede realizar uniones en fuerte para varias aleaciones de cobre, incluso existen metales de cobre débilmente aleados con contenidos de plata.		
Propiedades mecánicas ^{26,29}			
	Cobre	Acero inoxidable	
Tipo de endurecimiento	Tipo K o L se endurece por deformación en frío.	Por deformación / trabajo en frío, no debe ser endurecido por tratamiento térmico.	
Ductilidad	Buena	Buena	
Resistencia a la tracción (N / mm² = MPa)	*230- 350	520	
Límite elástico (N / mm²)	*130 - 200	195	
Alargamiento (%)	*45 a 60	35 a 45	
*Valor de la Propiedad considerando un endurecimiento gradual creciente de 0 a 100 %			
Soldabilidad	Muy Buena	Muy Buena	
Maquinado	Muy buena	Buena	
Embutibilidad	Muy buena	Buena	
Dimensiones y especificaciones técnicas de tubería rígida según venta comercial			
	Tipo ²⁵		Tipo ²⁶
	K	L	304
Material	C12200	C12200	AISI 304

	Tipo ²⁵		Tipo ²⁶
	K	L	K
Norma de fabricación	ASTM B88	ASTM B88	ASTM A544
Proceso de fabricación	Tubería sin costura	Tubería sin costura	Costura por el método TIG
Designación Convencional	½ ”	½ ”	½ ”
Diámetro (mm)	e	15.87	15.87
	i	13.39	13.85
Espeor (mm)	1.24	1.01	0.8
Peso tramo metro (kg)	0.513	0.425	0.301
Expansión del diámetro externo (% elongación)	40	40	35
Esfuerzo de tensión (psi)	30 000	30 000	75 472
Presión de prueba hidráulica (psi)	6 000	6 000	2 271
Costos de tubería y accesorios	alto	alto	Bajo en relación al cobre
Longitud de tubería (m)	6	6	4
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS ^{29,35}			
	Cobre	Acero inoxidable	
Densidad (kg/dm ³)	8'96	7.9	
Conductividad térmica (kcal /h m ° C)	300	12	
Temperatura de fusión (°C)	1.083	1400-1450	
Dureza (rockwell)	50 rockwell F	HRC 10/35	
Propiedades físicas ^{30,36}			
	Cobre	Acero inoxidable	
Magnetismo	No es magnético	No magnéticos. No magnético a todas las temperaturas.	
Velocidad de Conductividad Térmica a 100 °C.	Su conductividad térmica y eléctrica son muy altas	28%.	
Velocidad de Conductividad Térmica A 650° C/ m	Muy buena	66%. El Tipo 304 conduce el calor mucho más lentamente que los aceros al carbono, lo cual produce gradientes de temperatura más pronunciados. Esto acelera la deformación. Una difusión más lenta del calor a través del metal base significa que la zona de soldadura permanece caliente por más tiempo.	
Condiciones de soldabilidad ^{10,11,14}			
	Cobre	Acero inoxidable	
Tipo de soldadura usada	Métodos más comunes para unir tubería y accesorios: Soldering y brazing. La soldadura fuerte se realiza en un	Welding, Brazing en un rango entre 600 °C y 850°C.	

	rango de temperatura desde 1100° F a 1500 ° F (593°C a 815°C)	
Material de aporte usado para Soldadura Fuerte (Brazing)	Grupos BAg, BAu, BCuP, RBCuZn según AWS A 5.8.	Grupos BAg, BAu, BCu, B Ni según AWS A5.8 Comercialmente la aleación BAg1 presenta el punto de fusión más bajo. Las aleaciones BAg(1,2,5,7) son buenos materiales de aporte, mientras mayor es el contenido de Plata se obtienen mejores resultados.
Técnicas de calentamiento	Por soplete, con horno, por inducción, por resistencia, por inmersión, al infrarrojo, todas estas técnicas de calentamiento son permitidas tanto para el acero como para el cobre.	
Propiedades químicas ^{29,31}		
Propiedades químicas	Puede ser considerado como metal noble, después del platino, el oro y la plata. Resiste atmósfera, agua limpia y muchos agentes químicos y no se corroe fácilmente, a temperaturas normales.	Resisten la oxidación y corrosión en ambientes normales.
Resistencia a la corrosión	Buena.	Buena, es atóxico e inmune a la corrosión por sobre cualquier aleación de cobre, bronce.
Resistencia a la oxidación	Buena	Buena
Aplicación industrial de tubería para instalaciones centralizadas de GLP ²⁴		
Descripción	Cobre	Acero inoxidable
Espesor mínimo	0.89 mm en tubería rígida y 1.2 mm en tubería flexible	0.8 mm
Presión de operación (GLP)	4 bares (60 psi)	4 bares (60 psi)
Proceso de soldadura	Soldadura fuerte por capilaridad	Soldadura fuerte por capilaridad
Compatibilidad de materiales para la unión	Aleaciones de cobre	Acero inoxidable, aleaciones de cobre intercalando accesorios de bronce
Condiciones de instalación embebido en paredes	Se acepta solamente con protección de lámina metálica de acero de 1.5 mm de espesor mínimo o mortero (masillado) de mínimo 50 mm para protección de daño mecánicos.	Se acepta directamente tubería embebida en paredes de concreto sin protección.
Condiciones de instalación empotrada en paredes o losas	Prohibido	Prohibido

CAPÍTULO 3

3 EXPANSIÓN DE LA TUBERÍA PARA REALIZAR LA JUNTA TRASLAPE

3.1 GENERALIDADES DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE 304.

El acero inoxidable es 100% reciclable, no necesita aislamiento, ni protección anti corrosiva, no necesita mantenimiento. Los tubos de acero inoxidable AISI 304 resisten todo tipo de agresiones accidentales como clavos o tornillos además de ser antisísmico. La dilatación de los tubos Hidrinox se considera como nula ya que es de 0,16 mm/m a 100°C, no atacable por fuego ni temperaturas extremas (ignífugo), alta resistencia al medio ambiente, buena estética.³¹

Unir dos extremos de tubería por medio de soldadura tiene la ventaja de utilizar para un mismo diámetro espesores menores que aquellas uniones que necesitan roscas.

Se puede deformar a la tubería para insertar uno de los extremos dentro de la sección deformada, pues los esfuerzos necesarios para esta deformación no superan la resistencia mecánica. (El límite elástico del acero AISI 304 es de 29000²⁶ psi mientras que del cobre está por 26000 psi).²⁹

Mediante la unión por soldadura fuerte capilar se puede garantizar una unión lisa, resistente y libre de fugas.

Una ventaja considerable es que el acero inoxidable no mantiene la combustión y no produce gases tóxicos, aspecto importante para no obtener propagaciones verticales u horizontales del fuego en caso de incendio, tampoco produce compuestos orgánicos volátiles en instalaciones de tubería, además de ser un material excelente por su resistencia a la corrosión, propiedad que ofrece un buen servicio al transportar flujos corrosivos como gases.³¹ Se debe utilizar el abocardado del tubo para aplicar soldadura por capilaridad, siempre que, una vez realizada la unión, el espesor resultante sea como mínimo el espesor original del tubo.²⁴

Tabla 3. 1 Especificaciones de Tubería AISI 304²⁶

ESPECIFICACIONES DE LA TUBERÍA ²⁶								
Producción	Norma JIS G 3448 para conducción de fluidos, ASTM A 544.							
Descripción	Tubos de Acero Inoxidable 304 con costura por el método TIG.							
Dimensión y Peso	Medida nominal	Equiv. pulgadas	Diam. Externo mm.	Tolerancia en diámetro mm.	Tolerancia en espesor mm.	Espesor de pared mm	Longitud m	Peso kg/m
	13	1/2	15,88	- 0,37	+/- 0,12	0,80	4	0,301
Materia prima	Acero inoxidable 304 bajo la norma ASTM A-240							
Propiedades mecánicas	Resistencia mínima a la tracción N/mm ² (psi)				520 (77 000)			
	Elongación mínima (%)				35			

DIAMETRO	13	20	25	30	40	50	60
		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2
PRUEBA HIDRÁULICA (kg/cm ²)	160	130	100	140	110	90	100
VIBRACIÓN (2 millones de vibraciones)	SATISFACTORIO						
CURVADO	30°	30°	15°	23,5°	26°	23,5°	15°
GOLPES DE PRESIÓN 40 kg/cm ² (10 000 golpes)	SATISFACTORIO						

Figura 3. 1 Desempeño del Sistema de tubería AISI 304²⁶

3.1.1 VENTAJAS DE LA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE³¹

- El montaje es rápido y seguro con disminuciones importantes en los costos de mano de obra.
- La instalación sin rosca permite para un mismo diámetro utilizar tubería con menores espesores.
- Es inmune al sarro y a la corrosión, garantizando el máximo nivel de salubridad.
- Su sistema de instalación elimina riesgo de fugas.

- No necesita aislamiento a la corrosión, no es sensible al ataque de cales y otros materiales, permitiéndose así embebidas en paredes de concreto según la Norma INEN 2260.
- No es afectado por rayos ultravioleta.
- Máximo caudal por mayor diámetro interior llegando a obtener un tubo liviano y de gran resistencia.
- Baja dilatación lineal.
- Resiste al fuego, a temperaturas extremas y a movimientos telúricos.

3.1.2 USOS DE LA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE

Los principales usos mecánicos o en la construcción son los siguientes:

- Conducción de agua potable y agua caliente.
- Conducción de efluentes domiciliarios e industriales.
- Alcantarillado y ventilación de sistemas de alcantarillado.
- Conducción de gases combustibles (ej. Gas natural, GLP).
- Sistemas de rociadores contra incendios.
- Tubos para conducir conductores eléctricos.
- Usos ornamentales.
- Usos estructurales.
- Sistemas de aire acondicionado, conducción de aire comprimido, refrigeración, cañerías de vapor.
- Conducción de combustibles líquidos (ejemplo petróleo, gasolina, kerosene), líquidos industriales como aceites, líquidos alimenticios como Leche, Cerveza, etc.
- Serpentes de bombas de calor.

- Conducción de gases no combustibles (ejemplo nitrógeno).
- Conducción de gases médicos (ejemplo oxígeno).
- Calderas y tubos de calor.

3.2 MÉTODOS DE UNIÓN DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE

3.2.1 UNIONES ROSCADAS ²⁴

Si se van a utilizar uniones roscadas se debe tomar en cuenta realizar únicamente sobre tubos de acero mínimo cédula 40, o en tuberías de diámetro exterior menor a 60 mm. Además se debe asegurar la estanqueidad mediante compuestos anaeróbicos, no endurecibles, o la aplicación más común que es una cinta de estanqueidad de politetrafluoroetileno PTFE (teflón).

La rosca de la unión debe ser del tipo cónico NPT y debe cumplir con los parámetros de la NTE INEN 117, ANSI/ASME B1.20.1 ó ISO 7/1.

Las uniones roscadas se utilizan para la unión de tuberías metálicas rígidas y sus correspondientes accesorios y en estas se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para instalaciones interiores no debe exceder una presión de servicio de 34 kPa (5 psi).
- Para instalaciones exteriores no deben exceder una presión de servicio de 10 psi y no deben utilizarse uniones roscadas para tubería con diámetro nominal superior a 50 mm.

3.2.2 JUNTAS A PRESIÓN EN FRÍO O POR ALTA COMPRESIÓN (HCC-HIGH HIDRAULIC COMPRESSION) ¹⁹

Para el uso de este sistema aún no se ha elaborado una norma INEN correspondiente. Sin embargo:

Se pueden instalar al exterior sin necesidad de ductos, o al interior de los edificios independientes con ventilación al exterior de los mismos, sin exceder la presión de operación máxima (15 psig). ²⁴

Cuando estas uniones se usan en instalaciones interiores la presión máxima de operación es 1 psig (6.9 kPa) y debe estar instalada dentro de una camisa o un ducto de ventilación exclusivo canalizado al exterior de la edificación en los extremos.²⁴ Este tipo de uniones no se usarán en tuberías que conduzcan gas en fase líquida.²⁴

3.2.2.1 Procedimiento Para Unión a Compresión.¹⁹

1. Cortar el tubo con máquina cortadora.



Figura 3. 2 Corte del tubo¹⁹

2. Insertar el tubo en el accesorio hasta el tope, lubricar el o´ring con agua jabonosa. (no utilizar grasas ni aceites).



Figura 3. 3 Inserción de tubo en accesorio¹⁹

3. Marcar el tubo en su junta con el accesorio utilizando un marcador de fibra.



Figura 3. 4 Tubo Marcado¹⁹

4. Colocar la pestaña del accesorio que contiene al o´ring en la ranura central de la garra.



Figura 3. 5 Inserción del Tubo ¹⁹

5. Verificar si no existe desplazamiento del tubo respecto al accesorio (marca del punto 3) cerrar la válvula de alivio y accionar la bomba hidráulica hasta unir los extremos de la garra, sin dejar espacio entre los mismos.



Figura 3. 6 Unión por Compresión con Bomba Hidráulica ¹⁹

6. verificar el sellado con un calibre.



Figura 3. 7 Verificación con galga ¹⁹

El sistema de unión por alta presión (HHC – High Hidraulic Compression), permite unir tubos y accesorios en un tiempo muy corto, mediante el uso de una bomba hidráulica manual que ejerce una presión de 700 kg/cm^2 (10 000 psi). ¹⁹



Figura 3. 8 Bomba Hidráulica Manual Hidrinox ¹⁹

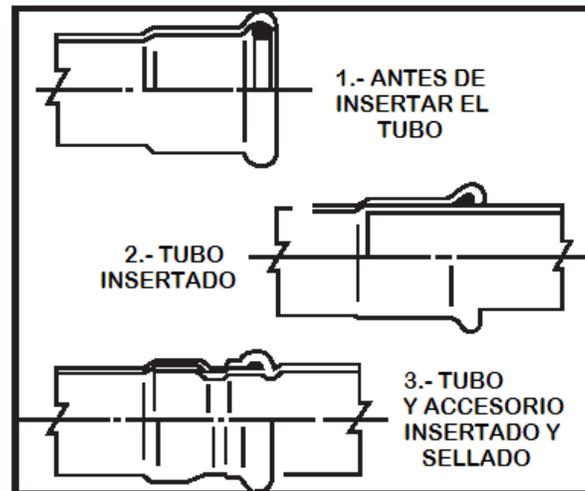


Figura 3.9 Cortes de Tubos Unidos con Compresión¹⁹

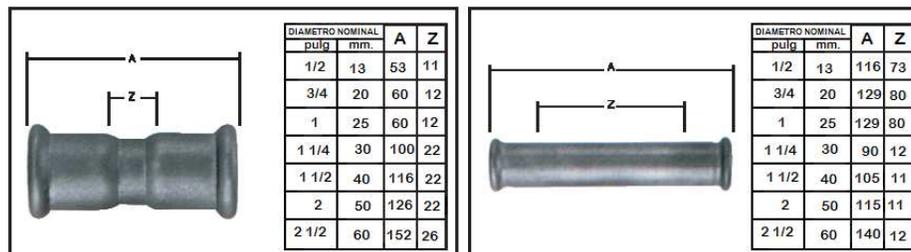


Figura 3.10 Accesorios para unir tubos de la misma dimensión..¹⁹

Anillo Elastómero (O´ring): El O´ring estándar color negro es una goma etilen – propilénica (EPDM), de excelente resistencia al agua fría y caliente, aire comprimido y de una vida útil ilimitada en condiciones normales de trabajo. Este material se ensaya bajo la norma ANSI NSF 61 (componentes del sistema de agua potable – efectos en salud) clasificado por UL (Underwriter´s Laboratory Inc.) como material para servicio en agua potable.¹⁹

El O´ring de color amarillo sirve para la conducción de hidrocarburos y el de color blanco (silicón) para calefacción.¹⁹



Figura 3.11 Anillos o ring para instalaciones de alta compresión.¹⁹

3.2.2.2 Estudio de la Vida Útil de los Elastómeros⁵

La unión por alta compresión tiene como base garantizar la hermeticidad de la unión mediante un elemento elastómero, es decir que entre metal y metal.

Es necesario mencionar un breve estudio de los efectos que tienen los elastómeros al encontrarse bajo cargas, además comprender que éstos con relación a los metales tienen menor tiempo de vida útil.

Los hules, goma o caucho son sólidos amorfos, los vidrios y los hules son estructuralmente parecidos y la diferencia entre ellos es la capacidad de reorganizarse a escala molecular. Para cualquier sólido amorfo, la temperatura crítica que separa el comportamiento vítreo del comportamiento elástico en la escala de tiempo de experimento, se llama temperatura de transición vítrea.⁵

Por ejemplo, a temperatura ambiente entre una ventana de vidrio y una banda de hule cuando se golpean con un martillo, el vidrio se rompe (frágil) mientras que la liga se deforma para absorber la energía del golpe, sin embargo cuando se sumerge la liga en nitrógeno líquido se convierte en un vidrio frágil.⁵

La temperatura de transición vítrea es una característica de todos los materiales no cristalinos.⁵

En la figura 3.12 se indica el volumen específico en función de la temperatura, para varios materiales, donde: "a) Es la transformación de líquido a sólido cristalino. A la temperatura de fusión, T_m , sucede una discontinuidad en el cambio de volumen. b) La transformación de líquido a vidrio, con la curva de transformación de líquido a cristal como referencia. El intervalo de temperaturas en el que cambia la pendiente de la curva de líquido a vidrio es la temperatura de transición vítrea, T_g , c) Volumen específico en función de la temperatura, para un material semicristalino. El salto en el cambio de volumen se presenta a T_m y el cambio de pendiente sucede a T_g ."⁵

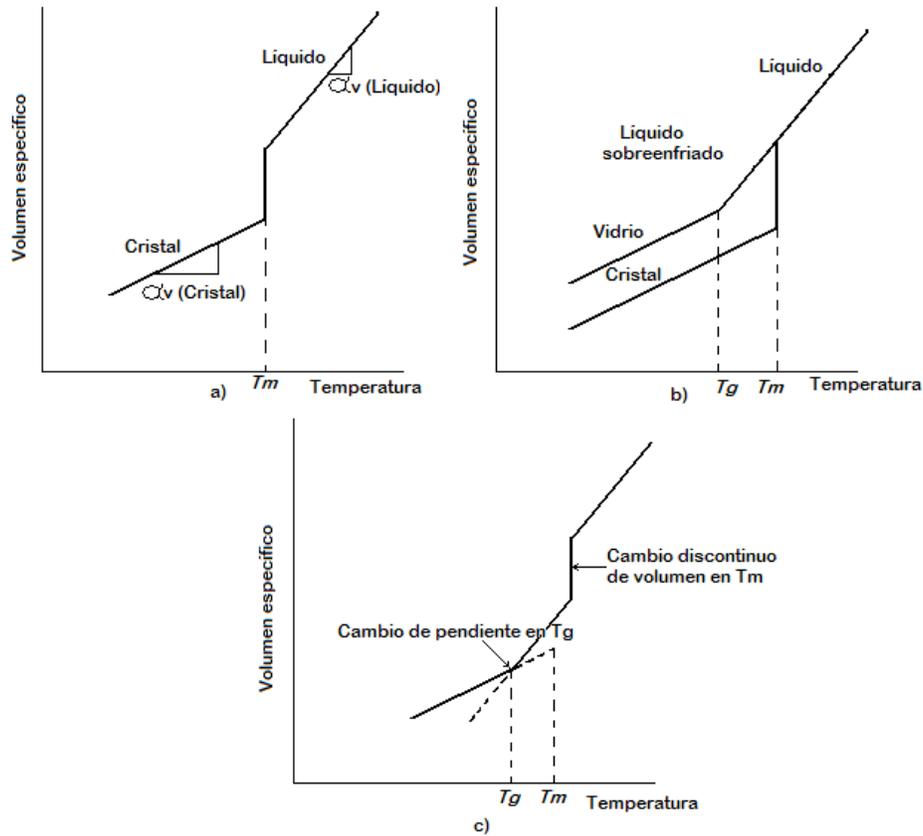


Figura 3. 12 *Volumen específico en función de la temperatura.*⁵

Cuando la rapidez de enfriamiento es baja una muestra puede cristalizar a una temperatura fija llamada punto de fusión T_m . En esta temperatura se presenta una reducción brusca de volumen, como resultado del cambio de empaquetamiento atómico en el líquido al del sólido cristalino.⁵

La posibilidad de movimiento molecular explica el reblandecimiento del material a temperaturas como la de transición vítrea. Los materiales amorfos a temperaturas menores a T_g se llaman vidrios y son frágiles.⁵ En el caso de los polímeros el estado de líquido sobreenfriado se llama hule. Los líquidos sobreenfriados incluyendo los polímeros y los óxidos (no los metales) muestran comportamiento viscoso.⁵

El tiempo tiene influencia sobre el comportamiento mecánico de los sólidos amorfos, la clave es reconocer que el movimiento molecular requiere tiempo. Si se aplica lentamente una carga a un material a una temperatura cercana a T_g , puede haber tiempo suficiente para el movimiento molecular. En contraste, una

rapidez grande de aplicación de carga puede no dejar el tiempo suficiente para que haya movimiento apreciable, independiente de la temperatura.⁵

Una banda de hule no es frágil a temperatura ambiente pero la aplicación de carga elevada hace que el material elastómero se comporte como vidrio a esta temperatura, se puede decir que la Tg de ese polímero es menor a temperatura ambiente.⁵

3.2.3 JUNTAS DE SOLDADURA

Las uniones de los tubos de acero inoxidable deben realizarse mediante capilaridad, a través de accesorios de acero inoxidable o bien a tope dilectamente entre tubos y usando materiales de aporte para soldadura fuerte. Se debe usar el abocardado del tubo para obtener soldadura fuerte por capilaridad, siempre que después de realizarse la unión, el espesor resultante sea como mínimo el espesor original del tubo.

Las técnicas de soldadura y los materiales de aporte deben cumplir con características mínimas de temperatura, tiempos de aplicación, resistencia la tracción, presión. El proceso de soldadura y los operadores que lo apliquen deben estar calificados según ASME IX, AWS A5.8 o NTE INEN 128.

En la realización de la soldadura se deben seguir las instrucciones del fabricante de los tubos, de los accesorios, y del material de aporte teniendo especial precaución en la limpieza previa de las superficies a unir; el uso del fundente adecuado y la posterior eliminación de sus residuos. Todos estos datos se detallan de mejor manera en el capítulo 2.

3.2.4 EXPANSIÓN (ABOCINADO)

La expansión con una prensa hidráulica (5000 psi máximo) consiste en colocar el dado en la parte inferior y unir los cabezales de la prensa para que por efecto de compresión uno de los extremos del tubo adopte la forma del dado. En este caso se tienen dos inconvenientes, el primero es la alineación del tubo y el segundo es la dificultad de extracción del dado después de deformado el tubo.

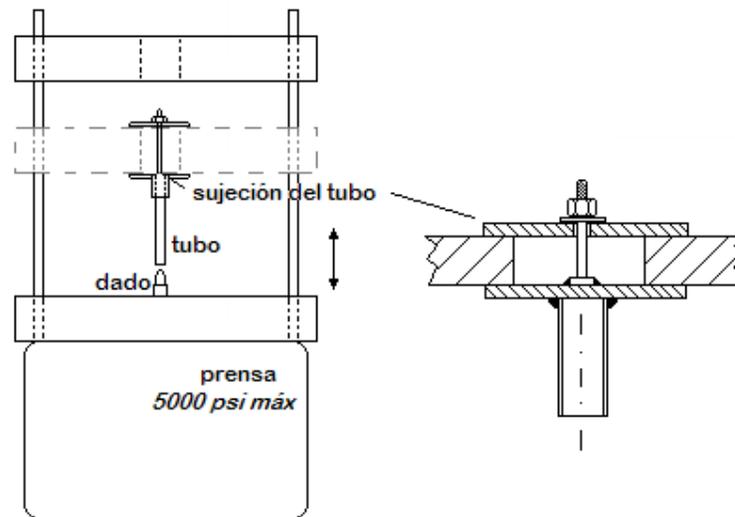


Figura 3. 13 Abocardado de tubería con Prensa Hidráulica.

Es más fácil sujetar el tubo en el cabezal móvil, y para el efecto se creó un dispositivo que consiste en una placa y un tubo dispuestos en forma de “T”, este tubo debe tener mayor diámetro que el tubo a expandir, como se indica en la figura 3.13.

La máxima longitud del tubo debe ser calculada para que no pandee al momento de ejercer compresión sobre el mismo.

3.2.4.1 Diseño del Dado Expansor

Luego de conseguir la presión adecuada para deformar al tubo, el diseño del dado es lo más importante debido a que la sección a deformar casi no debe alterar su espesor.

La norma ASTM E8 o el Código ASME-Sección XI - (QB-462.1(e)) muestran una manera de realizar ensayos de tracción en tuberías de diámetros pequeños, indicando parámetros para diseñar un tapón sobre el cual se desliza la pared de la tubería mientras experimenta los esfuerzos de tracción, la deformación que sufre el material no debe ser brusca.

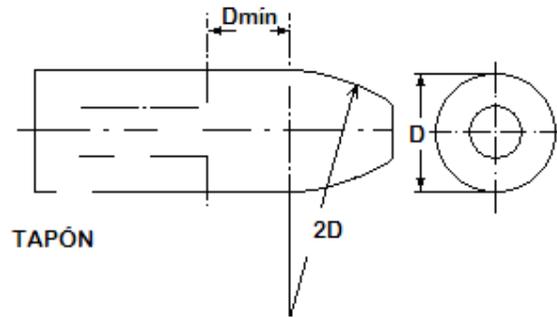


Figura 3. 14 Tapón para ensayo de tracción – dado para abocardar³³

En base a la norma se diseña el dado deformador cuyas dimensiones dependen directamente del diámetro del tubo que se va a deformar. A continuación se indican las dimensiones de un dado deformador que luego de la expansión de la tubería de 15,88mm de diámetro externo, proporcionará a ésta una holgura de 0,5 mm por lado. ($15,88\text{mm} + 2(0,5)\text{mm} = 16,88\text{mm}$)

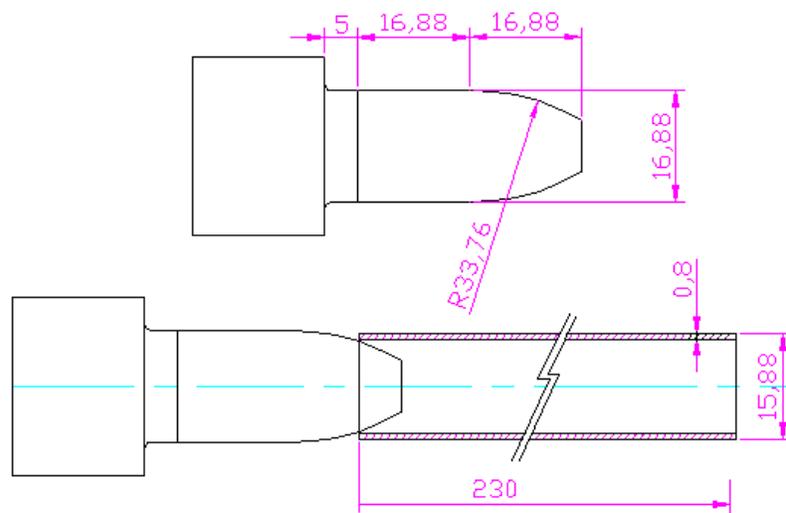


Figura 3. 15 Expansión de Tubería con dado expansor.

El dado deformador debe maquinarse en acero de alta resistencia mecánica (mayor resistencia mecánica que la del acero 304) y al momento de realizar la expansión se debe utilizar lubricante que facilite la inserción y salida del dado.

El tramo de tubería expandido se denomina “hembra”, en el cual se inserta el extremo “macho” y se proceden a medir las holguras haciendo también un control de la medida de la garganta expandida. Según lo analizado en el capítulo 2 la holgura debe tener 0,2 mm por lado y la garganta debe ser igual a

12,7 mm. Se va a ensayar con probetas de dos holguras 0,2 y 0,5 mm por lado para analizar el comportamiento de cada junta en cada uno de los ensayos.

3.3 CÁLCULOS PARA EXPANSIÓN DE TUBERÍA

A continuación se desarrollan cálculos para determinar los esfuerzos que se obtienen en los tubos al conformarlos con el dado expansor abocinador. Dos aspectos importantes se consideran al abocinar un extremo de tubería: Al final de la deformación debe obtenerse un espesor casi igual al inicial para no debilitar a la pared que va a formar parte de la unión y se debe cuidar que la soldadura del tubo (proceso de fabricación) no se abra.

Tabla 3. 2 *Dimensiones de diámetros expandidos*

Diámetro	Holgura por lado (mm)	Exterior (mm)	Interior (mm)
Inicial	-	15.88	14.28
Final	0,2	17.88	16.28
Final	0,5	18.48	16.88

En la figura 3.16 se indica el dado deformador con las dimensiones obtenidas anteriormente.

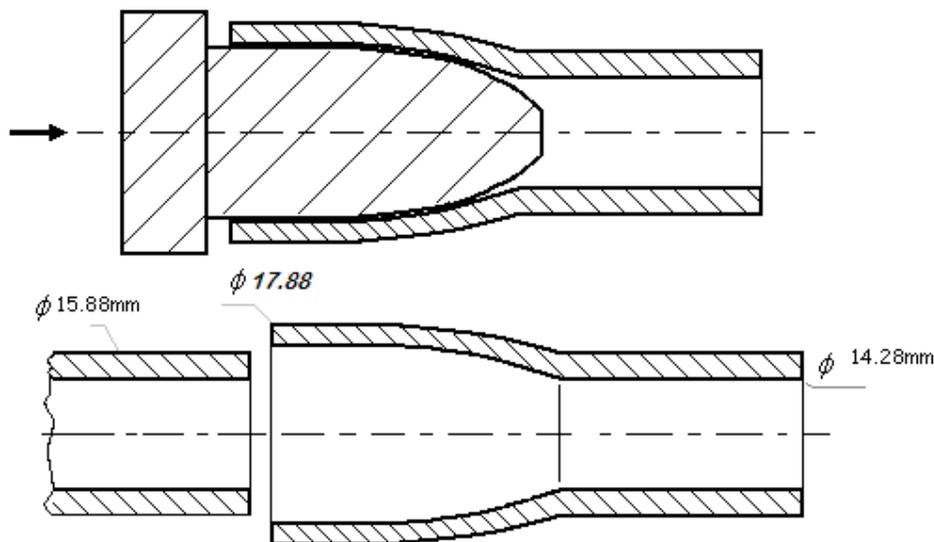


Figura 3. 16 *Dado expansor abocinador y tubo deformado*

A continuación se procede a realizar cálculos de esfuerzos que se generan durante la expansión de la tubería.

Tabla 3. 3 Datos para cálculos de expansión de tubería AISI 304 ²⁶

Propiedad	Mpa (N/mm2)	Pa=N/m2	Kg/mm2	Psi
Resistencia mecánica	520	5,20E+08	53,06	75400
Presión (prensa)	34,48	3,45E+07	3,5	5000
Módulo de proporcionalidad (E)	196000	1,96E+11	20000	2,84E+07
Esfuerzo de fluencia mín.	240	2,40E+08	24	34800
Esfuerzo de fluencia máx.	350	3,50E+08	36	50750

3.3.1 ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE DIMENSIONES

Área inicial (Ao):

$$A_o = \left(\frac{\pi * \phi_e^2}{4} - \frac{\pi * \phi_i^2}{4} \right)$$

Ecuación 3. 1 Área inicial de tubería ³⁴

De la ecuación 3.1:

$\phi_e =$ Diámetro externo (mm)

$\phi_i =$ Diámetro interno (mm)

$$A_o = \left(\frac{\pi * 15.88^2}{4} - \frac{\pi * 14.28^2}{4} \right)$$

$$A_o = 37,9mm^2 \cong 38mm^2$$

Considerando tensión pura, si se utiliza una prensa de 5000 psi (3,5 kg/mm²):

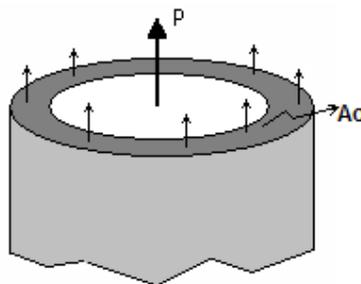


Figura 3. 17 Aplicación de fuerza sobre área inicial en un extremo de Tubería

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Ecuación 3. 2 Cálculo de esfuerzo ³⁴

De la ecuación 3.2 se tiene:

$$\sigma = \text{esfuerzo de tracción (kg / mm}^2\text{)}$$

$$P = \text{fuerza de tracción (kg)}$$

$$A = \text{área (mm}^2\text{)}$$

$$P = 3.5 \text{Kg / mm}^2 * 38 \text{mm}^2$$

$$P = 133 \text{Kg}$$

Para calcular la variación de longitud se considera la longitud que va a deformarse como máximo 15 mm (garganta):

$$\Delta l = \frac{Pl_0}{EA}$$

Ecuación 3. 3 Variación de longitud ³⁴

De la ecuación 3.3:

$$\Delta l = \text{variación de longitud (mm)}$$

$$l_0 = \text{longitud inicial (mm)}$$

$$E = \text{Módulo de elasticidad (kg / mm}^2\text{)}$$

$$\Delta l = \frac{133 \text{kg} * 15 \text{mm}}{20000 \text{Kg / mm}^2 * 37,9 \text{mm}^2}$$

$$\Delta l = 0,0026 \text{mm} \approx 0.003 \text{mm}$$

Al deformar el extremo del tubo lo que aumenta en longitud se reduce en espesor y la variación de esta longitud es de 0,003 mm, lo que da una idea que el espesor es casi invariable, cumpliendo con los requerimientos de la norma INEN 2260 para aprobar abocardado en tubería sin variar considerablemente el espesor del tubo después de la expansión.

Variación de volumen (ΔV)

$$\Delta V = \frac{(1-2\mu)Pl}{E}$$

Ecuación 3. 4 Variación de volumen ³⁴

De la ecuación 3,4:

$\Delta V = \text{variación de volumen (mm}^3\text{)}$

$\mu = \text{módulo de Poisson}$

$l = \text{longitud de expansión (mm)}$

$$\Delta V = \frac{(1 - 2(0.3))133 * 15}{20000} = 0.04 \text{mm}^3$$

La deformación mínima del Acero 304 es del 35% y la máxima es del 45% (deformación lineal causada en el espesor del tubo).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Ecuación 3. 5 Deformación unitaria ³⁴

De la ecuación 3.5:

$\varepsilon = \text{enlongación (\%)}$

$\sigma = \text{esfuerzo de tracción (kg / mm}^2\text{)}$

$E = \text{módulo de elasticidad (kg / mm}^2\text{)}$

$$\varepsilon = \frac{3,5 \text{Kg / mm}^2}{20000 \text{Kg / mm}^2} = 0.017\%$$

El esfuerzo promedio de fluencia del acero 304 es de 30 kg/mm², con un factor de seguridad n=5, se tiene un esfuerzo admisible Sy = 6 kg/mm² y si se aplican 5000 psi con la prensa entonces se comparan los valores:

$$\sigma < S_y$$

$$3,5 \text{ kg/mm}^2 < 6 \text{ kg/mm}^2$$

Por lo que no se llega al valor de esfuerzo admisible.

El esfuerzo que se aplica con la prensa para deformar el tubo debe ser menor que el esfuerzo admisible, lo contrario ocasionaría que las paredes de la sección deformada sean demasiado delgadas o lleguen a romperse, quedando inservible el extremo para realizar la unión.

Para determinar la deformación en relación a los diámetros internos, la holgura debe ser 0.2 mm por cada lado, es decir 0.4mm en total. Si el diámetro interior del extremo deformado debe alojar el extremo macho más la holgura total, entonces éste diámetro tiene un valor de 16.28 mm.

$$\varepsilon = \left| \frac{\phi_{fi} - \phi_{oi}}{\phi_{oi}} \right|$$

Ecuación 3. 6 Deformación Unitaria en relación a diámetros internos ³⁴

De la ecuación 3.6.

ϕ_{oi} = diámetro inicial interno (mm)

ϕ_{fi} = diámetro final interno (mm)

$$\varepsilon = \left| \frac{16.28 - 14.28}{14.28} \right|$$

$$\varepsilon = 14\%$$

Esta deformación también es menor al mínimo porcentaje de deformación del acero que es del 35%. Esto determina que la deformación plástica realizada en el acero AISI 304 no produce cambios considerables en el espesor de la tubería.

3.3.2 ANÁLISIS CILINDRO DE PAREDES DELGADAS (ESTADO BIAIXIAL)

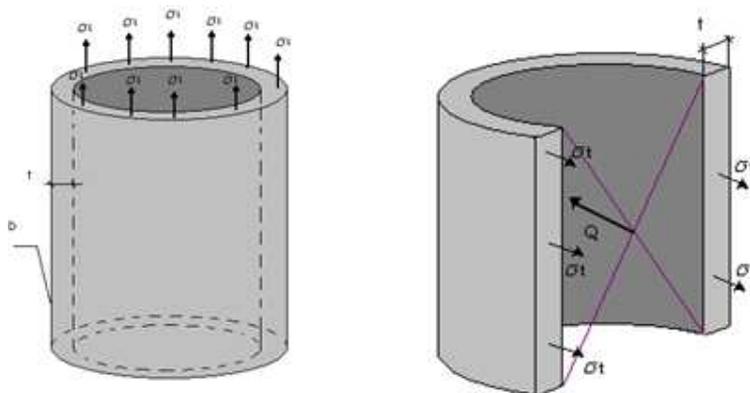


Figura 3. 18 Distribución de esfuerzos transversales y longitudinales ocasionados por presión interna.

Área del espesor de pared delgada (A_c)

$$A_c = \pi D t$$

Ecuación 3. 7 Área del espesor de pared delgada ³⁴

De la ecuación 3.7:

$$A_c = \text{área cilindro pared delgada (mm}^2\text{)}$$

$$D = \text{diámetro externo (mm)}$$

$$t = \text{espesor (mm)}$$

$$A_c = \pi(15.88) * 0,8 = 40\text{mm}^2$$

3.3.2.1 Esfuerzo Longitudinal y Transversal (Presión Interna Perpendicular)

$$\sigma = \frac{P}{A_c} = \frac{qD}{4t}$$

Ecuación 3. 8 Esfuerzo longitudinal ³⁴

Donde:

$$\sigma = \text{esfuerzo longitudinal (kg / mm}^2\text{)}$$

$$q = \text{presión interna (kg / mm}^2\text{)}$$

$$\sigma = \frac{3,5 * 15,88}{4 * 0,8}$$

$$\sigma = 17,33 \text{Kg / mm}^2$$

Considerando el diámetro interno:

$$\sigma = \frac{3,5 * 14,28}{4 * 0,8}$$

$$\sigma = 15,6 \text{Kg / mm}^2$$

Esfuerzo transversal

$$\sigma_t = \frac{qD}{2t}$$

Ecuación 3. 9 Esfuerzo transversal ³⁴

$\sigma_t = \text{esfuerzo transversal (kg/mm}^2\text{)}$

$q = \text{presión interna (kg/mm}^2\text{)}$

$$\sigma_t = \frac{3,5 * 15,88}{2 * 0,8}$$

$$\underline{\sigma_t = 34,73 \text{ Kg/mm}^2}$$

$$\sigma_t = \frac{qD}{2t}$$

$$\sigma_t = \frac{3,5 * 14,28}{2 * 0,8}$$

$$\underline{\sigma_t = 31,23 \text{ Kg/mm}^2}$$

Ángulo que se produce en la parte abocinada del tubo:

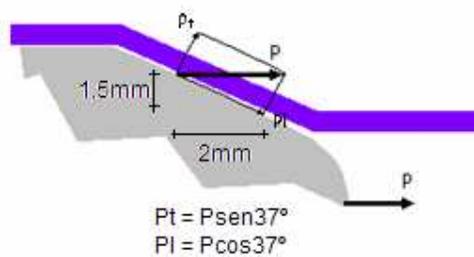


Figura 3. 19 Distribución de esfuerzos transversales y longitudinales ocasionados por presión interna

3.3.2.2 Esfuerzo longitudinal y transversal (Presión Interna Aplicada con Ángulo)

De la expansión de un extremo, y en base a dimensiones de accesorios de cobre y acero inoxidable que se encuentran en venta comercial, se obtiene que el ángulo en la deformación es aproximadamente 37°.

Cálculo de los esfuerzos considerando los diámetros internos en la parte deformada:

$$\sigma_l = \frac{P}{Ac} = \frac{q \cos 37^\circ D}{4t}$$

$$\sigma_l = \frac{3,5 * \cos 37^\circ * 14,28}{4 * 0,8}$$

$$\underline{\sigma_l = 12,47 \text{ Kg/mm}^2}$$

$$\sigma_t = \frac{qD}{2t}$$

$$\sigma_t = \frac{3,5 * \text{sen } 37^\circ * 14,28}{2 * 0,8}$$

$$\underline{\sigma_t = 18,8 \text{ Kg/mm}^2}$$

Con diámetro externo

$$\sigma_l = \frac{P}{Ac} = \frac{q \cos 37^\circ D}{4t}$$

$$\sigma_l = \frac{3,5 * \cos 37^\circ * 15,88}{4 * 0,8}$$

$$\sigma_l = 13,8 \text{ Kg} / \text{mm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{qD}{2t}$$

$$\sigma_t = \frac{3,5 * \text{sen}37^\circ * 15,88}{2 * 0,8}$$

$$\sigma_t = 20,9 \text{ Kg} / \text{mm}^2$$

Resumen de Esfuerzos:

Tabla 3. 4 Resumen de cálculos de esfuerzos en expansión de tubería

Esfuerzo	Valor aproximado (Kg/mm²)
Fluencia	24 - 36
Aplicado (q)	3.5
Longitudinal con fuerza aplicada perpendicularmente	15.6 – 17.33
Transversal con fuerza aplicada perpendicularmente	31.23 – 34.73
Longitudinal con fuerza aplicada a 37°	12.47- 13.8
Transversal con fuerza aplicada a 37°	18.8 – 20.9

En la Tabla 3.4 se recopila la información de los esfuerzos aplicados para producir la deformación de la tubería. Los esfuerzos transversales son más críticos en relación a los esfuerzos longitudinales porque tienden a abrir al tubo.

Los esfuerzos transversales aplicados a cierto ángulo (en este caso 37°) son menores que el rango de fluencia e incluso menores a los esfuerzos transversales aplicados perpendicularmente. De esta manera se determina que el diseño del dado es importante porque la curva del mismo ayuda a expandir el tubo sin generar daños en la pared de la tubería.

3.3.3 ANÁLISIS DE ESBELTEZ

Dadas las condiciones de este sistema de expansión es importante analizar el efecto de flexión para obtener una longitud máxima de tubería, que evite el pandeo de la probeta.

$$\sigma_K = \frac{P_K}{A} \leq (\sigma_E)$$

Ecuación 3. 10 Esfuerzo de Euler ³⁴

Donde:

σ_K = esfuerzo de Euler

P_K = carga crítica de esbeltez

σ_E = esfuerzo admisible para estabilidad

A = área

E = módulo de elasticidad

I = momento de inercia

k = constante de la teoría de Euler

M = momento que se genera en eje X

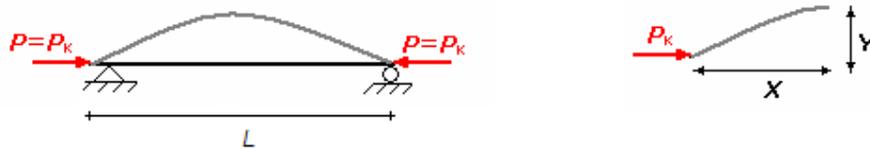


Figura 3. 20 Cargas Críticas y Efecto de Pandeo en un elemento esbelto

$$EI * \frac{\partial^2 y}{\partial^2 x} = \pm M_x$$

$$M_x = -P_K Y$$

$$EI * \frac{\partial^2 y}{\partial^2 x} + P_K Y = 0$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial^2 x} + \left[\frac{P_K}{EI} \right] Y = 0$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial^2 x} + k^2 Y = 0$$

$$Y'' + K^2 Y = 0$$

$$Y = a \sin ky + b \cos ky$$

$$\frac{P_K}{EI} = k^2$$

$$k = \sqrt{\frac{P_K}{EI}}$$

Ecuación 3. 11 Constante de La Teoría de Euler ³⁴

La inercia mínima (I_{min}) se debe a que hacia ese lado tiende a flejar el elemento de análisis. Para elementos cuadrangulares y circulares la inercia es la misma.

Momento de inercia de un tubo = mr^2 y se asume masa (m) unitaria.

$$Y = a \operatorname{sen} ky + b \cos kx$$

$$X=0$$

$$Y=0 \quad \text{entonces } b=0$$

$$Y=0$$

$$Y(L) = a \operatorname{sen}(KL) = 0$$

$$\text{Sen } kL=0 \quad \text{entonces } k = \frac{n\pi}{L}; \quad n = 0,1,2,3,\dots$$

$$\frac{n\pi}{L} = \sqrt{\frac{P_K}{EI}}$$

$$P_K = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 EI$$

$$P_K = \left(\frac{n^2 \pi^2}{L^2}\right) EI$$

Ecuación 3. 12 Carga Crítica en esbeltez ³⁴

El tramo de tubería puede deformarse de 2 maneras siendo $n=1$ como senoide y $n=2$ como dos senoideos:

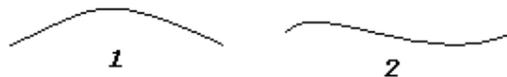


Figura 3. 21 Forma de Pandeo de un elemento

Para una senoide que es lo más probable debido a que el tramo de la tubería es corto entonces trabajamos con $n=1$.

$$Y = a \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad \wedge \quad P_K = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

La fuerza se determinó anteriormente y es de 133 Kg, despejando L de la ecuación 3.12 tenemos entonces:

$$L \leq \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{P_K}}$$

$$L \leq \sqrt{\frac{\pi^2 (20000)(14,28/2)^2}{133}} \leq 275 \text{ mm}$$

Esfuerzos a compresión para comparar con los esfuerzos admisibles en esbeltez.

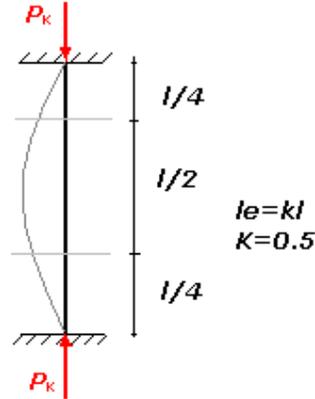


Figura 3. 22 Cargas Críticas y Efecto de Pandeo en un elemento esbelto

$$\sigma_k = -\frac{P_k}{A} = \frac{133}{39} = 3,4 \text{ Kg} / \text{mm}^2$$

Si $n = 2$ (2 sinusoides)

$$P_k = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$$

$$L \leq \sqrt{\frac{4\pi^2 20000(7.14)^2}{133}}$$

$L \leq 550 \text{ mm}$

$$C_p = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_{fl}}}$$

Ecuación 3. 13 Coeficiente de esbeltez debido a procesos de laminación ³⁴

$$C_p = \sqrt{\frac{2\pi^2 (20000)}{30}} = 114,71$$

C_c = coeficiente de esbeltez

$$C_c = \frac{kL}{r_{\min}}$$

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 E}{C c^2}$$

Ecuación 3. 14 Esfuerzo Crítico en función del coeficiente de esbeltez ³⁴

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r_{\min}}\right)^2}$$

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}}$$

Ecuación 3. 15 Radio Mínimo ³⁴

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{7,14^2}{39}} = 1,14 \text{ mm}$$

$$L_e = kL$$

Ecuación 3. 16 Longitud Efectiva ³⁴

$$L_e = 0,5 (412,5) = 206,25 \text{ mm,}$$

Se considera una longitud de 400 mm y la dimensión de garganta recomendada igual a 12.5 mm

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 E}{C c^2} = \frac{\pi^2 20000}{\left(\frac{0,5 * 412,5}{1,14}\right)^2} = 6 \text{ kg / mm}^2$$

$$\sigma_k \ll \sigma_{\text{fluencia}} = 30 \text{ kg / mm}^2$$

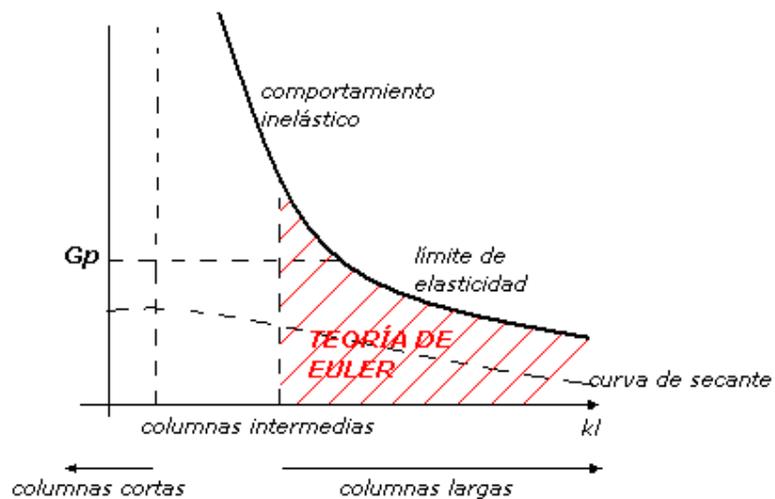


Figura 3. 23 Diagrama de la Teoría de Euler

Tabla 3.5 Esfuerzo crítico en función de la longitud del elemento esbelto

Longitud L (mm)	cc	Gk (Kg/mm ²)
80	70,1754386	40,08311834
85	74,5614035	35,50615327
90	78,9473684	31,67061202
91	79,8245614	30,9783791
91,5	80,2631579	30,64074261
92	80,7017544	30,3085961
92,5	81,1403509	29,98182117
100	87,7192982	25,65319574
150	131,578947	11,40142033
200	175,438596	6,413298934
250	219,298246	4,104511318
300	263,157895	2,850355082
350	307,017544	2,094138427
400	350,877193	1,603324733
450	394,736842	1,266824481
500	438,596491	1,026127829

De la Tabla 3.5 se determina que los valores de longitud a partir de 90 mm no superan el esfuerzo de fluencia.

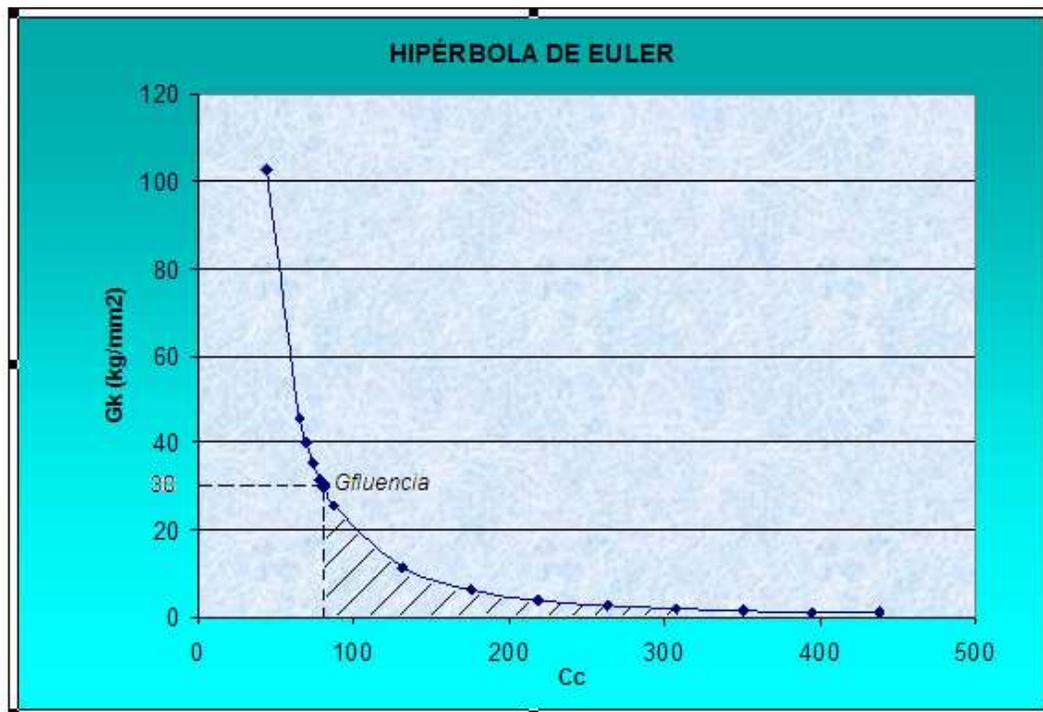


Figura 3. 24 Diagrama de Teoría de Euler (Esfuerzo crítico en función de coeficiente de esbeltez)

La longitud del segmento de tubería a expandirse, para evitar pandeo con la fuerza que se va a aplicar (prensa), debe ser menor o igual a 50 cm.

El límite inferior es 9 cm según la hipérbola de Euler, debajo de este valor se considera vigas cortas que no se analizan con la teoría de Euler, sino con la Teoría de Resistencia Mecánica. Para determinar un rango de expansión de tubería, sin superar los esfuerzos admisibles (fluencia) y sin llegar a deformación (pandeo), procedemos a calcular fuerza y esfuerzos para distintas longitudes considerando el tubo en estado inicial y luego de expandirlo:

Tabla 3. 6 Esfuerzo y carga crítica en función de la longitud del elemento esbelto

Sin deformación			Con expansión		
L (mm)	Pk (Kg)	Gk (kg/m ²)	L (mm)	Pk (Kg)	Gk (kg/m ²)
150,00	1788,98	47,08	150,00	2319,48	61,04
155,00	1675,42	44,09	155,00	2172,25	57,16
160,00	1572,35	41,38	160,00	2038,60	53,65
165,00	1478,50	38,91	165,00	1916,92	50,45
170,00	1392,81	36,65	170,00	1805,82	47,52
175,00	1314,35	34,59	175,00	1704,11	44,84
180,00	1242,35	32,69	180,00	1610,75	42,39
185,00	1176,10	30,95	185,00	1524,86	40,13
190,00	1115,02	29,34	190,00	1445,66	38,04
195,00	1058,57	27,86	195,00	1372,47	36,12
200,00	1006,30	26,48	200,00	1304,71	34,33
205,00	957,81	25,21	205,00	1241,84	32,68
210,00	912,75	24,02	210,00	1183,41	31,14
215,00	870,79	22,92	215,00	1129,01	29,71
220,00	831,65	21,89	220,00	1078,27	28,38
225,00	795,10	20,92	225,00	1030,88	27,13
230,00	760,91	20,02	230,00	986,55	25,96
235,00	728,87	19,18	235,00	945,01	24,87
240,00	698,82	18,39	240,00	906,05	23,84
245,00	670,59	17,65	245,00	869,44	22,88
250,00	644,03	16,95	250,00	835,01	21,97
255,00	619,02	16,29	255,00	802,59	21,12
260,00	595,44	15,67	260,00	772,02	20,32
Radio interno 7,14 mm			Radio interno expandido 8,14 mm, holgura 0,2mm por lado.		

La tabla 3.6 presenta en detalle los datos de esfuerzos y cargas críticas según Euler. El esfuerzo de fluencia está comprendido entre 24 y 36 Kg/mm² entonces la longitud de tubería sin y con expansión, al ser sometidas a compresión por la prensa hidráulica, pueden estar entre valores de 19.5 y 21 cm para no pandear

El valor mínimo del esfuerzo admisible corresponde a una longitud de 21 cm en tubería sin expandir, y el valor máximo de esfuerzo admisible en la tubería expandida corresponde a un valor de 19,5 cm. Con estos valores se determina

que la longitud necesaria a expandirse es 1,5 cm (21-19,5). Los acoples de referencia como son los de tubería de cobre de ½" tienen longitudes expandidas de ½" o 12,7 mm.

Este análisis permite encontrar el valor de longitud expandida o garganta de 15 mm de longitud. La longitud de las probetas deben hallarse en valores que eviten el pandeo y daños (rotura o agrietamiento).

Tabla 3.7 Longitud máxima de la tubería

LONGITUD MÁXIMA (mm)	Deformación en la prensa	210
	Garganta	15

Estos cálculos se han realizado en base al proceso experimental utilizando una prensa que ejerce 5000 psi máximo (obteniéndose un esfuerzo menor al esfuerzo admisible). Por medio de la prensa se ejerce presión para que se inserte el dado expansor en el extremo del tubo, obteniéndose excelentes resultados. El inconveniente de este método se produce en la extracción del dado luego de la expansión.

Una solución a éste problema es crear un mecanismo que sujete al tubo mientras el dado penetra y es extraído, para este efecto un expansor abocinador descrito en la Figura 3.25 es de mucha utilidad siempre y cuando la presión que se ejerza sea menor o igual a 5000 psi (valor de referencia analizado).

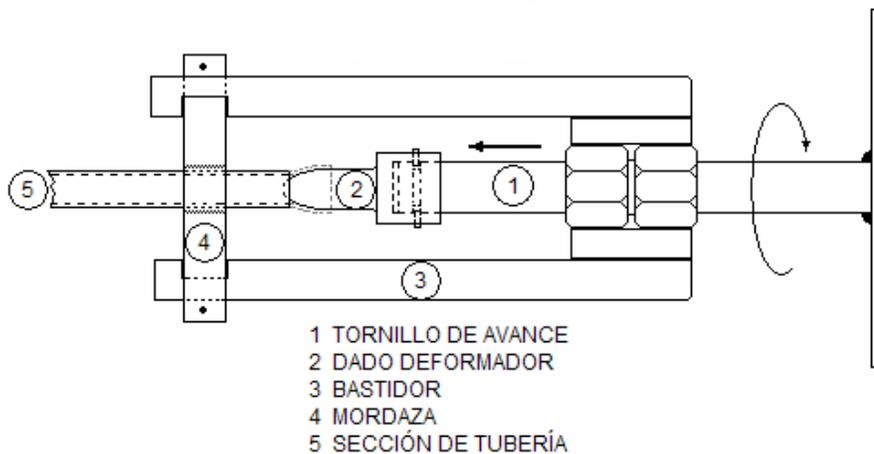


Figura 3.25 Expansor Abocinador

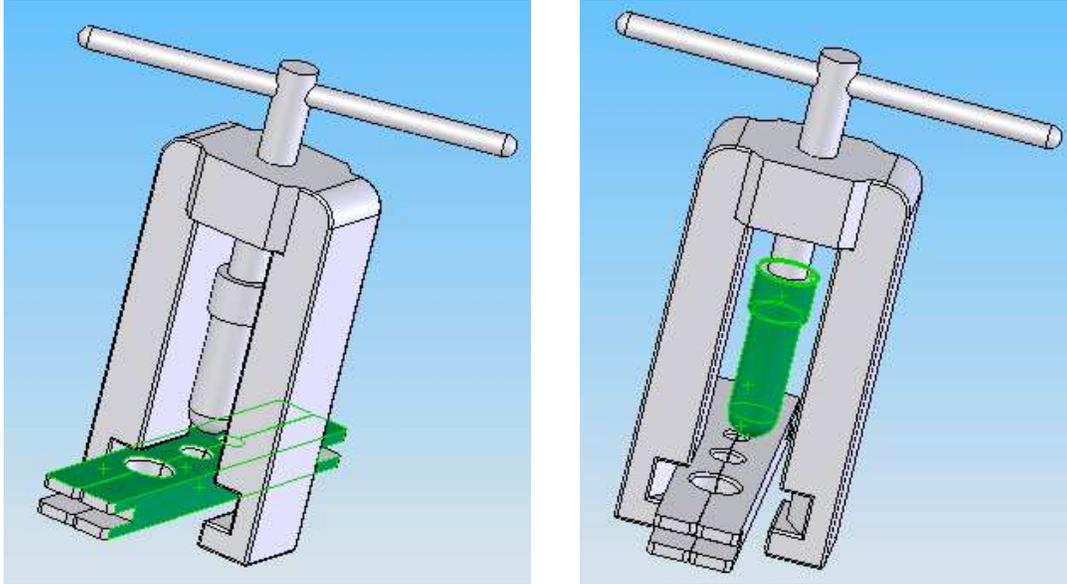


Figura 3. 26 Expansor Abocinador (3D)

Al utilizar el abocinador expansor, la sujeción del tubo se realiza con una mordaza que genera fricción evitando deslizamiento de la tubería. Con este sistema se pueden utilizar varias longitudes de tubo debido a que la distancia entre la mordaza y el dado es menor a 10 cm, y en este caso no se tiene riesgo de pandeo.

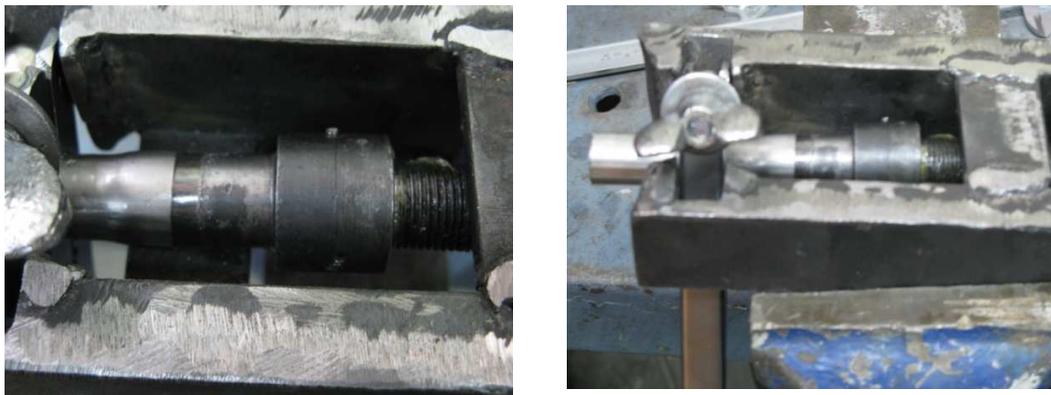


Figura 3. 27 Expansor Abocinador

CAPÍTULO 4

4 PROCESO EXPERIMENTAL

Existen códigos o estándares que establecen una normativa acerca del uso de una ingeniería responsable. Los estándares permiten prevenir accidentes y además, su uso ayuda a mejorar la eficiencia de los equipos e instalaciones necesarias en los diversos campos de la ingeniería.

Comúnmente la soldadura fuerte, por la facilidad de aplicación, se aplica en tubería de cobre. El cobre es un material con buenas propiedades para la conducción de sustancias corrosivas como el gas licuado de petróleo. De la misma forma la tubería de acero inoxidable por su resistencia a la corrosión sirve para este objetivo.

Nuestro país fabrica tubería de acero inoxidable por ende tiene un costo menor en relación al Cobre cuyos accesorios y tuberías se importan de otros países como Chile o México. La soldadura fuerte en tubería de acero inoxidable es una nueva alternativa para reemplazar al cobre

El proceso de soldadura fuerte en las tuberías de cobre y acero inoxidable es similar, la diferencia básicamente radica en la temperatura máxima que se debe alcanzar al unir el acero inoxidable, pues el control de temperatura en este caso es más riguroso porque influye sobre las propiedades químicas como la resistencia a la corrosión y oxidación.

Por otra parte muchos grupos de material de aporte (BAg, BCu, BAu) que se pueden utilizar para unir cobre con soldadura fuerte, también sirven para unir el acero inoxidable.

El proceso de soldadura fuerte en el cobre puede realizarse con materiales de aporte cuyos puntos de fusión son altos y bajos. El acero inoxidable utiliza materiales de aporte con puntos de fusión bajo (BAg),²⁴ en caso de querer unir acero inoxidable con cobre se debe interponer entre estos un accesorio de bronce.

El cobre es un material fácil de conformar por tener alta ductilidad y maleabilidad en comparación con el acero inoxidable, en el caso del acero se puede conformar pero se requieren mayores esfuerzos para lograr la forma deseada.

Países como México, Chile, Colombia y España han realizado estudios del proceso de soldadura fuerte sobre instalaciones de gas licuado de petróleo, creando manuales y normas de instalación usando cobre como materia prima, la información de estos estudios serán utilizados como referencia para realizar el proceso de soldadura fuerte del acero inoxidable y analizar pruebas de inspección.

El objetivo de realizar ensayos e inspección es observar el comportamiento de las uniones realizadas con dos materiales de aporte distintos y dos holguras diferentes (0.5 y 0.2 mm).

Para productos terminados resulta deseable utilizar ensayos no destructivos, también estas pruebas pueden ser valiosas para indicar directamente el desempeño de la unión bajo cargas de servicio.

Es importante recalcar que ningún ensayo se debe realizar antes del enfriamiento completo de las soldaduras.

4.1 APLICACIÓN DE SOLDADURA EN TUBERÍA

4.1.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE Y FUNDENTE

El proceso de soldadura que se va a aplicar a la tubería, en el presente estudio, corresponde a acero inoxidable 304; que al igual que las aleaciones de acero inoxidable en general son difíciles de unir con el método de soldadura fuerte por contener Cromo en su composición.

Para realizar la soldadura fuerte de aceros inoxidables se utilizan aleaciones de plata, cobre, cobre-zinc.

Tabla 4. 1 Especificaciones de tubería de acero inoxidable AISI 304²⁶

Descripción tubería	Valor	
Medida nominal (mm-in)	13 - 1/2	
Diámetro externo (mm)	15.88	
Espesor de pared (mm)	0.80	
Material	Acero inoxidable austenítico	
Denominación AISI	304	
Norma (material)	ASTM A-240	
Norma (fabricación)	ASTM A-544	
Resistencia mínima a la tracción (MPa-PSI)	520 - 76923	
Enlongación mínima	35 %	
Presión de servicio en condiciones críticas (PSI)	250	
Prueba Hidrostática tubería (PSI)	2271	
Prueba de vibraciones	2 millones – satisfactorio	
Golpes de presión (40 kg/cm ²)	10 000 golpes - satisfactorio	
Composición química	Carbono	0.08 máx
	Cromo	18 – 20
	Níquel	8 – 10.5
	Manganeso	2 máx
	Silicio	1 máx
	Fósforo	0.045 máx
	Azufre	0.03 máx
Densidad (g/cc)	8.027	
Reducción de área	70 %	
Dureza Brinell	150	
Dureza Rockwell B	80	

La selección de los grupos de material de aporte depende de las propiedades o aplicaciones que se deseen obtener. Por ejemplo para conducción de gas licuado de petróleo se requiere principalmente una buena resistencia a la corrosión por lo que se usan aleaciones de plata-cinc.

Si se desea alcanzar una buena resistencia mecánica no es recomendable ocupar material de aporte con fósforo porque se forman fosfuros de níquel en la unión y esto la vuelve frágil y quebradiza.¹⁴

Existen varios materiales de aporte para realizar soldadura fuerte en el acero inoxidable, pero los materiales recomendados son los de base de Plata porque alcanzan un menor punto de fusión, ventaja para evitar las precipitaciones de los carburos de cromo.³⁷ Estos materiales de aporte poseen elevada fluidez en estado líquido y penetra en espacios muy estrechos formando uniones limpias.

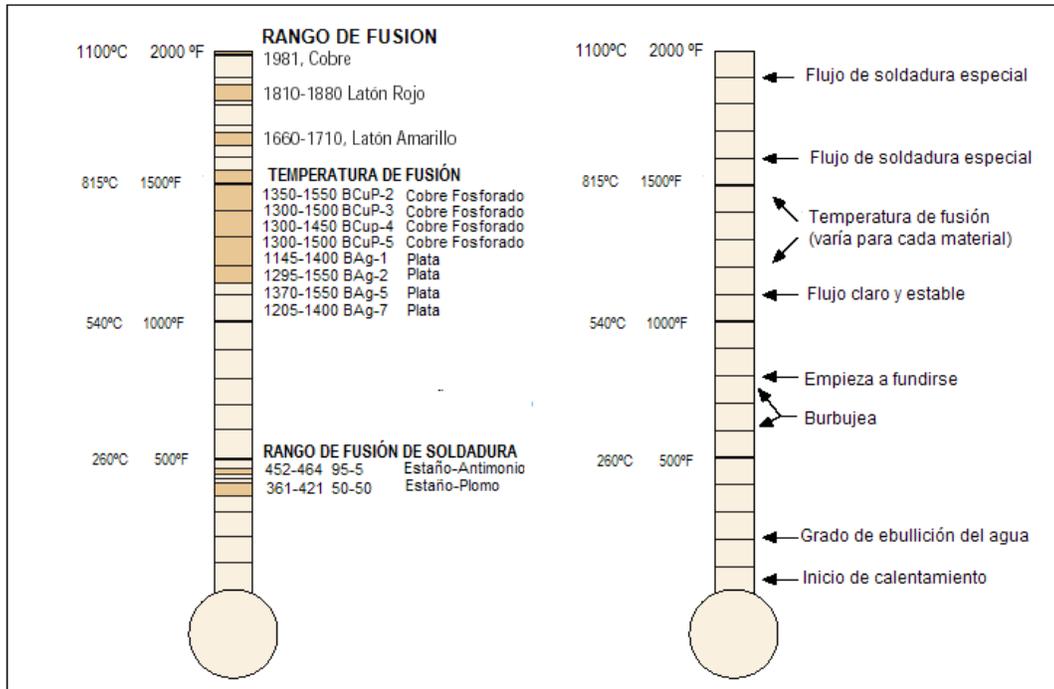


Figura 4. 1 Temperatura de fusión de soldadura fuerte¹⁵

De lo explicado en el capítulo dos, los materiales más adecuados para obtener una buena soldabilidad son los que tengan menor diferencia al restar la temperatura sólida de la líquida, correspondiendo así a los materiales con altos contenidos de Plata que implica directamente en costos mayores. Según AWS A5.8 los materiales *BAg-1*, *BAg-5* y *BAg-7* tienen un punto de fusión bajo y son de excelente soldabilidad y tienen altos contenidos de plata, de lo que se concluye que los materiales más recomendados son los denominados *BAg1* y *BAg2*. Algunas comercializadoras de varillas de aporte aconsejan utilizar *BCuP-2* (para tolerancias muy pequeñas), *BCuP-5* (donde no se pueden lograr tolerancias tan pequeñas)^{16, 17}. La soldadura con Cadmio disminuye el rango de fusión por debajo de 600°C lo que hace que sea posible obtener una distribución de temperatura más pareja alrededor de la zona de unión.¹⁶

Los materiales seleccionados son *BCuP-5* y *BAg-2* con contenidos de Plata del 15% y 35% respectivamente, para observar diferencias entre las dos varillas de aporte.

Tabla 4. 2 Especificaciones técnicas de material de aporte ^{18, 37}

METAL DE APORTE		DESIGNACIÓN AWS A 5.8		
		BAG 2	BCuP 5	
Composición (NC: el grupo no contiene este elemento dentro de su composición).	Ag	34-36	14.5-15.5	
	Cu	25-27	Restante	
	Zn	19-23	0.0	
	Cd	17-19	NC	
	Ni	0.0	0.0	
	Sn	0.0	0.0	
	Li	0.0	NC	
	Mn	0.0	0.0	
	P	NC	6.8 -7.2	
	Fe	NC	0.0	
	Pb	NC	0.0	
	Al	NC	0.0	
	Si	NC	0.0	
	Otros	0.15	0.15	
Temperatura	Sólido	°C	620	643
		°F	1148	1190
	Líquido	°C	695	802
		°F	1283	1475
	trabajo	°C	640	760
		°F	1184	1400
	Brazing	°C	702-843	704-816
		°F	1295-1550	1300-1500
Resistencia Mecánica	Psi	51000 - 58000	50000	
Diámetro de varilla	(in)	3/32	1/16	
Revestimiento de varilla		Ninguno	Ninguno	
Fundente recomendado		1802 PF Atmosin (paste).	FX 38906	
Fundente utilizado		1801 PF Atmosin (paste)	1801 PF Atmosin (paste)	
Holgura recomendada	(in)	0.001 - 0.005	0.001 - 0.005	
	(mm)	0,1	0,1	
Color		yellow copper	light copper	
Proceso de soldadura		Torch brazing	Torch brazing	
Precaución		contiene Cd necesita ventilación	requiere ventilación	
Metales de aplicación		Aceros en general, Aceros Inoxidables, Bronces y Metales disímiles.	Metales ferrosos, aleaciones de cobre, metales disímiles	

La soldadura fuerte que se realiza con soplete requiere fundente para reducir la cantidad de Óxidos de Cromo presentes en este tipo de aceros.

El fundente es utilizado según el material de aporte seleccionado, tiene forma pastosa o en polvo. Los materiales de aporte a base de Plata utilizan generalmente fundentes denominados blancos ó “White Flux”.¹⁶

Las ventajas del fundente blanco son: remover óxidos, gases presentes en el depósito de soldadura, permitir bajar el punto de fusión de la aleación y lograr una junta resistente, inducir excelente fluidez porque la tensión superficial del metal fundido se reduce, proteger el cordón de la junta contra la oxidación e indicar con su punto de fusión la temperatura a la cual la varilla de aporte debe aplicarse.^{17, 38}

El fundente se activa en un rango de temperaturas entre 570°C – 870°C (1060°F-1600°F) y es necesario tomar precauciones para utilizar este fundente.

El procedimiento recomendado según la mayoría de fabricantes es:

1. Preparar la superficie, remover óxidos, grasa, aceite, etc.
2. Aplicar directamente en la unión o humedecer ligeramente el extremo caliente de la varilla de aporte dentro del fundente y transferir dentro del área de unión.
3. Calentar indirectamente el fundente hasta que se funda y arrastrar con la llama a lo largo de la junta.
4. Dejar enfriar, lavar en agua caliente, luego secar.

Además se debe mantener el frasco que contiene el fundente fuertemente cerrado cuando no se lo use, el proceso de soldadura debe realizarse en lugares ventilados, evitar: inhalar los humos, el contacto con la piel y los ojos.

4.1.2 SELECCIÓN DEL SOPLETE PARA SOLDADURA FUERTE

El método más sencillo para realizar soldadura fuerte es mediante un soplete manual, existe gran variedad de gases combustibles para sopletes manuales tales como: Propano, Butano, Acetileno, Gas Natural, y para generar altas temperaturas son mezclados con aire u oxígeno a presión.

En el acero inoxidable existe el riesgo de precipitación de carburos en el rango de 425 a 800°C⁶ por lo que no conviene utilizar llama oxiacetilénica debido a que la temperatura máxima es 3100 °C.⁴⁰

Las temperaturas que se alcanzan al utilizar mezclas de Butano y Propano son de 1200°C máximo.³⁹

Tabla 4. 3 Especificaciones técnicas de gas para soplete⁴¹

Especificación		Oxígeno	Acetileno	Propano	Butano
Formula química		O ₂	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Densidad	Líquido al punto de ebullición kg/l	1.14	0.42	0.58	-
	Gas kg/m ³	1.36	1.11	1.87	2.6
Densidad relativa, aire = 1		1.11	0.91	1.55	0.9
Capacidad de calor específica	Líquido al punto de ebullición kJ/kg°C	1.69	-	2.23 (-43°C)	-
	Gas kJ/kg	0.92(+15°C)	1.69(25°C)	1.63(+15.6°C)	-
Calor latente de vaporización kJ/kg		213	810	426	385.6
Límites de exposición en aire %		-	2.5-82	2.1-9.5	-
Punto de fusión °C		-223	-81	-188	-138.3
Punto de ebullición °C		-183	-85	-42.1	-0.5
Temperatura crítica °C		-	35.1	94,15	-273,15
Riesgos	Inhalación	-	Vértigo y embotamiento	Somnolencia y pérdida del conocimiento	
	Piel	-	En contacto con líquido: congelación.		
	Ojos	-	En contacto con líquido: congelación.		
Poder calórico (MJ/kg)		-	48.22	46.36	44
Temperaturas alcanzadas en soldadura °C		3100 ⁴⁰		800-1200 ³⁹	

Con estas características se puede encontrar en el mercado sopletes con la mezcla Propano Butano (30-70) regulables por perilla, recargables de 190g (consumo 86g/h) que proporcionan una temperatura máxima de 1200°C con inyector de 0.32 mm.³⁹

En función del tipo de material base y aleación de aporte a usar, la llama del soplete deberá regularse para comportamiento oxidante, neutro, reductor, en el caso de que el material base sea acero inoxidable la llama debe ser reductora observándose en ésta una coloración verde – azul. En una llama oxidante la

combustión es completa, existe exceso de oxígeno y se alcanzan altas temperaturas, mientras que en una llama reductora las temperaturas son menores debido a que existen gases no oxidados.⁴⁰

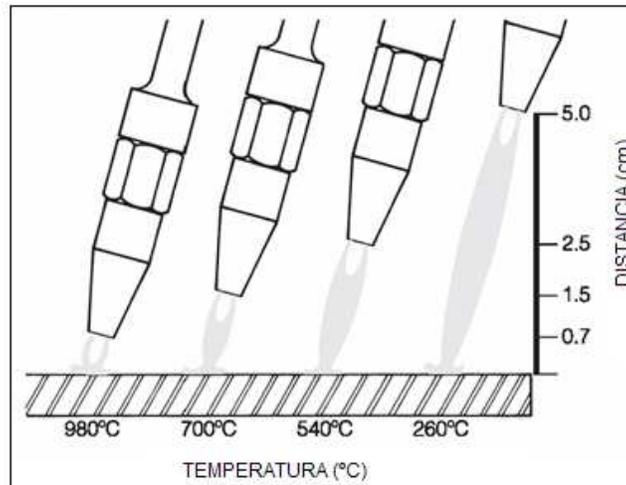


Figura 4. 2 Distancia de boquilla de soplete vs temperatura⁴⁰

Para alcanzar una temperatura promedio de 540°C se recomienda una altura de 2.5 cm aproximadamente como se ve en la figura 4.2 y es importante garantizar que el calor se distribuya de manera uniforme lo que se puede lograr con un movimiento aleatorio del soplete.



Figura 4. 3 Calentamiento de la tubería con soplete

4.1.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA DESARROLLAR POSICIONAMIENTO, ALINEACIÓN Y LIMPIEZA.

La limpieza es un factor importante antes de realizar la unión por soldadura fuerte y la alineación de los tubos garantiza una distribución uniforme del

material de aporte mientras se realiza el proceso. La alineación se realiza insertando en la holgura, alambres de acero inoxidable.



Figura 4. 4 *Alineación de la junta*

Toda impureza debe ser removida de las superficies a unir para facilitar la penetración del material de aporte por capilaridad obteniéndose así una unión limpia. Luego de realizar el proceso de soldadura se puede limpiar la unión con cepillo metálico, limas, lijas o grata.

4.1.4 SOLDADURA

Para realizar la soldadura fuerte de la junta se realiza el siguiente procedimiento:

1. Preparar las probetas: mediante un proceso de limpieza y alineación, se deben evitar ambientes húmedos o con polvo.



Figura 4. 5 *Preparación – Limpieza de la tubería*

2. Realizar precalentamiento uniforme de la junta hasta una temperatura de 200°C aproximadamente. Argenta, Aufhauser, Castolin Eutectic, empresas comercializadoras de materiales de aporte, recomiendan como temperatura de precalentamiento el 25% de temperatura de liquidus, que corresponde a 175°C aproximadamente para BAg2 y 200°C para BCuP5.



Figura 4. 6 *Precalentamiento de la junta*

3. Colocar el fundente alrededor de la junta.



Figura 4. 7 *Colocación del fundente (pasta) en la junta*

4. Calentar la junta hasta que el fundente empiece a fundirse (forma burbujas y su coloración es transparente - brillante).



Figura 4. 8 *Calentamiento del fundente*

5. Calentar conjuntamente la junta y la varilla de aporte hasta que empiece a fundir.
6. Arrastrar el material de aporte fundido alrededor de toda la junta.



Figura 4. 9 *Calentamiento del fundente*

7. Realizar un calentamiento adicional en el cordón de soldadura una vez terminado el proceso para garantizar penetración por capilaridad, cuidando que la temperatura no exceda del rango de precipitación de carburos y no se mantenga en un tiempo excesivo.
8. Enfriar rápidamente la junta en agua.
9. Limpiar los residuos de fundente de la superficie.

Material de aporte	BCuP 5	BCuP 5	BCuP 5	BCuP 5	BAG2	BAG2	BAG2	BAG2	BCuP 5	BCuP 5	BAG 2	
Holgura por lado (mm)	0,5	0,2	0,2	0,5	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,2	
Temp	A	19	19	19	19	16	15	16	16	19	19	15
	Pr	180	170	170	106	150	194	137	170	186	183	204
	S	425	-	-	389	365	-	-	-	253	376	371
	P	475	>500	450	476 - >500	480	316	-	>500	456	451	-
tiempo	Pr	45s	1min 20s	42s	1min 37s	1min 44s	1min 22s	1 min 57s	1min 24s	1min 12s	40s	1min 5s
	S	2min	-	-	1min 52s	2min 16s	-	-	-	3min 10s	2min 30s	-
	P	2min 34s	-	-	49s	3min 4s	-	-	-	-	-	-
	T	5min 47s	5 min	4min 20s	5min 37s	7min 4s	9min 12s	-	6min 40s	5min 40s	4min 20s	7min 6s
observación	I	-	-	II	III	-	IV	-	II	V	-	

A: ambiente, Pr: precalentamiento, S: soldadura, P: postcalentamiento, T: total

Tabla 4. 5 Datos obtenidos del proceso de soldadura en probetas de ensayo hidrostático.

Ensayo	Hidrostático									
Nombre	AA	AB	BB	EE	FF	II	JJ	LL	OO	
Material de aporte	BCuP5	BCuP5	BCuP5	BCuP5	BCuP5	BCuP5	BCuP5	BAG2	BAG2	BAG2
Holgura por lado (mm)	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5
temp	A	19	19	19	19	19	19	15	16	16
	Pr	194	205	130	150	153	200	170	185	182
	S	250	384	170	353	344	270	371	356	500-600
	P	497	450	513	-	480	460	200	160	490-500
tiempo	Pr	1min 1s	-	1min 1s	1min 20s	1min 28s	30s	1min 45s	1min 40s	1min 35s
	S	2min	-	1min	3min	3min 7s	2min 6s	4min	1min 50s	3min
	P		-	-	1min 50s	-	-	1min 12s	1min 30s	-
	T	5min 4s	-	4min 21s	6min 30s	5min 47s	4min 7s	7min 36s	5min 40s	5min 20s
Observación: Empieza a soldar a:	3min 10s	-	3min 20s	2min 10s	2min 40s	2min 1s	2min 24s	2min 20s	2min 20s	

A: ambiente, Pr: precalentamiento, S: soldadura, P: postcalentamiento, T: total

Tabla 4. 6 Datos obtenidos del proceso de soldadura en probetas de Doblado.

Ensayo	Doblado					
Nombre	B	P	R	T	Q	S

Material de aporte		BCuP5	BCuP5	BCuP5	BCuP5	BAG2	BAG2
Holgura por lado (mm)		0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	0,5
temp	Ambiente	16	18	18	19	18	18
	Pre calentamiento	190	195	210	200	193	194
	Soldadura	398	331		235-400	288	380
	Postsoldadura	-		335	451	395	
tiempo	Pre calentamiento	-	57s	51s	1min30s	1min	1min34s
	Soldadura	-	3min23s	1min	2min24s	1min52s	2min27s
	Postsoldadura			1min	1min 30s	1min33s	3min 5s
	Total	5 min	-	5min26s	6min24s	6min43s	9min 27s
Observación		I	-	II	III	IV	V

Los siguientes puntos de la Tabla 4.6 detallan el proceso de soldadura para la preparación de las probetas de doblado:

I: Se despegó la superficie al intentar cortar el tubo.

II: Un lado sirve para ensayo doblado, a los 4min27s termina el proceso.

III: Empieza la soldadura a los 2min 30s, el fundente se colocó en 1 min.

IV: A los 5min10s se termina el proceso de soldadura.

V: A los 3min55s se derrite la gota de material de aporte, desde el tiempo de pre calentamiento hasta este suceso, se coloca el fundente.

Tabla 4.7 Datos obtenidos del proceso de soldadura en probetas de Macrografía.

Ensayo	Macrografía											
	A	C	G	H	L	N	O	E	F	I	K	M
Material de aporte	BCuP 5	BCuP 5	BCuP 5	BCuP 5	BCuP 5	BCuP 5	BCuP 5	BAG 2	BAG 2	BAG 2	BAG 2	BAG 2
Holgura por lado (mm)	0,5	0,5	0,2	0,2	-	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,5
Temp	A	16	16	16	16	18	19	19	16	16	17	18
	Pr	100		170	103	180	184	140	260	138	180	144
	S	200	230	316	323	-	437	460	315	450	474	318
	P	-	-	-	382	-	-	362	-	-	277	433
tiempo	Pr	-	-	1min 12s	-	-	1min	1min 39s	-	-	2min	1min 40s
	S	-	-	-	-	-	1min 27s	2min 35s	-	-	2min 16s	1min 20s
	P	-	-	-	-	-	28s	1min 10s	-	-	36 s	1min 6s
	T	6 min		3min 40s	-	5 min	4min 5s	5min 24s	-	-	4min 52s	4min
Observación	I	-	-	-	-	II	-	-	-	-	III	IV

A: ambiente, Pr: pre calentamiento, S: soldadura, P: post calentamiento, T: total

El procedimiento de soldadura empleado en la preparación de las probetas de macrografía, se puede observar en los siguientes puntos de la Tabla 4.7:

I: No fluye fácilmente el material de aporte, la temperatura con el soplete fue muy baja.

II: El proceso de soldadura dura 1min 20s.

III: Enfriamiento en agua 1min 30s llegando a 19°C.

IV: A los 5 min 36s se termina el proceso de soldadura, el pirómetro marca 79°C en el cordón y en la tubería marca 170°C.

Desde la Figura 4.11 a la 4.22 se grafican las temperaturas y tiempos de precalentamiento, soldadura y postsoldadura para todas las probetas con material de aporte BCuP5 y BAg2, el objetivo es determinar un dato promedio de las condiciones de procedimiento de soldadura.

Temperatura promedio de precalentamiento (BCuP-5): 168°C.

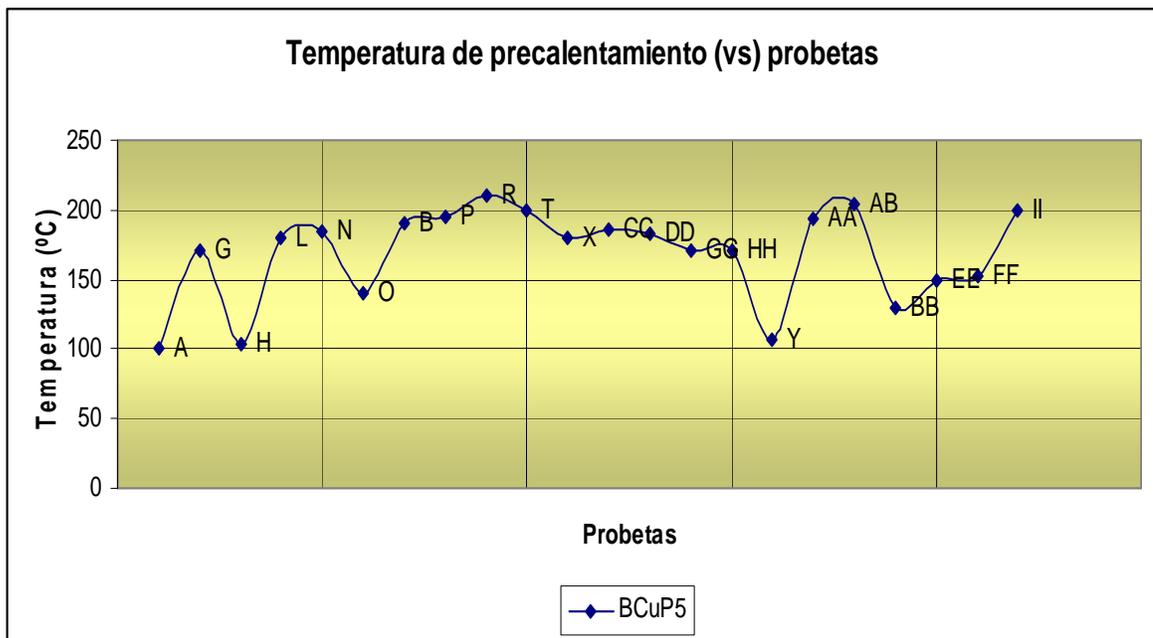


Figura 4. 11 *Temperatura de Precalentamiento (material BCuP5)*

Temperatura promedio de precalentamiento (BAg-2): 180°C

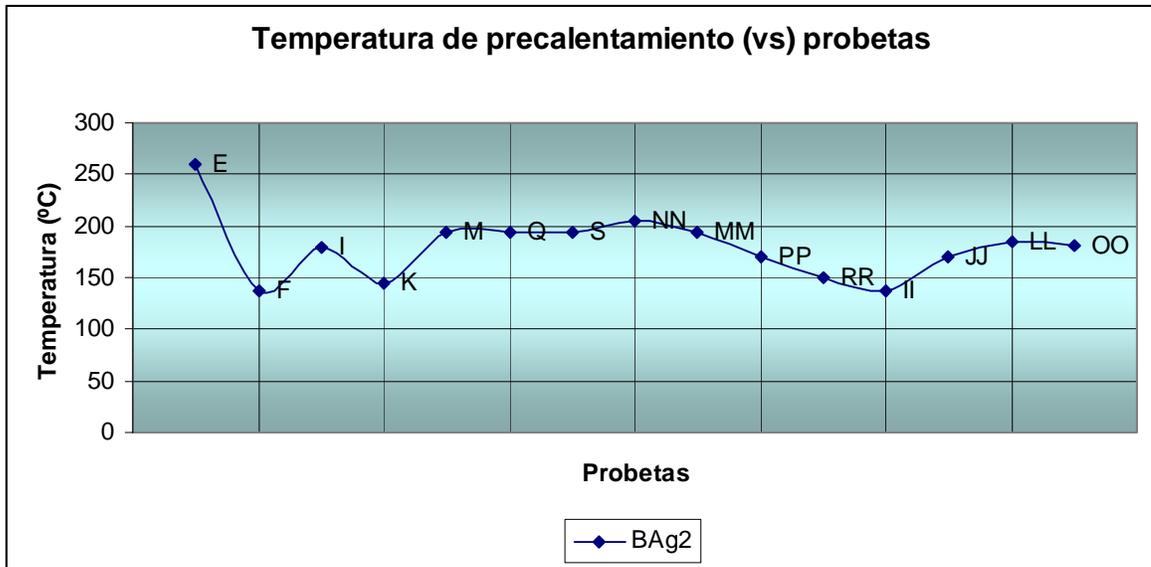


Figura 4. 12 *Temperatura de Precalentamiento (material BAg2)*

Tiempo promedio de precalentamiento (BCuP-5): 66 segundos

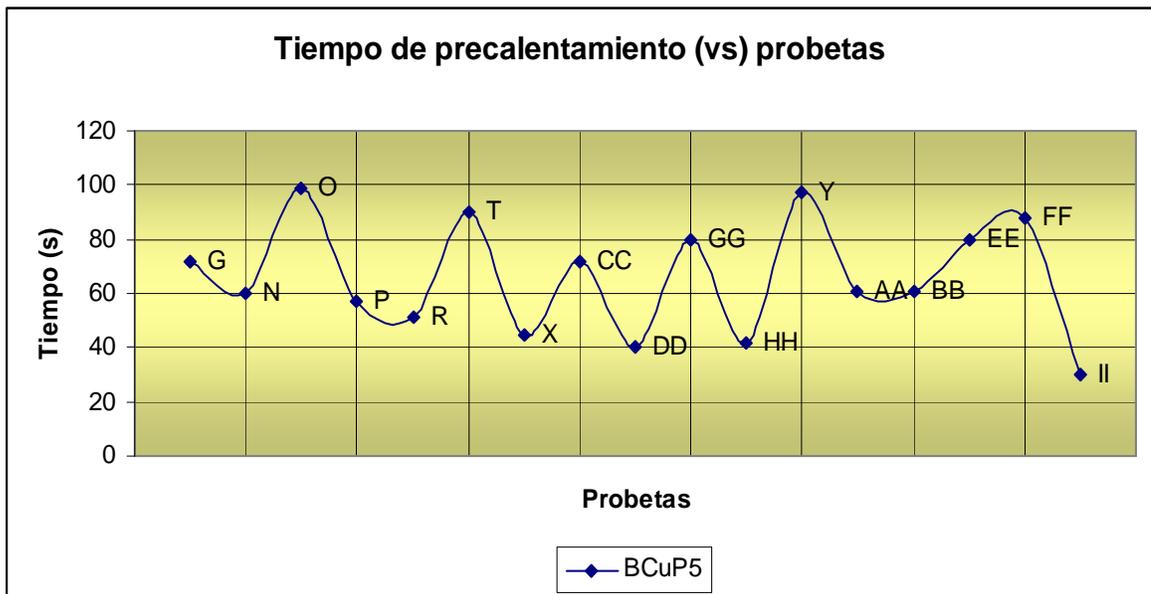


Figura 4. 13 *Tiempo de Precalentamiento (material BCuP5)*

Tiempo promedio de precalentamiento (BAg-2): 87 segundos.

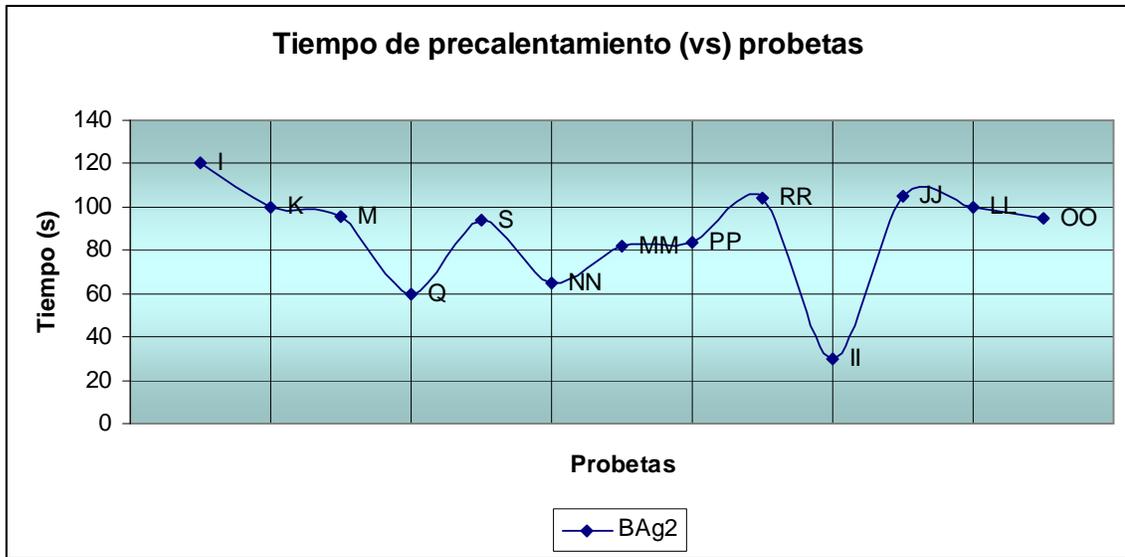


Figura 4. 14 *Tiempo de Pre calentamiento (material BAg2)*

Temperatura promedio de soldadura (BCuP-5): 332°C

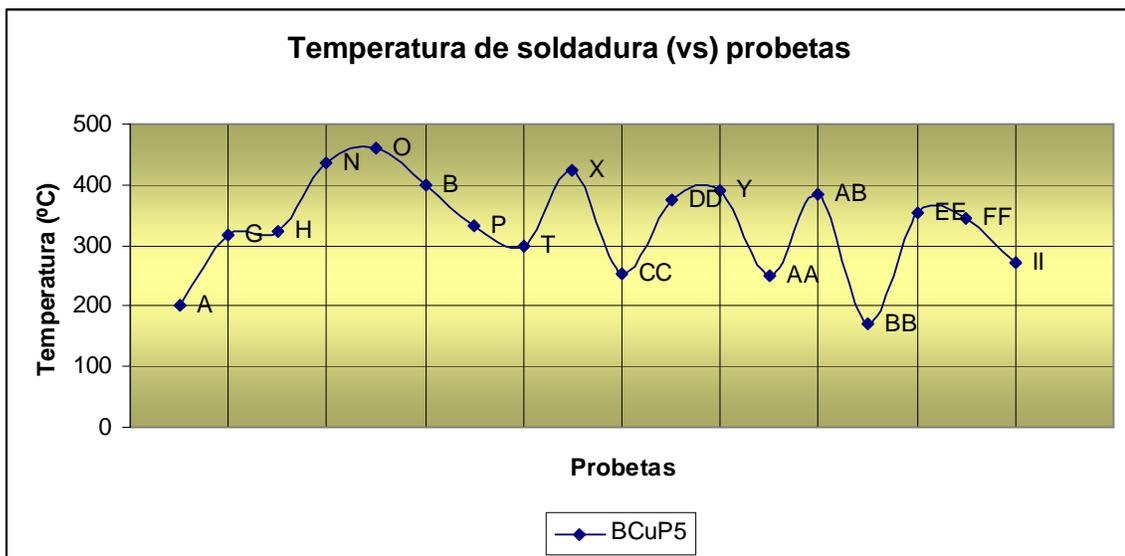


Figura 4. 15 *Temperatura de Soldadura (material BCuP5)*

Temperatura promedio de soldadura (BAg-2): 367°C

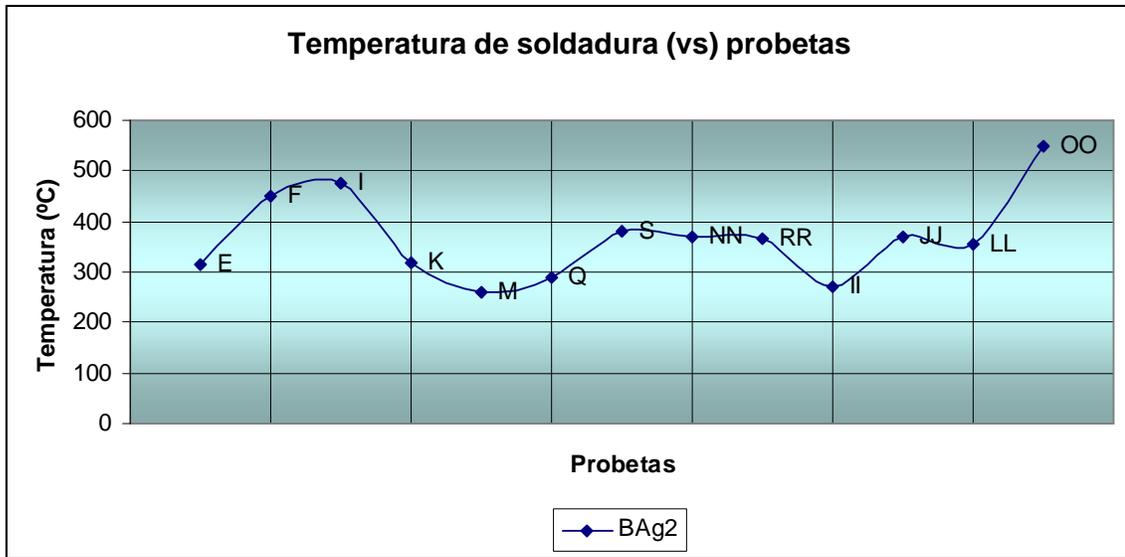


Figura 4. 16 *Temperatura de Soldadura (material BAg2)*

Tiempo promedio de soldadura (BCuP-5): 130 segundos

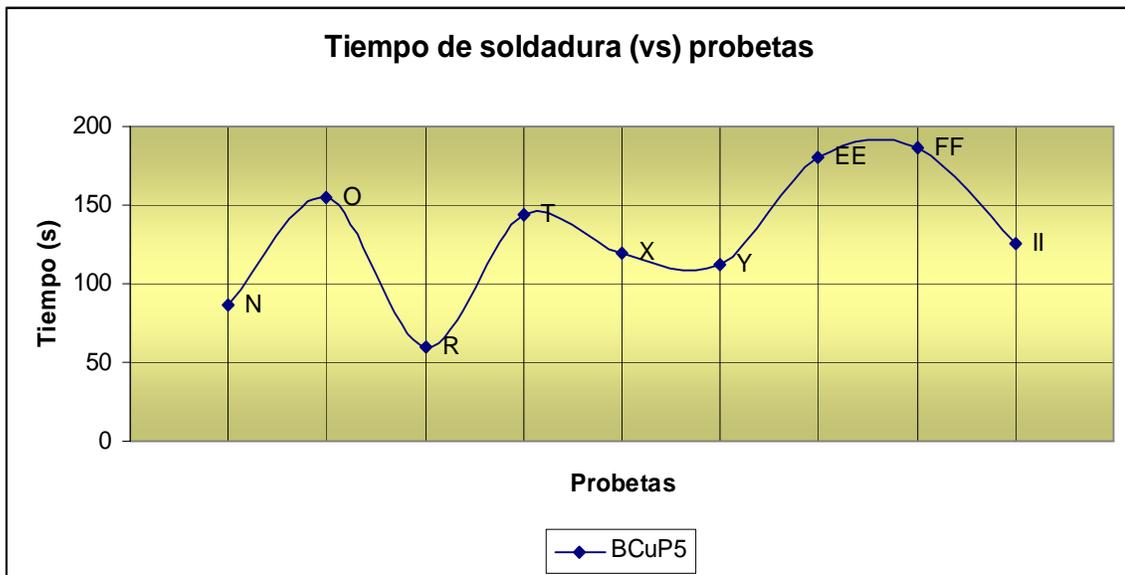


Figura 4. 17 *Temperatura de Soldadura (material BCuP5)*

Tiempo promedio de soldadura (BAg2): 144 segundos

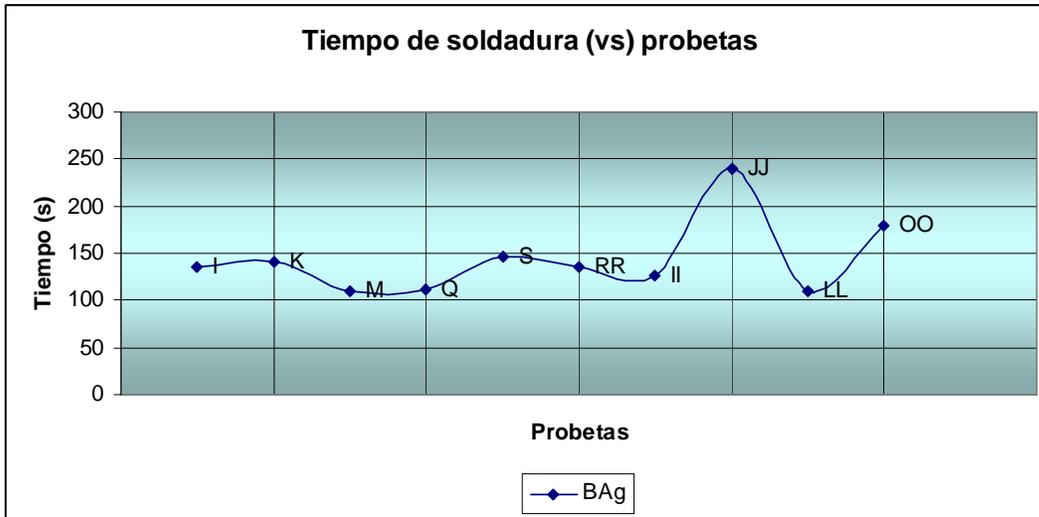


Figura 4. 18 *Tiempo de Soldadura (material BAg2)*

Temperatura promedio de postcalentamiento (BCuP-5): 450°C

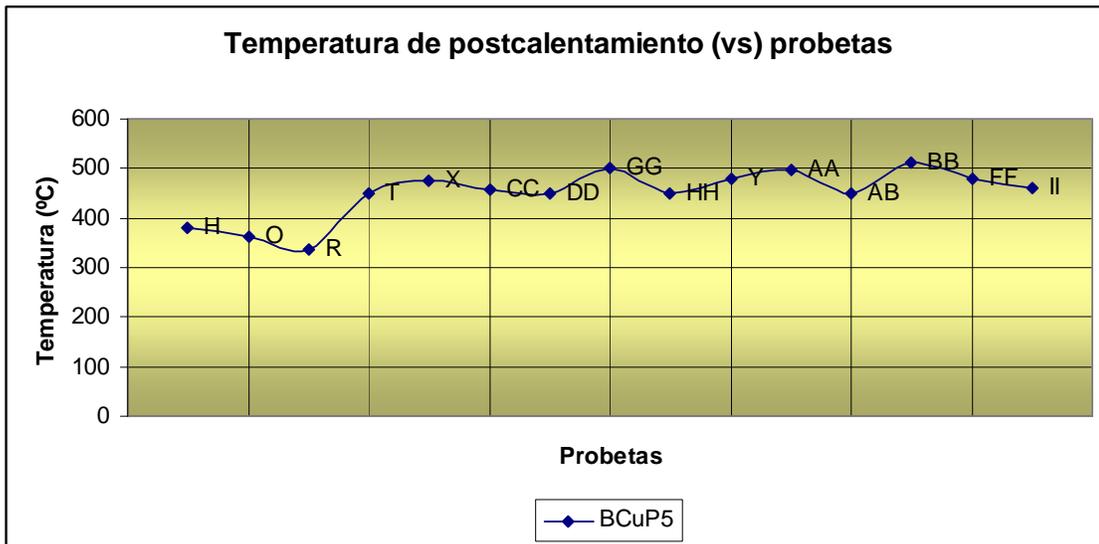


Figura 4. 19 *Temperatura de Postcalentamiento (material BCuP5)*

Temperatura promedio de postcalentamiento (BAg2): 354°C

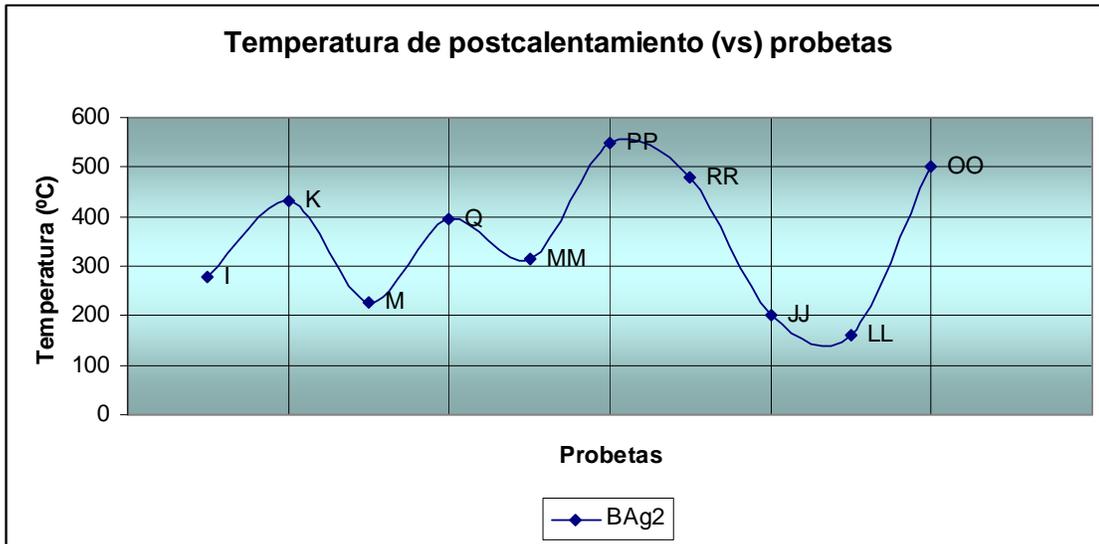


Figura 4. 20 *Temperatura de Postcalentamiento (material BAg2)*

Tiempo promedio de postcalentamiento (BCuP-5): 96 segundos

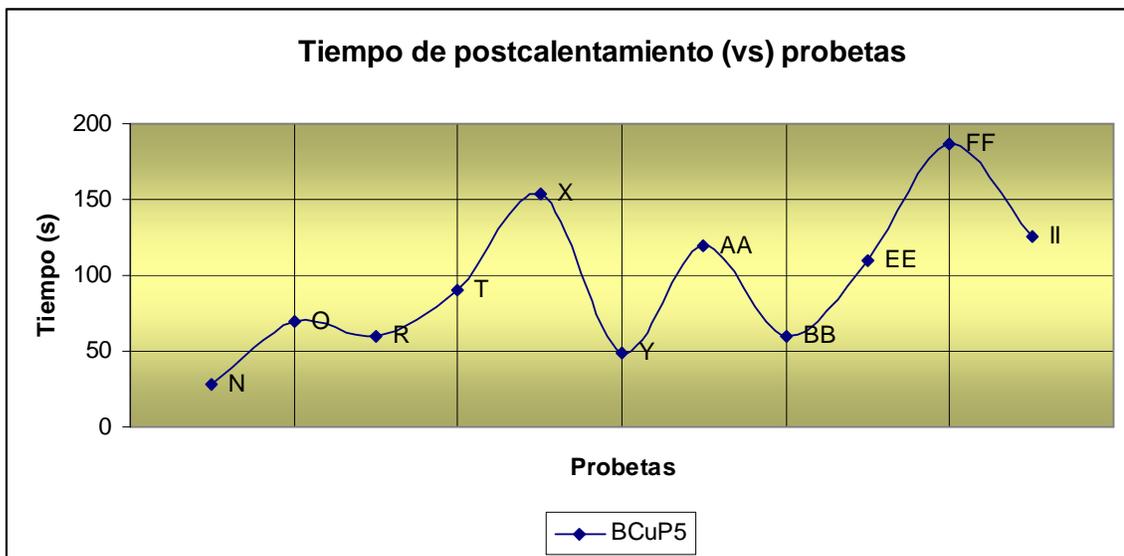


Figura 4. 21 *Tiempo de Postcalentamiento (material BCuP5)*

Tiempo promedio de postcalentamiento (BAg2): 115 segundos

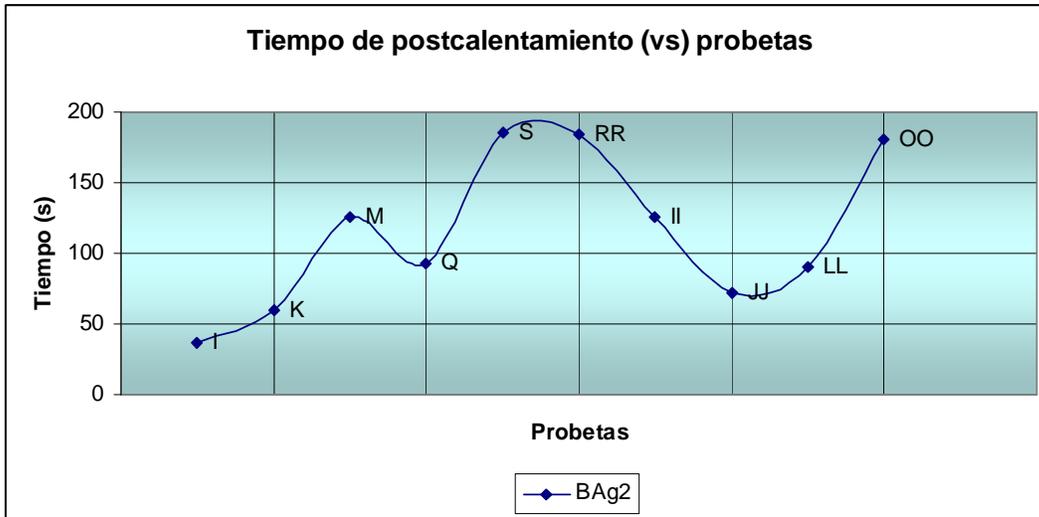


Figura 4. 22 *Tiempo de Postcalentamiento (material BAg2)*

Se recuerda que es de vital importancia asegurar una ventilación adecuada. El material BAg2 contiene Cadmio y al calentarse durante la aplicación puede producir humos tóxicos.

La Tabla 4.8 resume los promedios de temperaturas y tiempos del proceso de soldadura realizado.

Tabla 4. 8 *Tiempos y temperaturas promedio del proceso de soldadura fuerte.*

Promedio		MATERIAL DE APORTE	
		BCuP5	BAg2
Temperatura	Pre calentamiento (°C)	168	180
	Soldadura (°C)	332	367
	Post calentamiento (°C)	450	354
Tiempo	Pre calentamiento (s)	66	87
	Soldadura (s)	130	144
	Post calentamiento (s)	96	115

Se pueden generalizar los resultados del procedimiento manual de soldadura fuerte con soplete, aplicado a tubería de acero inoxidable AISI 304, para establecer una Especificación del Proceso de Soldadura (WPS).

Los materiales de aporte que se utilizan para realizar estas hojas de registro son en base de Plata y en base de Cobre.

4.1.5 ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

WPS ³³ ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Nombre de Compañía: TESIS - EPN - SALV N°: 01 Según Norma: ASME IX			N° Identificación: EPN 001 Fecha: Abril/2009 REALIZADO POR: Lizeth Villena Steve Almeida Organización: EPN				
I. JUNTA UTILIZADA Tipo: Traslapada Simple: <input checked="" type="checkbox"/> Doble: <input type="checkbox"/> Distancia de Traslape: 12.7 mm Separación: 0.2 mm por lado			II. TÉCNICA DE SOLDADURA Proceso de Soldadura: Brazing (Fuerte) Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos Lados <input type="checkbox"/> Limpieza: Antes de soldar <input checked="" type="checkbox"/> Después de soldar <input checked="" type="checkbox"/> Método: Lija, grata, cepillo metálico				
III. METAL BASE Especificación: AISI SAE 304 Espesor: 0.8 mm Diámetro externo: 15.88 mm			V. POSICIÓN DE SOLDADURA: Posición de Soldadura: 2 F Progresión: Arrastre Técnica: 1 pase <input checked="" type="checkbox"/> Varios Pases <input type="checkbox"/>				
IV. METAL DE APORTE Diámetro: 3/32 in (2.4 mm) Especificación: SFA- AWS A5.8 Denominación: AWS BAg 2 Marca Comercial: Castolin Eutectic Denominación Comercial: 1700			VII. MÉTODO DE CALENTAMIENTO Boquilla de soplete: 0.32mm Gas: Propano(30) Butano(70) Tipo de llama: Reductora				
VI. PROTECCIÓN Fundente <input checked="" type="checkbox"/> Gas <input type="checkbox"/> Denominación Comercial: Flux 1801			VIII. PRECALENTAMIENTO Temperatura: 180 °C Tiempo: 1 minuto 30 segundos			IX. SOLDADURA Temperatura: 370 °C Tiempo: 2 minutos	X. TRATAMIENTO POSTSOLDADURA Temperatura: 360 °C Tiempo: 2 minutos
N° pase	Metal de Aporte		Fundente	Velocidad de Avance	Técnica de Soldadura		
	Clase	Diámetro			Oscilado	Recto	
1	BAg 2	3/32 in	Flux 1801	25 mm / min		x	

Figura 4. 23 Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para material de aporte BAg2

WPS ³³ ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						
Nombre de Compañía: TESIS - EPN - SALV N°: 02 Según Norma: ASME IX			N° IDENTIFICACIÓN: EPN 002 FECHA: REALIZADO POR: Lizeth Villena Steve Almeida ORGANIZACIÓN: EPN			
I JUNTA UTILIZADA Tipo: Traslapada Simple: <input checked="" type="checkbox"/> Doble: <input type="checkbox"/> Distancia de Traslape: 12.7 mm Separación: 0.2 mm por lado			II TÉCNICA DE SOLDADURA Proceso de Soldadura: Brazing (Fuerte) Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos Lados <input type="checkbox"/> Limpieza: Antes de soldar <input checked="" type="checkbox"/> Después de soldar <input checked="" type="checkbox"/> Método: Lija, grata, cepillo metálico			
III METAL BASE Especificación: AISI SAE 304 Espesor: 0.8 mm Diámetro externo: 15.88 mm						
IV METAL DE APORTE Diámetro: 1/16 in (1.6 mm) Especificación: SFA- AWS A5.8 Denominación: AWS BCuP 5 Marca Comercial: Castolin Eutectic Denominación Comercial: 1801			V POSICIÓN DE SOLDADURA: Posición de Soldadura: 2 F Progresión: Arrastre Técnica: 1 pase <input checked="" type="checkbox"/> Varios Pases <input type="checkbox"/>			
VI PROTECCIÓN Fundente <input checked="" type="checkbox"/> Gas <input type="checkbox"/> Denominación Comercial: Flux 1801			VII MÉTODO DE CALENTAMIENTO Boquilla de soplete: 0.32 mm Gas: Propano(30) Butano(70) Tipo de llama: Reductora			
VIII PRECALENTAMIENTO Temperatura: 170°C Tiempo: 1 min		IX SOLDADURA Temperatura: 330°C Tiempo: 2 min		X TRATAMIENTO POSTSOLDADURA Temperatura: 450 °C Tiempo: 1 min 30 seg		
N° pase	Metal de Aporte		Fundente	Velocidad de Avance	Técnica de Soldadura	
	Clase	Diámetro			Oscilado	Recto
1	BCuP 5	1/16.	Flux 1801	25 mm / min		X

Figura 4. 24 Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para material de aporte BCuP 5

4.2 ENSAYOS DE LAS PROBETAS

Los ensayos que se van a realizar son:

- Tracción: Para obtener información de la resistencia mecánica de la unión.
- Doblado: Para observar el ángulo de despegue de los metales base.
- Hidrostática: Para determinar si la unión no tiene defectos que dejen fugar el fluido.
- Macrografía – Metalografía : Para determinar defectos, discontinuidades, tamaño de grano, intercara de soldadura y precipitación de carburos.

El número de probetas para cada ensayo se indican en la tabla a continuación:

Tabla 4. 9 Probetas para Ensayos

PRUEBA O INSPECCIÓN	Nº DE CUPONES	DIMENSION MÍNIMA (mm)	HOLGURA POR LADO (mm)	MATERIAL DE APORTE
Tracción	8	450	0.5 y 0.2	B _{Ag} 2 y B _{CuP} 5
Doblado	12	200	0.5 y 0.2	B _{Ag} 2 y B _{CuP} 5
Hidrostática	8	400	0.5 y 0.2	B _{Ag} 2 y B _{CuP} 5
Macrografía	16	80	0.5 y 0.2	B _{Ag} 2 y B _{CuP} 5
Metalografía	2	80	0.2	B _{Ag} 2 y B _{CuP} 5

4.2.1 ENSAYO DE TRACCIÓN ⁴²

El ensayo de tracción, es un ensayo en el cual la probeta preparada se somete a cargas mono axiales crecientes de manera gradual hasta obtener la falla.

Para obtener una distribución uniforme del esfuerzo directo sobre secciones críticas se necesita fidelidad de la probeta, efectividad de dispositivos de sujeción y acción de la máquina de ensayo. ⁴²

Este ensayo es el más simple de los ensayos mecánicos, implica normalización de la probeta con respecto a tamaño, forma, preparación y procedimientos.

La forma de los extremos debe ser adecuada y tal que ajuste debidamente en el dispositivo de sujeción a emplear, los extremos simples deben ser suficientemente largos para adaptarse a las mordazas.

Los tubos de diámetro nominal menor a 25,4 mm (1 pulgada) se ensayan a pleno diámetro, se insertan tapones metálicos o de madera apretados en los extremos hasta una profundidad suficiente para permitir que los sujetadores abracen la probeta, sin causar colapso del tubo.⁴²

La función del dispositivo de montaje es transmitir la carga desde los puentes de la máquina hasta la probeta.

El requerimiento esencial del dispositivo de montaje es que la carga se transmita axialmente, esto implica que los centros de acción de las mordazas estén alineadas al principio y durante el progreso del ensayo y que no se introduzca flexión o torsión por falla de la acción de las mordazas, además el dispositivo debe estar adecuadamente diseñado para soportar las cargas y no tiene que aflojarse durante el ensayo.



Figura 4. 25 *Mordazas de sujeción y varilla corrugada insertada en las probetas*

La máquina universal debe asegurar la aplicación axial de los esfuerzos en la probeta, además de permitir la aplicación de cargas de manera progresiva, sin choques ni vibraciones, y también tener dispositivos de regulación y comando que permitan ejecutar el ensayo.

4.2.1.1 Normas para Ensayo de Tracción

La norma ASTM designación E8-83 cubre las pruebas de tracción de materiales metálicos, en esta norma se obtiene información de tracción de tubos.

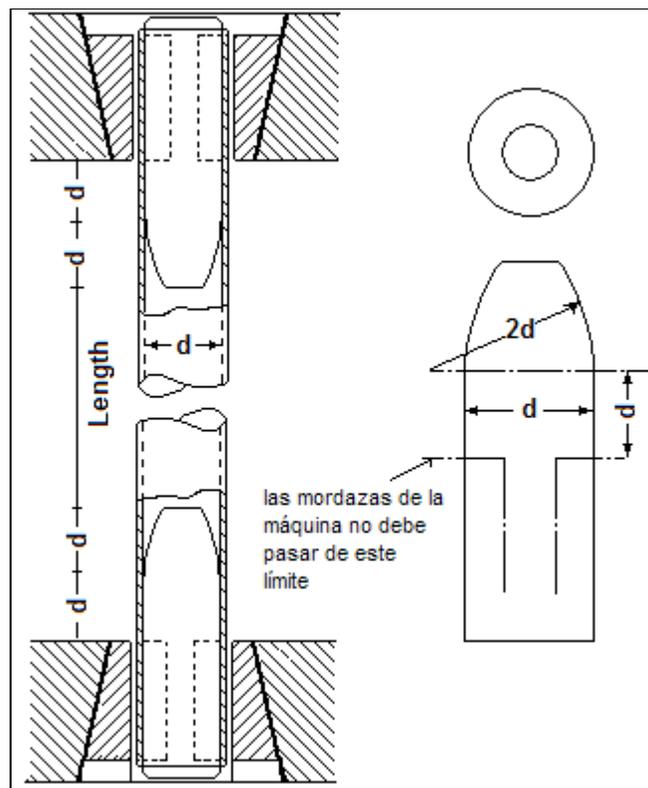


Figura 4. 26 Tapones metálicos para realizar el ensayo de tracción y sujeción en la máquina. ⁴³

En el código ASME Sección IX (QB-462.1(e)) se tiene información de pruebas de tracción de secciones de tubo de diámetros pequeños unidos a tope o traslapados. Básicamente el principio en las dos normas es el mismo, el éxito del ensayo de tracción depende de la sujeción de los extremos del tubo en la máquina. Para ensayar el tubo de acero inoxidable se insertan en este caso segmentos de varilla corrugada de acero de construcción en los extremos del tubo y así se sujetará en las mordazas.

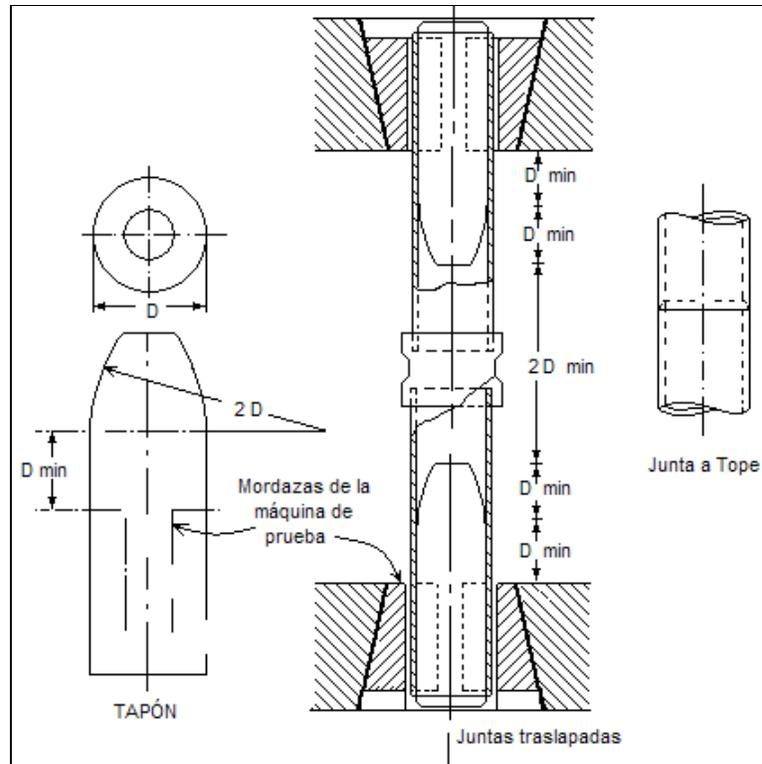


Figura 4. 27 *Ensayo de tracción – secciones a tope o traslape – diámetros pequeños, QB-462.1(e).*³³

4.2.1.2 Dimensiones de las Pobetas para Ensayo de Tracción.

Para la realización del ensayo se ocupa la norma para tracción de tubo continuo (ASTM E8), la sujeción puede se puede realizar con cilindros metálicos correspondientes al diámetro interno del tubo, por facilidad se utilizarán segmentos de varilla corrugada para construcción de $\frac{1}{2}$ pulgada, éstos sufrirán deformación por compresión pero no altera en los resultados del comportamiento de resistencia de la soldadura.

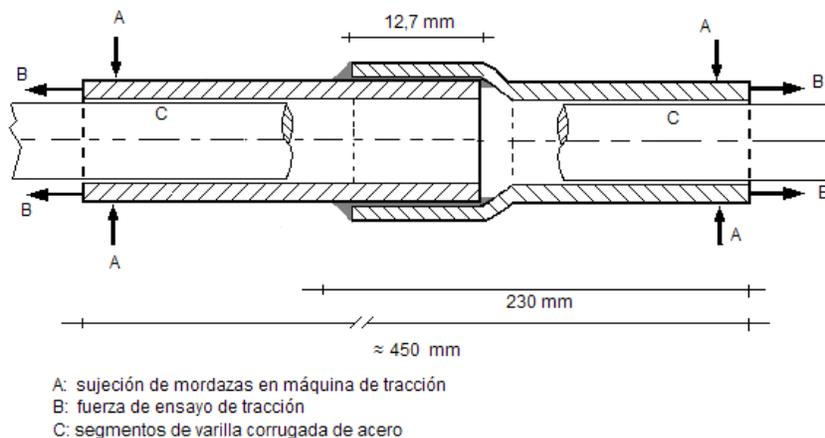


Figura 4. 28 *Probeta para ensayo de Tracción*

4.2.1.3 Aplicación de Ensayo de Tracción.

El ensayo de tracción se aplicó a probetas en las que se realizó el proceso de soldadura fuerte con dos materiales de aporte BAg-2 y BCuP-5 y dos holguras distintas, el color rosado distingue a las probetas con 0,5 mm de holgura por lado y el color tomate identifica a las probetas con 0,2mm de holgura por lado.



Figura 4. 29 Cupones para ensayo de Tracción

El ensayo de tracción se realizó con la escala media (0 – 30 000 psi) de la máquina universal del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de La Facultad de Ingeniería Mecánica (EPN).



Figura 4. 30 Máquina Universal y sujeción de probetas

Para garantizar que las probetas están bien sujetas por las mordazas es necesario ajustar manualmente mientras la máquina empieza a suministrar carga, luego ésta se transmite a las mordazas que ajustan a las probetas.



Figura 4. 31 *Sujeción de probetas - Registro de carga máxima*

La sujeción de las probetas no fue un problema en la realización del ensayo lo que garantiza que la carga es transmitida prácticamente sin pérdidas en la tubería.



Figura 4. 32 *Secuencia del Ensayo de Tracción*

4.2.2 ENSAYO DE DOBLADO

El ensayo de doblado tiene por objetivo ver el ángulo de despegue de la unión realizada por soldadura fuerte, al ejercer presión sobre la probeta y obligarla a tomar la forma del jig de doblado. Las discontinuidades que se observan en este ensayo son concentradores de esfuerzos que terminan separando la unión. El código ASME Sección IX sirve de base para realizar el ensayo de doblado de la soldadura fuerte aplicada a los tubos de acero inoxidable de tres maneras distintas, a continuación se presentan dos de ellas.

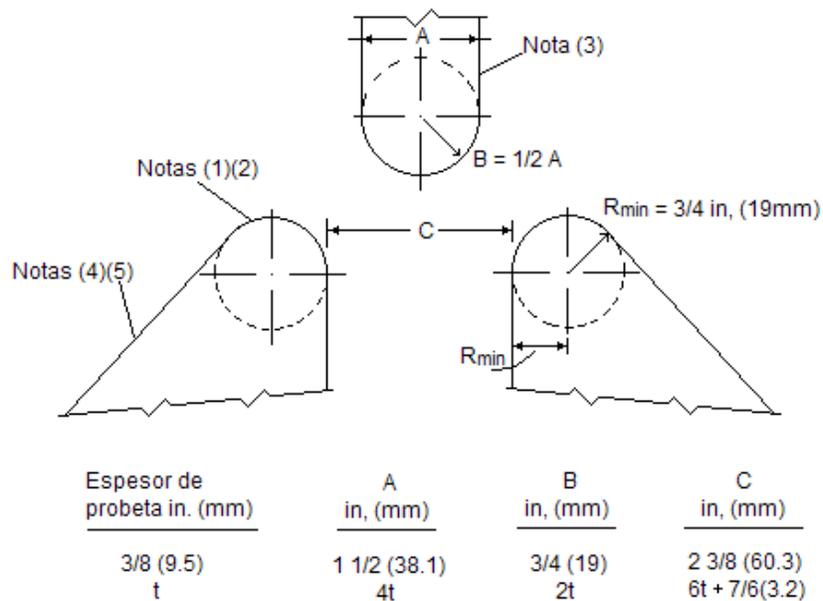


Figura 4.33 Ensayo de Doblado con Jig de rodillos según QB-466.2³³

De la Figura 4.33: Nota General QB-466.2: En caso de tener curvatura transversa en la junta, esta debe encontrarse completamente dentro de la porción de la curvatura del espécimen después del ensayo.³³

³³Notas QB- 466.2:

- (1) Se debe librar cualquier endurecido de los hombros o los rodillos para que giren sin problema al realizar el ensayo.
- (2) Los hombros de los rodillos deben tener una distancia mínima a la superficie de 2 pulgadas (51 mm) para la colocación de la probeta. Los rodillos serán lo suficientemente altos (distancia entre los rodillos y el jig) para que las probetas se deformen en los mismos cuando el jig está en la posición baja.
- (3) El jig se encajará con una base apropiada y se debe comprobar su sujeción a la máquina de ensayo, además debe ser suficientemente rígido para prevenir desviación y desalineamiento mientras se ensaya. El jig no debe tener dimensiones menores de las indicadas en la columna A (figura 4.33).

- (4) Si se desea, pueden hacerse los rodillos o los apoyos del rodillo ajustables en dirección horizontal para que puedan ensayarse probetas de distintos espesores en el mismo jig.
- (5) Los apoyos del rodillo se encajarán con una base diseñada apropiadamente para salvaguardar contra desviación o desalineamiento y debe estar provisto con los medios para mantener los rodillos centrados el punto medio y alineados con respecto al jig.

Otra manera sencilla de realizar el ensayo de doblado es sujetando un extremo de la probeta y con ayuda de un rodillo doblarla alrededor de otro rodillo cuyas dimensiones se especifican en el artículo QB- 466.3.

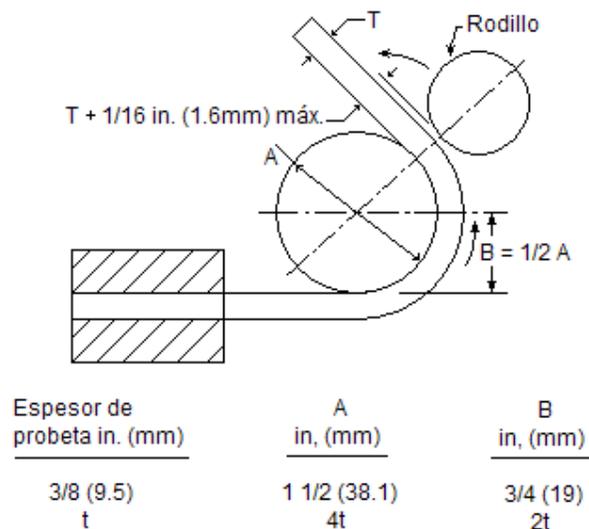


Figura 4. 34 *Ensayo de Doblado envolviendo alrededor del Jig según QB-466.3*³³

De la figura 4.34: Notas generales QB – 466.3³³

- (a) Las dimensiones no mostradas quedan a criterio del diseñador. La consideración esencial es tener la rigidez adecuada para que las partes del jig no salten.
- (b) La probeta se sujetará firmemente en un extremo para evitar que resbale durante el funcionamiento del doblado.
- (c) La probeta se quitará del jig cuando el rodillo exterior ha sido alejado 180° del punto inicial.

4.2.2.1 Dimensiones de las Probetas para Ensayo de Doblado.

Para realizar el ensayo de doblado nos basamos en el código ASME Sección IX, artículo QB-466.2, de ensayo de doblado con jig de rodillos, del cual obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 4. 10 Dimensiones de la Máquina para Ensayo de Doblado

Espesor de probeta		A (Diámetro de Jig)		B (Diámetro de rodillos)		C (Separación de rodillos)	
t		4t		2t		6t+3.2	
in	mm	in	mm	in	mm	in	mm
0,03	0,8	0,13	3,2	0,06	1,6	0,31	8
0,03	0,8	0,39	10	0,20	5	0,72	18,2
0,03	0,8	0,39	10	>0,75	>19	>0,72	>18,2

Según la Tabla 4.10, las dimensiones del jig y rodillos están determinados en base al espesor que se va a ensayar. El valor mínimo del diámetro del jig es de 3,2mm (0,13 in) y el ensayo se va a realizar como se indica a continuación:

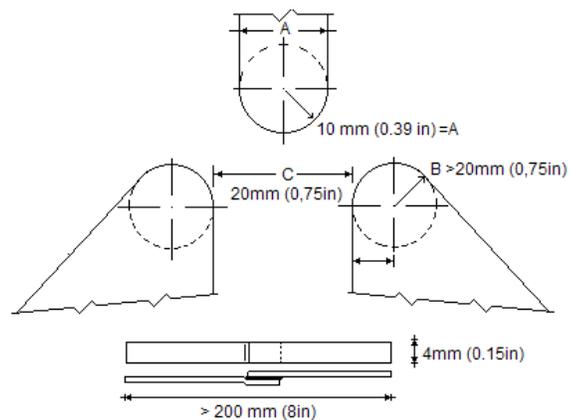


Figura 4. 35 Dimensiones de la máquina y probeta para ensayo de Doblado

4.2.2.2 Realización de Ensayo de Doblado

De acuerdo con lo recomendado por el artículo QB-466.2 se determinaron las dimensiones que se indican en la figura 4.35 y se construyó un dispositivo que permita realizar el ensayo. De igual manera se preparó las probetas cortando longitudinalmente a dos tubos.

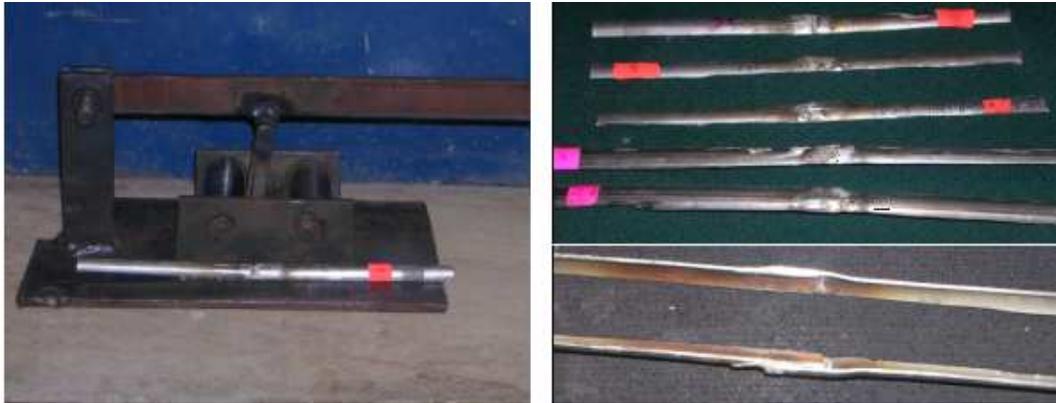


Figura 4. 36 *Máquina y probetas para ensayo de doblado*

Las probetas se cortaron con disco de corte, cabe mencionar que algunos tubos en los que se realizó la soldadura con material BCuP-5 se despegaron debido a las vibraciones que produce la herramienta de corte.



Figura 4. 37 *Secuencia del ensayo de doblado*

4.2.3 PRUEBA DE HERMETICIDAD

Estas pruebas sirven para determinar la hermeticidad de la unión realizada con soldadura fuerte. Se puede usar aire o gas no tóxico a baja presión.

Para determinar si existen fugas se pueden realizar los siguientes procedimientos:

- Sumergir el recipiente a presión en agua y observar si se producen burbujas.

- Presurizar el ensamble y cerrar el recipiente, determinando en un rango de tiempo si disminuye la presión interna.
- Aplicar una solución jabonosa y presurizar el ensamble, observando si se produce burbujeo.

Otro método para determinar la hermeticidad de las juntas es mediante prueba hidrostática en la cual se aplica presión y se observa si hay fugas del fluido en la unión.

Las condiciones de presión hidrostática dependen no solo de la resistencia del accesorio (en este caso el acero inoxidable) sino de la composición de la unión o soldadura.²²

4.2.3.1 Normas Aplicables para Ensayo de Presión Hidrostática

El ensayo de presión hidrostática se realiza determinando el fluido de prueba, la presión y tiempo al cual se va a ensayar.

Existen normas mediante las cuales se puede establecer los valores de estos parámetros, además se debe tomar en cuenta que los alcances de las mismas correspondan a las condiciones de nuestra investigación que son:

- Establecer una junta que cumpla con las normas de instalaciones de tubería para conducción de fluidos de presión como agua potable o gas licuado de petróleo.
- Establecer una junta de traslape en tubería de acero inoxidable austenítico AISI / SAE 304 de ½ pulgada y 0.8 mm de espesor.

La tubería que se va a ensayar es fabricada mediante costura por el método TIG y cumple la norma ASTM A 544. La materia prima de la tubería es acero inoxidable AISI 304 según ASTM A 240.

Los rendimientos de la tubería se establecen mediante las especificaciones técnicas del fabricante, según las cuales la presión de servicio (presión a la cual se suministra el fluido de trabajo y cuando el sistema se encuentra en funcionamiento) en condiciones críticas es 250 psi²⁶. Estas especificaciones

muestran 2 276 psi (160 kg/cm²), como presión de prueba a la que revienta la tubería de ½ in (13mm) de diámetro.

El código ASME sección B31.9 establece las condiciones para el diseño, materiales, fabricación, instalación, inspección, y prueba de sistemas de tubería para servicio industrial, institucional, comercial, multifamiliares y de edificios públicos. La norma cubre materiales para esta tubería como aceros al carbono sin y con costura, tubería de hierro dúctil, acero inoxidable, cobre y otros.

Según el artículo 937.3.1 de esta norma se puede usar como medio de prueba de hermeticidad: agua a temperatura ambiente o cualquier otro líquido que sea seguro para los operadores y además compatible con la tubería que va a ser probada. La presión de prueba hidrostática está definida por el artículo 937.3.4. Todo punto en el sistema de tubería instalada a ser probado debe estar sometido a una presión mínima de 1.5 veces la presión de diseño (presión igual o mayor que la máxima presión de trabajo usada para determinar el mínimo espesor permisible de pared). La presión de prueba en la tubería no debe exceder la máxima presión para cualquier recipiente, bomba, válvula u otro componente incluido en el sistema de tubería. El esfuerzo ocasionado por la presión en el fondo de las tuberías verticales no debe exceder el 90% del mínimo esfuerzo de fluencia.⁴⁴

Según 937.3.5, el tiempo de aplicación de la presión de prueba hidrostática debe ser de al menos 10 minutos para revisar si existen fugas en la tubería, junta o conexión. Si aparecen fugas, estas deben ser eliminadas por reparación, impermeabilización o reemplazo hasta que no exista fuga alguna en el sistema. Según esta condición de prueba hidrostática se concluye que no puede haber restricción de longitud para un elemento del sistema de tubería sobre el que se realizará la mencionada prueba.⁴⁴

Se puede realizar una prueba preliminar al fluido de trabajo, usando aire a presiones menores a 10 psig según 937.4.4. La prueba de servicio inicial consiste en probar el sistema de tubería con el fluido de trabajo. Esto se realiza después de realizar la prueba hidrostática.⁴⁴

La presión utilizada para gases, vapor y condensados no debe exceder 15 psig (937.5.1). En el ensayo la presión puede irse incrementando gradualmente hasta la mitad o los dos tercios de la presión de diseño. Una inspección final debe realizarse a la presión de operación. Al mismo tiempo se debe hacer inspección visual verificando ausencia de cualquier fuga posible. ⁴⁴

A continuación se enlistan algunas normas para establecer las condiciones de presión hidrostática para tubería:

Tabla 4. 11 Normas consideradas para el Ensayo Hidrostático de las Probetas

NORMA	Especificación	Nombre	Presión de trabajo	Presión de diseño	Fórmula de presión de prueba hidrostática	Presión Hidrost. obtenida de fórmula (máxima)	Presión mínima	Presión de prueba	Tiempo de prueba	Fluido de prueba	Fluido de trabajo	Diámetros aplicables	Material	Temperatura de prueba	Observaciones
	Tubería producida bajo JIS G 3448, ASTM A240, Especificaciones Técnicas de Fabricación	A 240: Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels.	60 psi Crítica: 250 psi	>250 psi 2276 psi (revent.)	-	-	90 psi	700 psi	5 min	Agua	Agua, gas GLP, conducción de fluidos	½, ¾, 1, 1 ¼, 1 ½, 2, 2 ½ (in)	Acero Inoxidable 304 según ASTM A240	Ambiente	-
NCh	2674.Cr, 2002	Cobre y aleaciones de Cobre-Accesorios de unión estampados a soldar y roscados- para tubos de cobre.	712 psi (4982 kPa)	> 712 psi 2850 psi (revent.) 4 veces P Trabajo	*1 $p = \frac{13.78 S(e)}{D - 0.8(e)}$	21200 psi (148.3 Mpa)	250psi (1722 kPa)	250 psi	10 segundos	agua	-	1/2 in, 15,88mm con e= 0,8mm	Cobre, UNS No C10 200, C12 000 o C12 200 o aleaciones UNSC 23000	Entre -27.8 y 37.8°C	-
Procobre	México	Manual de Tubería de Cobre	175 psi (1,22 Mpa)	> 175 psi	*2 $p = \frac{2(e)}{D - 0.8(e)} T$	3146 psi (22 Mpa)	3146 psi	3146 psi	-	Aire, agua	-	d ext< 50mm	Cobre	-	-
NTC *4	2505	Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales	34.5 kPa	138 kPa	-	-	414 kpa (60 psig)	414 kpa (60 psig)	60 minutos	Aire	Gas	cédula 40	Tubería rígida de acero y tubería corrugada de acero inoxidable NTC 4579	Ambiente	Se prohíbe el uso de oxígeno, agua
ASME *5	B 31.9	Building services piping	15 psi	150 psig	P máx= 0.9 (Sy)	26800psi	1.5(150) = 225psig	225 psi	>10 minutos	Agua.	Agua, vapor, líquido no tóxico, aire comprimido, gases no tóxicos y no inflamables, combustibles líquidos	< 12 in con e < 0.5in.	AISI 304 Cobre Acero Carbono	Hasta 100°F (ambiente)	La presión puede irse incrementando gradualmente hasta la mitad o los dos tercios de la presión de diseño. Una inspección final debe realizarse a la presión de operación. Al mismo tiempo se debe hacer inspección visual verificando ausencia de cualquier fuga posible.
ASTM	A530	Standard Specification for General Requirements for Specialized Carbon and Alloy Steel Pipe	-	-	0.5 (Sy)	14900 psi	<14900 psi	-	-	Agua	-	> 1/8 in y con espesor 0,4 mm hasta 8,1 mm.	Tubería de acero inoxidable austenítico con costura	40°C	Esta norma tiene extensión con la ASTM A249, Sy de AISI 304 es 29000 psi
INEN	2260	Instalaciones para gas combustible en edificaciones de uso residencial, comercial o industrial. Requisito	60 psi	60psi *3	1.5 veces Pmax servicio	1,5 (60)=90 psi	90 psi	-	-	Aire o gas inerte	Gas licuado de petróleo	1/2 in, 15,88mm con e= 0,8mm	Cobre, acero inoxidable y PVC	Ambiente	La presión se debe mantener el tiempo necesario para la inspección de la instalación y la detección de las fugas, la duración del ensayo debe estar de acuerdo con lo siguiente: volumen < 4 m3 corresponde a un tiempo de 10 minutos.

Notas generales de la Tabla 4.11:

***1: NCh 2674:**

p : Presión hidrostática de un tubo de cobre tipo L, a la temperatura de trabajo expresada en MPa.

D : Diámetro exterior del tubo expresado en mm (15.88 mm).

S : Tensión admisible a temperatura de trabajo en MPa (209 N/mm²)

e : Espesor mínimo de pared en mm (0.8 mm)

El procedimiento para realizar el ensayo según la Norma NCh 2674 es el siguiente:

1. Aplicar la presión de 1722 kPa (246 psi) durante 10 seg.
2. Desconectar el equipo.
3. Verificar si existen fugas.
4. Reparar los imperfectos si existieren y volver a ensayar.

***2: Procobre¹⁵:**

P : Presión de uso en Mpa

e : Espesor de la pared del tubo (mm) (0.8 mm)

D : Diámetro exterior del tubo (mm) (15.88 mm)

T : Solicitación a la tracción (209 Mpa)

En todos los casos para el acero inoxidable AISI 304 se consideró el esfuerzo de fluencia “ S_y ” de un valor de 29800 PSI según las especificaciones técnicas de la tubería “Fujinox Hidro” para conducción de fluidos fabricada bajo la norma ASTM A544.

***3: INEN 2260:** *Presión de Diseño.* Es la máxima presión permisible prevista por las normas de construcción, aplicables a cada recipiente o sistema de tuberías, determinada mediante los procedimientos de diseño establecidos para el tipo de materiales en que estén construidos. Esta norma se aplica a las instalaciones que utilizan gas combustible suministrado por redes de abastecimiento, tanques y/o cilindros portátiles, correspondiendo a los diferentes tipos de gas: natural, licuado de petróleo, cuya presión máxima de servicio sea inferior o igual a 4 bar (60 psig).

Ningún ensayo se debe iniciar antes del enfriamiento completo de las soldaduras.

El ensayo de estanqueidad se debe completar comprobando con agua jabonosa, o producto similar, todas las juntas y accesorios de la instalación.

***4: NTC 2505** ¹⁸

El procedimiento para realizar el ensayo según esta norma es el siguiente:

1. Purga inicial de la probeta para eliminar cualquier material extraño en la tubería.
2. La salida debe estar provista de tapones que proporcionan hermeticidad. No se permite el uso de madera, corcho u otro material inadecuado.
3. Equipos: compresor o fuente de suministro de aire, agua jabonosa y cabezas de ensayo.
4. Inyectar aire hasta lograr estabilizar la presión de ensayo 60 psi (420 kPa).
5. Desconectar luego la fuente de suministro.
6. Tomar la lectura de la presión para establecer la hermeticidad una vez transcurrido el tiempo mínimo de ensayo.

Notas y evaluación ¹⁸:

1. Los manómetros empleados en el ensayo deben ser tales que la presión de ensayo se halle entre el 25% y el 75% de su rango de medición.
2. Al realizar el ensayo de hermeticidad no debe presentarse variación en la lectura indicada por el manómetro que registra la presión de ensayo.
3. Si existe variación de presión en el manómetro el sistema no es hermético.
4. Si existen fugas se debe someter al sistema a reparación y a un nuevo ensayo.

***5: ASME B31.9** ⁴⁴

El procedimiento según esta norma es el siguiente:

1. La preparación de esta prueba aclara que todas las juntas incluyendo a las que se unen por soldadura fuerte no deben estar aisladas sino expuestas para inspección durante la prueba (art. 937.2).
2. Aplicar la presión de prueba por al menos 10 min.
3. Revisar si existen fugas en la tubería, junta o conexión y eliminarlas por reparación, impermeabilización o reemplazo.

4.2.3.2 Dimensiones de la Probeta para Ensayo de Presión Hidrostática

El ensayo de presión hidrostática puede realizarse en cualquier longitud de tubería que sea suficiente para observar fugas, se puede aplicar a todo un sistema armado con varios accesorios o a una sola unión. Para este ensayo se considerará como mínimo 10 veces el diámetro nominal de la tubería es decir 10 veces $\frac{1}{2}$ in, por lo que las probetas deben tener dimensiones mayores a 5 in (127 mm)

4.2.3.3 Hermeticidad para el Ensayo de Presión Hidrostática

La salida debe estar provista de tapones que proporcionen hermeticidad. No se permite el uso de madera, corcho u otro material inadecuado.¹⁸ Para la realización de este ensayo, tapones y accesorios de conexión (Cobre), fueron insertados para realizar soldadura fuerte con material de aporte BAg-2.



Figura 4. 38 Cupones para Ensayo Hidrostático

El equipo de prueba consiste de una bomba hidráulica manual de desplazamiento positivo que requiere previamente de un asentamiento de válvulas y la capacidad

máxima es de 5000 psi, además de un tanque de almacenamiento de agua, tubo de succión, válvula para fijar la presión de prueba y acople universal.



Figura 4. 39 *Máquina para Ensayo Hidrostático*

Al efectuar el ensayo de hermeticidad si se determina la existencia de fugas se deben realizar las correcciones correspondientes y someter nuevamente el sistema a un ensayo de presión. Al inicio de la prueba se aplica baja presión al sistema para comprobar si existen fugas en el acople universal.

4.2.3.4 Procedimiento del Ensayo de Presión Hidrostática.

Verificar la máquina, asentar las válvulas y conectar el tubo de prueba al acople universal. Comprobar que no existan fugas en el sistema presurizando la línea sin cerrar la válvula. Es necesario que las conexiones y el tubo de prueba siempre se mantengan secos para facilitar la inspección visual.



Figura 4. 40 *Válvula de ajuste y acople universal.*

Después de verificar la hermeticidad, presurizar el sistema hasta 700 psi y cerrar la válvula que fija esta presión de prueba. Esperar 5 minutos para determinar si hay una diferencia de presión. La presión que se observa en la escala del manómetro debe ser controlada periódicamente y por una sola persona. Al mismo tiempo se debe controlar visualmente el tubo de prueba porque pueden darse fugas que causan una caída de presión que no es muy perceptible.

4.2.4 MACROGRAFÍA

Es importante dar una inspección previa luego de recortar las secciones unidas para determinar si existen porosidades, flujo deficiente de metal de aporte (falta de penetración), erosión del metal base, distribución correcta de holgura, etc.

Las observaciones macroscópicas proporcionan información importante para determinar la existencia de poros o falta de llenado que pueden proveer caminos para fugas de fluido. Estos defectos pueden deberse a factores como: limpieza inadecuada, holgura excesiva, gases atrapados, movimiento de piezas por mala sujeción, falta de material de aporte.

La falta de mojado, que significa que no hay flujo capilar quedando espacios o huecos, es el resultado de una baja temperatura o mala técnica, tiempo corto de exposición, limpieza inadecuada, poco fundente protector o material de aporte inadecuado. Por el contrario mojado excesivo, demasiado material de aporte, puede resultar por la aplicación de una temperatura alta o tiempo de exposición excesivo.

El fundente atrapado reduce la vida de servicio de la unión y las grietas reducen tanto la resistencia mecánica como la vida de servicio actuando como concentradores de esfuerzos donde se pueden producir fallas por fatiga.

La inspección consiste en cortar secciones transversales a la unión y preparar para inspección en el microscopio. Las probetas se pulen en varias lijas y Alúmina, y las superficies se atacan con reactivo Marble.

CAPÍTULO 5

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN (PQR)

5.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar el procedimiento de soldadura fuerte en acero inoxidable, en el desarrollo de esta investigación, se han tomado en cuenta los siguientes aspectos:

Las instalaciones centralizadas de gas licuado de petróleo necesitan ser realizadas con materiales de alta resistencia a la corrosión, tanto para el fluido de transporte como para condiciones externas. Todos los aceros tienen buenas propiedades mecánicas respecto a otros metales, los inoxidables además de ello, tienen buena resistencia a la corrosión por presentar en su composición aleantes como el Cromo que forma una película superficial autoregenerante de Óxido de Cromo. Sin embargo, el Cromo es también un limitante ya que composiciones superiores a 30% tienden a formar compuestos duros que fragilizan a todo el acero. Existen aceros inoxidables: Austeníticos, Ferríticos y Martensíticos. De éstos, los Austeníticos (mayor %Cr) son más resistentes a la corrosión que los Ferríticos y Martensíticos y un mayor contenido de Carbono genera un cambio de fase austenítico proporcionando mayor ductilidad (%C Austenítico < %C Ferrítico < %C Martensíticos). La ductilidad en los austeníticos mejora la soldabilidad y conformabilidad (mejor plasticidad) debido a que la estructura austenítica es cúbica centrada en la cara, estos aceros no son magnéticos y no se templean. Los aceros Martensíticos son más duros por contener más Carbono por esta razón la soldadura en estos aceros es frágil.

En los aceros inoxidables, por el contenido de Cromo, es más difícil aplicar soldadura en relación a los aceros al Carbono. Desde temperaturas de 425°C hasta 800°C el Cromo se desplaza hacia los bordes de grano (Precipitación de Carburos) dejando esta zona debilitada y expuesta a corrosión intergranular. El caso más drástico de este tipo de corrosión se tiene con desprendimiento de material en forma de escamas. La sensibilización depende también del tiempo de exposición a una temperatura elevada, en ocasiones si se aplican altas

temperaturas y se da un enfriamiento rápido se puede lograr que el Cromo que tiende a desplazarse al borde de grano se disuelva en la matriz.

Los procesos de soldadura de acero inoxidable deben realizarse con cortos tiempos de exposición en el rango de precipitación de carburos. El proceso que se adapta a estas condiciones es la Soldadura Fuerte que tiene como fundamento: no fusionar el metal base con el metal de aporte, el metal de aporte ingresa por capilaridad en una junta cuya separación se diseña adecuadamente, y la temperatura solidus del material de aporte debe ser mayor a 450°C y menor a la de fusión del metal base.

La soldadura fuerte se clasifica de acuerdo a las distintas maneras de calentar, una manera sencilla es usando soplete (Torch Brazing). El proceso es manual y puede ser automatizado. El calor que se suministre debe ser el necesario para alcanzar el rango brazing y debe ser uniforme al direccionarse hacia la junta (boquillas de diámetros pequeños). Un adecuado procedimiento es balancear el soplete, con el objeto de evitar concentraciones de calor o gradientes altos de temperatura que se pueden dar en el acero inoxidable por la baja tasa de transferencia de calor. La llama debe ser neutra aunque es recomendable que sea ligeramente reductora para evitar oxidación en la junta. Los tipos de gases que se ocupan con soplete son: gas natural, Propano, Butano, mezclas GLP, o mezclas Oxígeno – Acetileno, pero manteniendo control de temperatura y tiempo de exposición. La temperatura máxima que alcanza la combustión de las mezclas de GLP (30 Propano, 70 Butano) es de 1200°C aproximadamente por lo que se prefieren ante las mezclas oxiacetilénicas.

El proceso de soldadura fuerte con soplete requiere fundente para proteger la unión, el fundente ayuda a eliminar óxidos y crea un camino o guía de ingreso del material de aporte al reducir las tensiones superficiales de este. Se debe tomar precauciones al manipular los fundentes porque son tóxicos (Ácido Bórico). El fundente se aplica con limpieza previa de la junta y luego de precalentarla, la temperatura de fusión se encuentra por 60°C aproximadamente y requiere limpieza luego de culminado el proceso. La limpieza puede realizarse con agua caliente, cepillo metálico, lija o grata.

Para realizar uniones de acero inoxidable el Manual de Soldadura AWS recomienda cuatro grupos de material de aporte: BAu, BNi, BAg, BCu. Los costos del grupo BAu son elevados por su composición. De los cuatro grupos, BCu tiene costos bajos, sin embargo la composición de BCu 1 es de 99.9% Cu, material que puede generar pares galvánicos en condiciones severas. Una variación de BCu es BCuP que además de contener Fósforo también contienen hasta 20% de Plata, este elemento reduce el rango brazing. Otra variación de BCu son materiales de aporte con Cinc (RBCuZn) que sirven para unir materiales ferrosos pero al igual que el grupo BNi se utilizan cuando las condiciones de resistencia a la corrosión no son requeridas (rangos brazing mayores a 900 °C). El grupo BAg es el más idóneo para utilizar en el proceso de soldadura fuerte de acero inoxidable, porque presenta el menor rango brazing (hasta 800°C), además tienen alta fluidez. Algunos materiales de aporte de este grupo contienen Cadmio y Cinc que disminuye el rango brazing pero son tóxicos y deben manipularse con precaución. La menor diferencia entre la temperatura liquidus y solidus de los metales de aporte orientan para la selección de los mismos porque determinan el menor rango brazing y mejor fluidez, esto coincide con los materiales que tienen mayor contenido de Plata (en grupos BAg y BCuP) e implican mayores costos.

Del grupo BAg los materiales que tienen la menor diferencia entre temperaturas solidus y liquidus son BAg1, BAg 1a, BAg33 y BAg2. Se escoge el material BAg2 porque tiene la temperatura más baja de solidus (620°C), temperatura media de liquidus (695°C) y un contenido medio de plata (35%).

Para desarrollar un estudio de la aplicación del grupo BCuP se escoge el material de aporte BCuP 5, porque tiene contenido medio de plata (15%) y esto determina menor temperatura solidus (643°C) y una temperatura media de liquidus (802 °C).

Para realizar procesos de soldadura fuerte el Manual de Soldadura AWS permite juntas a tope o traslapadas; la tubería AISI 304 para diámetros de ½ pulgada tiene espesores de 0,8 mm. Con este espesor de pared en una junta a tope se obtienen pequeñas áreas de soldadura. El tipo de junta seleccionada es traslape y se logra por expansión de un extremo de tubería. La norma INEN 2260 para Instalaciones de Gas Licuado de Petróleo, permite realizar juntas abocinadas de

tubería si luego de realizar la expansión, el espesor final no cambia considerablemente.

La expansión debe realizarse con un instrumento de mayor resistencia mecánica que el acero inoxidable AISI 304, además debe tener un diseño apropiado que permita la deformación permanente del tubo llegando como máximo a la zona de fluencia. El instrumento o dado deformador tiene una curvatura que al expandir genera esfuerzos longitudinales y transversales menores que los que se generaría si la presión interna actuara perpendicularmente sobre las paredes como en cilindros de paredes delgadas. La expansión se facilita con lubricantes como grafito fino.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

5.2.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

A continuación se presenta una tabla con el registro de las cargas máximas de rotura que experimentó cada probeta, las probetas en las que se realizó el proceso de soldadura con material de aporte en base de Plata soportaron cargas mucho mayores que las probetas en las que se realizó el proceso de soldadura fuerte con material BCuP-5.

Tabla 5.1 *Resultados del ensayo de tracción*

Probeta	Material de aporte	Holgura por lado (mm)	Carga (lb)	Carga (kg)
GG	BCuP5	0,2	1000	455
HH	BCuP5	0,2	1900	864
II	BAG2	0,5	3900	1773
MM	BAG2	0,2	7000	3182
PP	BAG2	0,2	6175	2807
RR	BAG2	0,5	6400	2909
X	BCuP5	0,5	900	409
Y	BCuP5	0,5	1125	511

El valor de la carga da una idea de la fuerza máxima en tracción que soporta una probeta, pero un mejor concepto de la resistencia mecánica revela el esfuerzo, en el que implica el área que soportó dicha carga.

El objetivo de los tubos es la conducción de fluidos o gases. La presión de servicio en condiciones críticas es 250 psi para los tubos Hidriox de acero

inoxidable AISI 304 ²⁶. El análisis de los tubos como cilindros de paredes delgadas determina si éstos soportan los esfuerzos generados al aplicar la condición crítica de presión.

En la figura 5.1:

$$t \ll d$$

t : Espesor = 0,8mm

d : Diámetro externo = 15,88mm

q : Carga máxima = 250 psi

h' : Holgura promedio = 0,3mm

$$d + 2h' + 2t = 18.08mm$$

$$2t + h' = 1,9mm$$

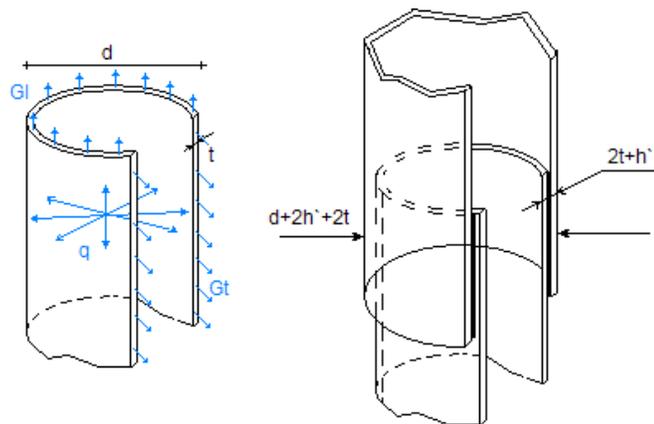


Figura 5. 2 Esfuerzos transversales y Longitudinales que se generan por Presión interna

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (A)$$

Ecuación 5. 1 Cálculo de esfuerzo de tracción ³⁴

De la ecuación 5.1:

σ : Esfuerzo (psi)

P: Fuerza (lb)

A: Área de mojado (in²)

$$\sigma_l = \frac{qd}{4t} \quad (C, C')$$

Ecuación 5. 2 Esfuerzo longitudinal causado por presión interna ³⁴

De la ecuación 5.2:

σ : Esfuerzo longitudinal (Psi)

q: Presión (250 Psi)

d: Diámetro (mm)

t: Espesor (mm)

$$\sigma = \frac{qd}{2t} \quad (B, B')$$

Ecuación 5.3 Esfuerzo transversal causado por presión interna ³⁴

De la ecuación 5.3:

σ : Esfuerzo transversal (Psi)

q: Presión (250 Psi)

d: Diámetro (mm)

t: Espesor (mm)

Tabla 5.2 Esfuerzos de Tracción, Longitudinal, Transversal de las probetas ensayadas

Información de la soldadura					Cilindro de paredes delgadas Esfuerzos Generados por Presión Crítica de Servicio (250 psi)				(A)/(C')
					Tubo *		Unión**		
Probeta	P (lb)	L (mm)	Área (in ²)	(A) Esfuerzo de Tracción que soporta la unión (lb/in ²)(psi)	(B) Esfuerzo transversal (psi)	(C) Esfuerzo longitudinal (psi)	(B') Esfuerzo transversal (psi)	(C') Esfuerzo longitudinal (psi)	
GG	1000	1,5	0,12	8621,34	2481,25	1240,6	1189	594	15
HH	1900	3	0,23	8190,27	2481,25	1240,6	1189	594	14
II	3900	8,8	0,68	5731,23	2481,25	1240,6	1189	594	10
MM	7000	10	0,77	9052,41	2481,25	1240,6	1189	594	15
PP	6175	7	0,54	11407,88	2481,25	1240,6	1189	594	19
RR	6400	9,4	0,73	8804,77	2481,25	1240,6	1189	594	15
X	900	2	0,15	5819,40	2481,25	1240,6	1189	594	10
Y	1125	3	0,23	4849,50	2481,25	1240,6	1189	594	8
* Como tubo se considera solamente diámetro externo de 15,88mm y espesor 0,8 mm									
** Como unión se considera el diámetro externo del extremo hembra y el espesor de los dos tubos									
L: Longitud promedio de penetración de material en holgura									

En la Tabla 5.2 se resumen los esfuerzos generados en cada una de las uniones, (A) corresponde al esfuerzo de tracción en el que se produce rotura, (B) y (C) son los esfuerzos transversal y longitudinal respectivamente considerando las dimensiones iniciales del tubo. (B') y (C') son esfuerzos transversales y longitudinales de la unión de la junta con soldadura fuerte. La presión crítica es

de 250 psi que produce esfuerzos longitudinales constantes (C) de 1240 psi y esfuerzos transversales (B) de 2481 psi, así también produce esfuerzos longitudinales (C') de 594 psi y esfuerzos transversales (B') de 1189 psi. Los esfuerzos longitudinales se pueden comparar con el esfuerzo de tracción y la relación (A)/(C') es mayor que uno debido a que los esfuerzos máximos para rotura son de 8 a 19 veces mayores que los que podría generar la presión interna crítica. Realizando un proceso inverso se tiene que para los datos registrados se necesitan presiones internas de trabajo entre 2038 y 4800 psi para igualar los esfuerzos longitudinales con los de tracción.

Las áreas de resistencia entre las uniones con BCuP-5 y BAg-2 son diferentes. Con el material de aporte en base de Plata se observa que parte del mismo se queda en un extremo de tubería y el restante en el otro, esto indica que se produjo un desgarre de la soldadura. Con el material BCuP-5 se tiene poca penetración y todo el material de aporte se queda en un solo extremo.

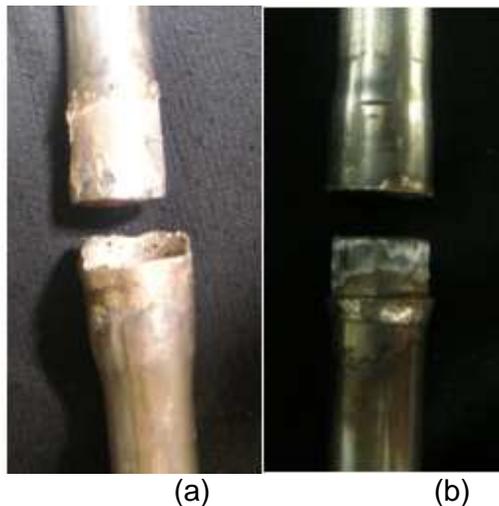


Figura 5. 3 (a) Rotura de unión BAg-2, (b) rotura de unión BCuP-5

Los esfuerzos que soporta el material BAg-2 son mayores que los de la unión con BCuP-5. La diferencia se debe a la capilaridad de cada material. Al utilizar el material de aporte BAg-2 se observa que éste se queda en los dos extremos de los tubos y el área que rodea el traslape es mayor por la penetración, mientras que en la unión BCuP-5 el área que soporta la carga es solamente la que rodea al cordón de soldadura sin penetración.



Figura 5. 4 *Extremo hembra de probeta BAg2 visto en microscopio*

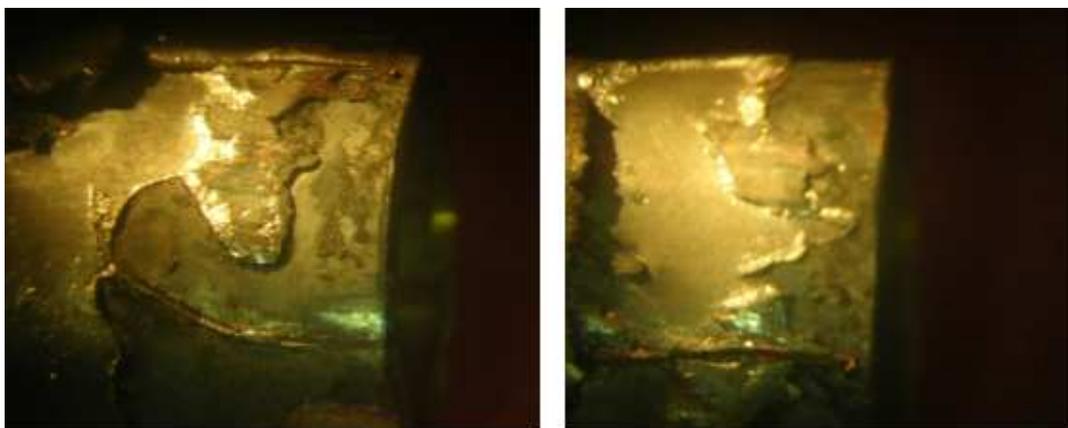


Figura 5. 5 *Extremo macho de probeta BAg2 visto en microscopio*

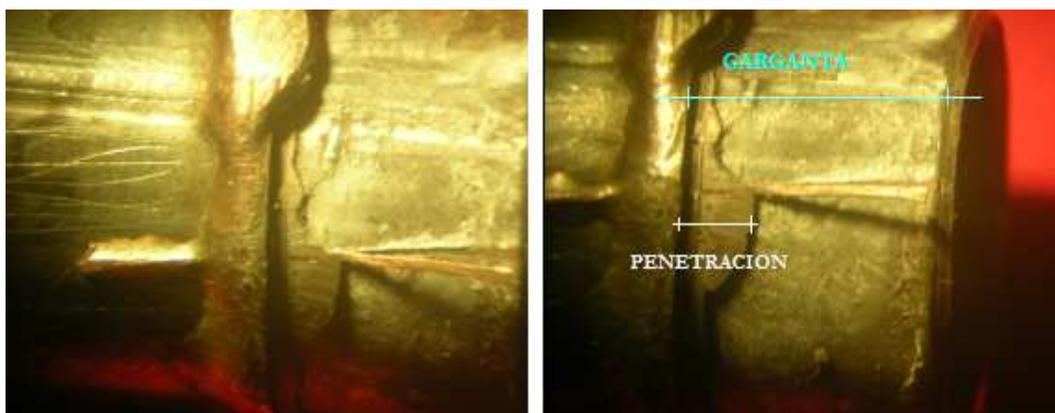


Figura 5. 6 *Extremo macho de probeta BCuP5 visto en microscopio*



Figura 5.7 *Extremo hembra de probeta BCuP5 visto en microscopio*

En la Figura 5.5 se observa poca penetración del material de aporte y que este se despegó de la pared del extremo hembra, el área que realmente resistió la carga de tracción es el anillo que rodea la junta como se indica en la Figura 5.6 en la que además se observan varios poros.

Las áreas de las uniones BCuP-5 son muy pequeñas por lo que aparentan esfuerzos grandes, la unión de soldadura fuerte sería exitosa si se logra que el área que resiste la carga sea la que pertenece a la holgura, es decir el área que cubre todo el traslape como es el caso del material de aporte en base de Plata.

En la Figura 5.7 los esfuerzos longitudinales y transversales son constantes y los esfuerzos que resisten las probetas son mayores. Las probetas marcadas con asterisco (*) corresponden a las que se realizó la soldadura con material de aporte BAg-2 (35% Ag – resistencia mecánica 54000 psi) y según los resultados obtenidos se observa que los mayores esfuerzos se obtienen con las probetas **PP** y **MM** con holgura de 0,2 mm por lado.

Las probetas **GG** y **HH** con material de aporte BCuP-5 (15% Ag – resistencia mecánica 50000 psi) muestran resultados aparentemente buenos con la holgura de 0.2 mm por lado. Las cargas de rotura no son altas pero tienen áreas de unión pequeñas entonces los esfuerzos son altos. Sin embargo tener poco mojado y pequeñas áreas de unión porosas reducen la confiabilidad para utilizar este tipo de materiales.

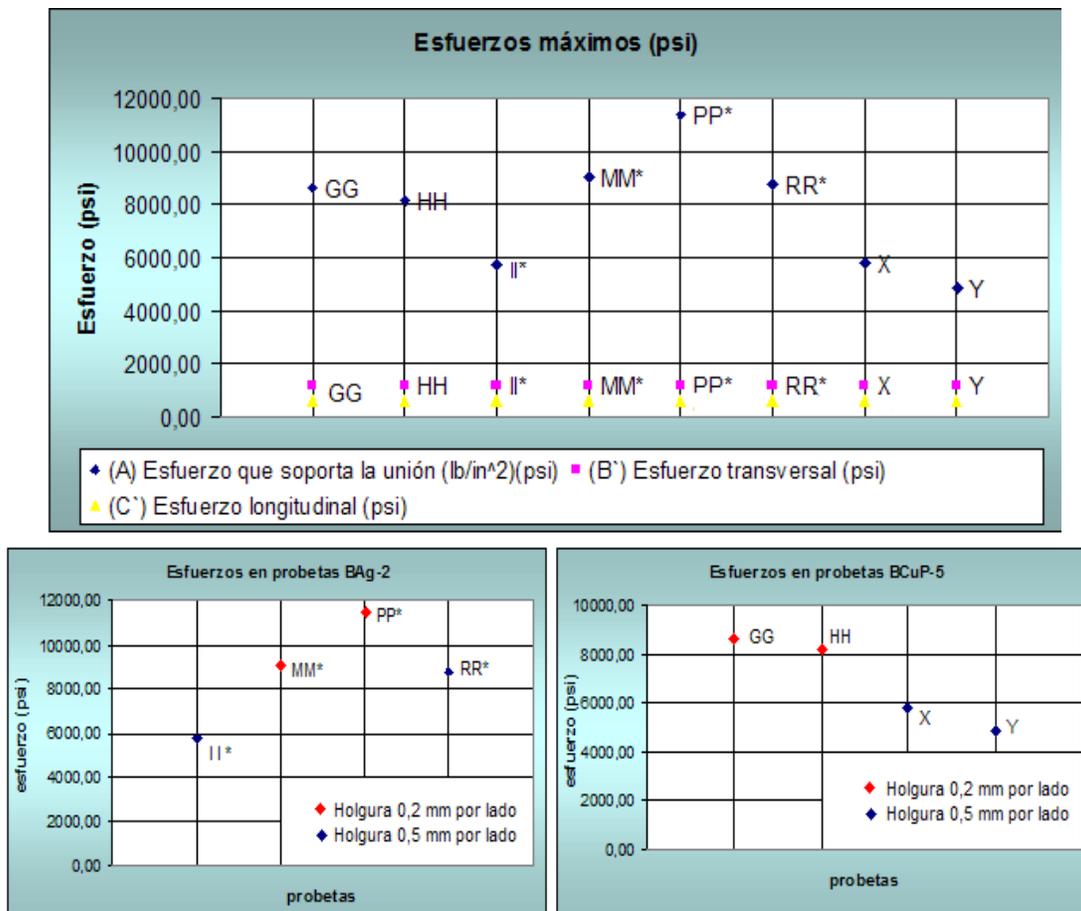


Figura 5.8 Esfuerzos de tracción, rotura, longitudinales y transversales

A continuación se realiza un análisis de las temperaturas del proceso con el ensayo de Tracción.

Tabla 5.3 Probetas de Ensayo de Tracción y temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte.

Información de Probetas			Temperatura (°C)		
Probeta	Material de Aporte (holgura por lado mm)	Esfuerzo de tracción (psi)	Pre calentamiento	Soldadura	Post calentamiento
Y	BCuP5 (0,5)	4850	106	389	500
II	BAG2 (0,5)	5731	137	356	433
X	BCuP5 (0,5)	5820	180	425	475
HH	BCuP5 (0,2)	8190	170	344	450
GG	BCuP5 (0,2)	8621	170	382	500
RR	BAG2 (0,5)	8805	150	365	480
MM	BAG2 (0,2)	9052	194	474	316
PP	BAG2 (0,2)	11408	170	395	500

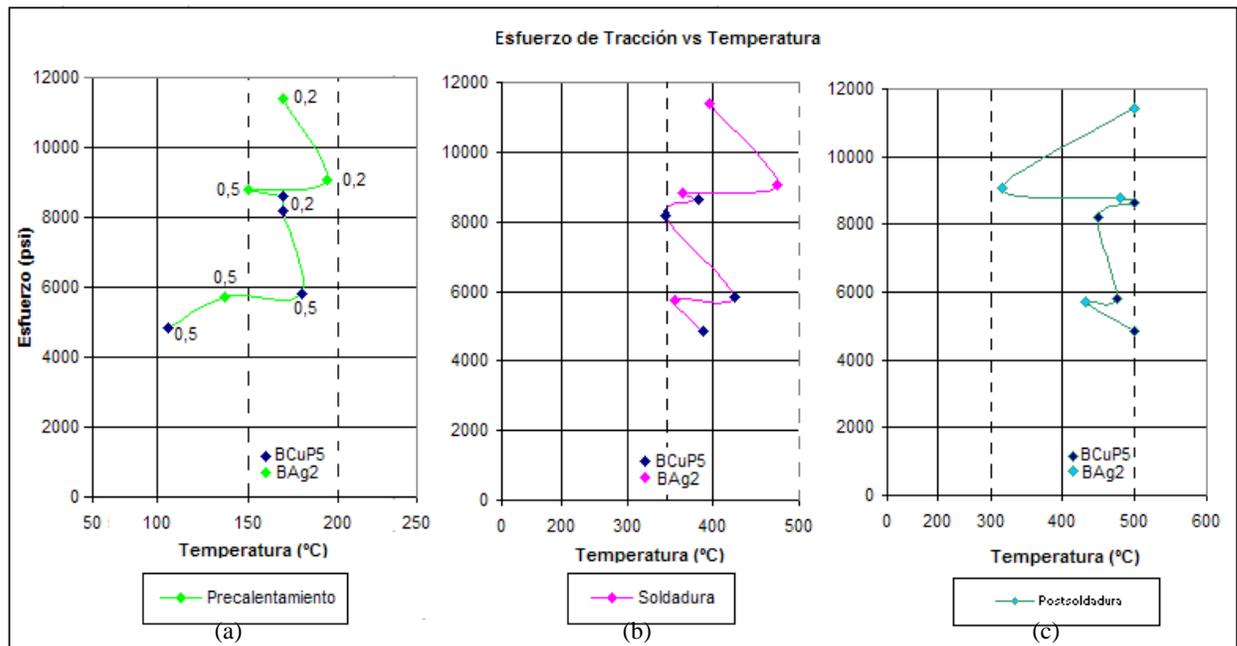
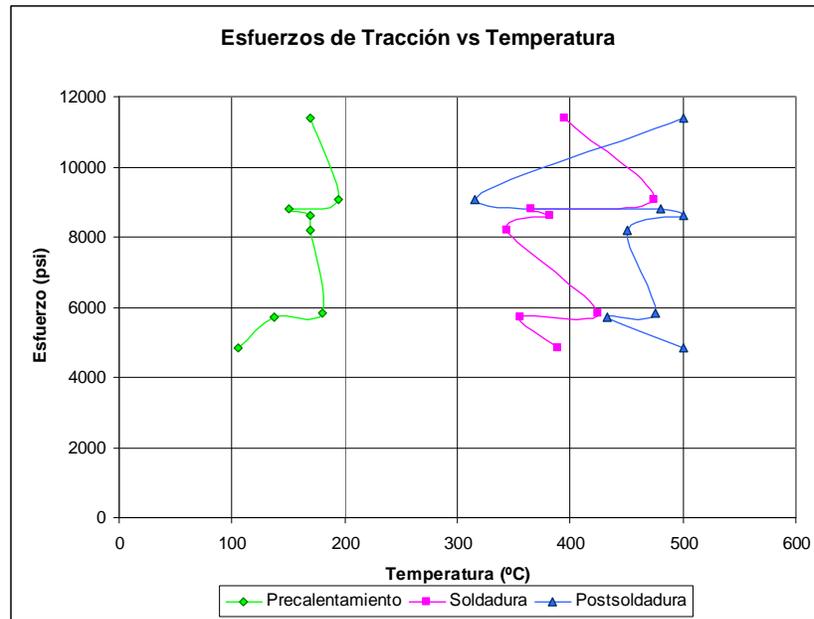


Figura 5.9 Probetas de Ensayo de Tracción, holguras (mm), temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte, Material de Aporte.

El precalentamiento es un factor importante en el proceso de soldadura fuerte, en la Figura 5.8 (a) se observa que en un rango entre 150 y 200 °C se tienen buenos resultados de resistencia mecánica para los dos tipos de material de aporte.

En las probetas II e Y se realizó un precalentamiento con temperaturas menores al rango establecido obteniéndose los menores esfuerzos de tracción para los dos materiales de aporte.

En el análisis de los esfuerzos de tracción en relación a la temperatura de soldadura, Figura 5.8 (b) se determina que se aplicó una misma temperatura para probetas con los dos materiales de aporte, registrándose mayores esfuerzos de tracción con el material BAg2. Un comportamiento similar se tiene en el caso de la temperatura de postcalentamiento, figura 5.8 (c).

Claramente se observa que el material BAg2 (holgura 0,2mm por lado) soporta mayores esfuerzos que BCuP5 independientemente de las temperaturas a las que se realiza la soldadura y postsoldadura pero es importante que la temperatura de soldadura se encuentre entre 350°C y 500°C.

A menores temperaturas que este rango no se consigue la fusión del material de aporte y a mayores temperaturas hay riesgo de sensibilizar el material base.

El postcalentamiento evita que exista un enfriamiento del material de aporte luego de depositarlo en la junta, por la exposición de ésta con el medio ambiente, garantizando penetración por capilaridad. El tratamiento postsoldadura puede realizarse con temperaturas entre 500 y 600 °C para que no se produzca soldadura frágil, pero con rangos entre 300 y 500°C se obtienen resultados satisfactorios.

5.2.2 ENSAYO DE DOBLADO

El objetivo de realizar el ensayo de doblado es observar el ángulo al que se despega la unión. Todas las probetas en las que la soldadura fuerte se efectúa con material BCuP-5 se despegaron en la realización del ensayo, aún sin ejercer presión sobre las mismas.

El ángulo de despegue de las juntas con BCuP-5 es pequeño en relación a los ángulos que soportaron las probetas unidas con material BAg-2.



Figura 5. 10 Probetas BCuP-5 ensayadas

Las probetas correspondientes al material BAg-2 no se despegan al realizar el ensayo, incluso algunas fueron sometidas más de una vez a doblado ya sea de cara o al reverso.



Figura 5. 11 Probetas BAg-2 ensayadas

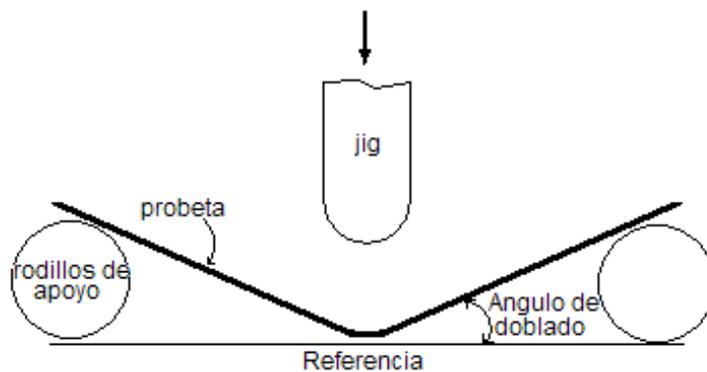


Figura 5. 12 Ángulo en Ensayo de Doblado

Tabla 5. 4 Resultados del Ensayo de Doblado

Probetas	Material de aporte	Holgura total (mm)	Ángulo de observación	Pasa la prueba	
				Si	No
B1	BCuP5	1	*		x
B2	BCuP5	1	*		x
P1	BCuP5	0,4	30°		x
P2	BCuP5	0,4	20°		x
R1	BCuP5	0,4	15°		x
T1	BCuP5	1	20°		x
Q1	BAG2	0,4	70°	x	
Q2	BAG2	0,4	** (80°)	x	
Q3	BAG2	0,4	70°	x	
S1	BAG2	1	** (70)	x	
S2	BAG2	1	** (60°)	x	
S3	BAG2	1	70°	x	
* Probetas que se despegaron por efectos de vibración durante el corte.					
** Probetas ensayadas 3 veces (cara - reverso)					

El código ASME Sección IX parte QB, no especifica un ángulo para aprobar el ensayo de doblado sin embargo el objetivo principal es observar si se produce un despegue de las juntas realizadas mediante soldadura mientras toman la forma del jig de doblado. Algunas de las juntas de probetas con material BAg-2 llegan a tomar la forma del jig sin presentar problema alguno. Las probetas con BCuP-5 soportaron ligeras cargas que implican ángulos de doblado pequeños y todas se despegaron. De lo observado se puede respaldar los resultados del ensayo de tracción y se determina como los poros en probetas BCuP-5 afectan a la resistencia de la junta debido a que los defectos son concentradores de esfuerzos.

A continuación se analiza los resultados del ensayo de doblado con las temperaturas del proceso.

Tabla 5. 5 Probetas de Ensayo de Doblado y temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte.

Probetas		Temperatura		
Código	Material de aporte	Pre calentamiento	Soldadura	Postsoldadura
B	BCuP 5	190	398	380
P	BCuP 5	195	331	350
Q	BAG 2	193	288	395
R	BCuP 5	210	350	335
S	BAG 2	194	380	400
T	BCuP 5	200	300	451

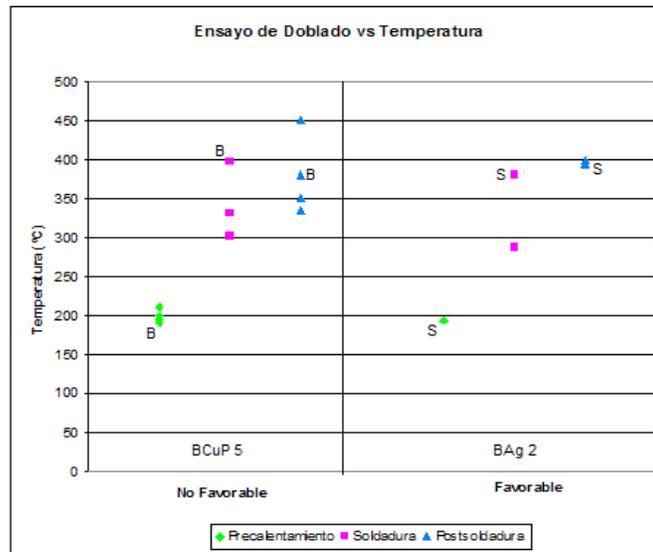


Figura 5.13 *Probetas de Ensayo de Doblado, temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte, Material de Aporte*

El ensayo de Doblado revela que el material de aporte es el único factor de importancia, independiente de las temperaturas del proceso y de las holguras de las probetas. El material BAg 2 no se despega al realizar el doblado en diferentes formas.

5.2.3 ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Del ensayo, para comprobar si existe hermeticidad en la junta, se obtienen los resultados en la Tabla 5.6, a continuación.

Tabla 5.6 *Resultados del Ensayo Hidrostático*

Probeta	Material de aporte	Presión inicial (PSI)	Presión final (PSI)	Tiempo de prueba (min)	Observaciones
AA	BCuP - 5	650	650	14	No existen fugas
		850	820 aprox	7	Empieza a fugar en forma de lágrima
OO	BAg - 2	750	750	6	No existen fugas
BB	BCuP - 5	750	0	0,17	Fuga en forma de chorro
EE	BCuP - 5	700	0	0,08	Fuga en forma de chorro
LL	BAg - 2	800	800	12	No existen fugas
AB	BCuP - 5	500	0	0,17	Fuga en forma de chorro
FF	BCuP - 5	750	500	0,08	Empieza a fugar en forma de lágrima
JJ	BAg - 2	850	850	27	No existen fugas

No se registran fugas en las uniones de los acoples al tubo, ni en las uniones realizadas con material BAg-2, estas juntas fueron probadas con presiones mayores a 700 psi y con mayores tiempos de prueba.

Las probetas en las que la soldadura se realizó con BCuP- 5 registraron una caída de presión inmediata luego de ser cargadas a 700 psi y al mismo tiempo se observó fugas como se indican en la Figura 5.13.



Figura 5. 14 Fugas en probetas ensayadas

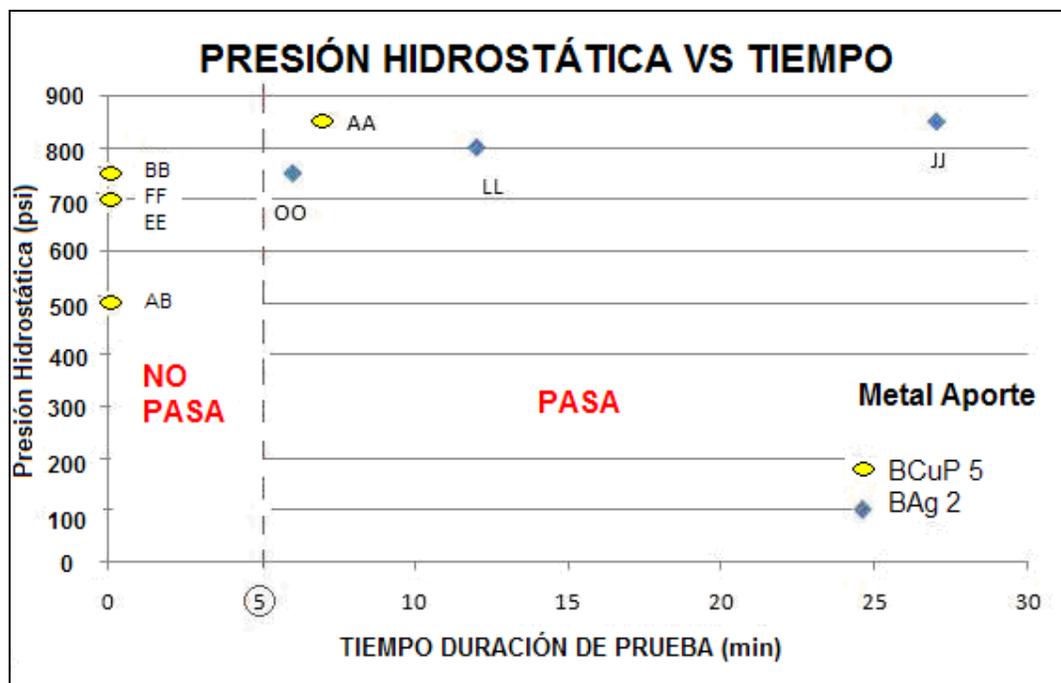


Figura 5. 15 Presión Hidrostática en relación al tiempo de ensayo

Los resultados de la prueba se pueden entender de mejor forma mediante la Figura 5.14 que indica el comportamiento de las probetas en la realización del ensayo, las probetas que corresponden a BCuP5 sufrieron cambios drásticos de presión en tiempos cortos (segundos), mientras que las probetas con uniones BAg2 no mostraron cambios de presión inclusive después de los 5 minutos establecidos como tiempo de prueba.

La probeta AA fue sometida al ensayo por dos ocasiones, en la segunda prueba se aumentó la presión y el fluido empezó a fugar.

Este ensayo es de mucha importancia para la aplicación que se da a las uniones, en el ensayo de tracción los resultados de esfuerzos son aparentemente buenos para los dos casos pero este ensayo evidencia que el material BCuP-5 no es adecuado para aplicar soldadura fuerte a la tubería de acero inoxidable austenítico cuya aplicación sea estructural o de conducción de fluidos.

A continuación se analiza la influencia de las temperaturas del proceso de soldadura fuerte en el ensayo de Hermeticidad.

Tabla 5.7 *Probetas de Ensayo de Hermeticidad y temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte.*

Probetas		Temperatura		
Código	Material de aporte	Pre calentamiento	Soldadura	Post calentamiento
AA	BCuP5	194	250	497
OO	BAg2	182	550	500
BB	BCuP5	130	170	513
EE	BCuP5	150	353	470
LL	BAg2	185	356	160
AB	BCuP5	205	384	450
FF	BCuP5	153	344	480
JJ	BAg2	170	371	200

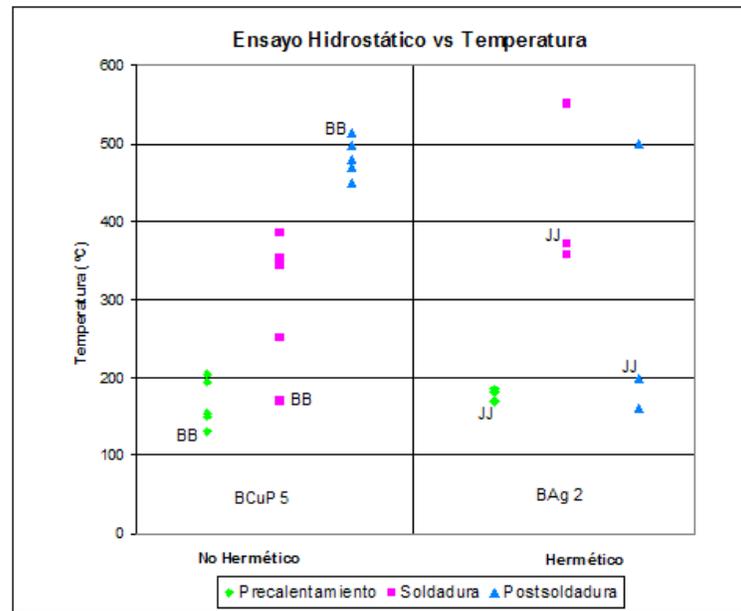


Figura 5. 16 *Probetas de Ensayo de Hermeticidad, temperaturas de procedimiento de soldadura fuerte, Material de Aporte.*

Para el ensayo Hidrostático se observa que las temperaturas y holguras del proceso de soldadura no influyen para que la junta sea hermética. Solamente el material de aporte BAg 2 no presenta fugas cumpliendo con los requerimientos del ensayo.

5.2.4 MACROGRAFÍA Y METALOGRAFÍA

5.2.4.1 Macrografías de Probetas (Soldadura realizada por Empresa Local)

La observación de pruebas efectuadas por una empresa local para soldadura fuerte de acero inoxidable (AISI 304) permite determinar la calidad de la unión efectuada y compararla con el desarrollo de la investigación del presente trabajo. Los materiales de aporte que se utilizaron son: BAg-2 y BCuP-5, mientras que las holguras en cada lado están comprendidas entre los 0.5 y 0.1 mm por lado, no existe proceso de precalentamiento o el utilizado no es el adecuado y los acoples son de cobre y bronce.



Figura 5. 17 Tubos de acero inoxidable con accesorios de cobre y bronce utilizados por una empresa local para realizar soldadura fuerte.

A continuación se detalla lo observado en macrografías que se realizaron a las secciones de unión.

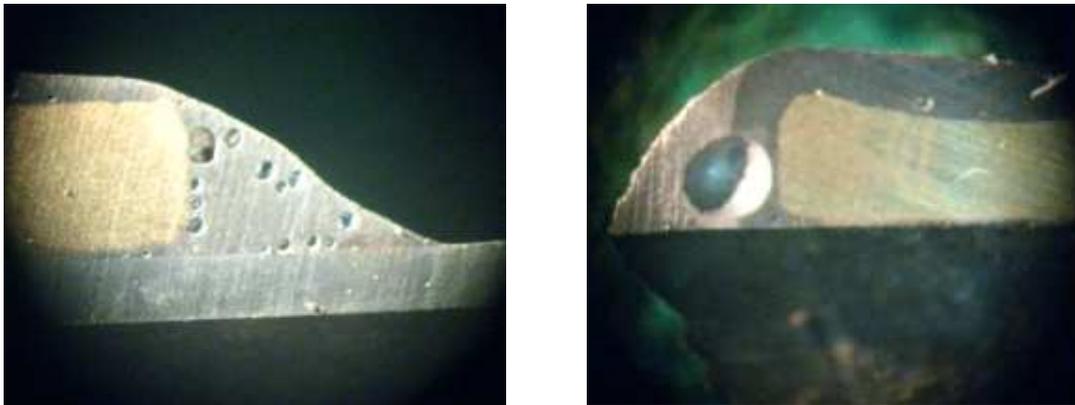


Figura 5. 18 Macrografía de la soldadura realizada en la Tubería de la figura 5.16

En la Figura 5.17, las uniones se realizaron con BCuP-5 y en éstas se observan varios poros en la parte exterior que se encuentran entre valores de 0.4 - 0.6 mm y el mayor de 1,4 mm. Este defecto (porosidad) puede aparecer debido a que la empresa local no aplica precalentamiento/postcalentamiento o no los realiza a una temperatura adecuada, existe humedad en el ambiente, mala aplicación del fundente o diferencia de coeficientes térmicos (expansión) entre el cobre y el acero inoxidable.

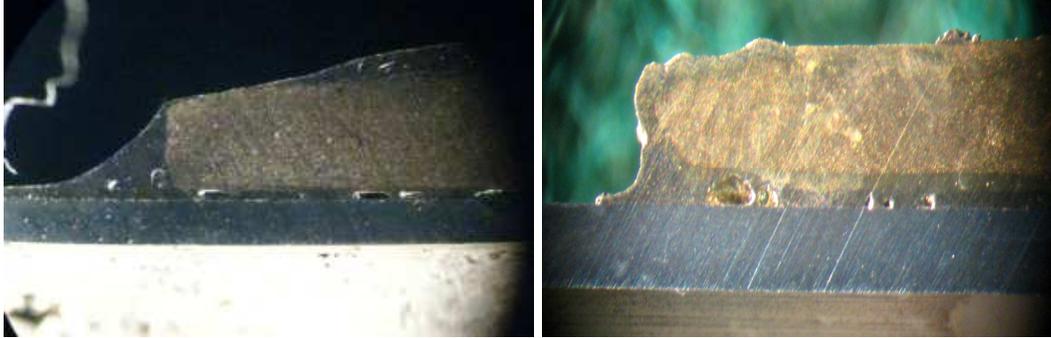


Figura 5. 19 *Discontinuidades en material BCuP-5 de las probetas (empresa local)*

En la Figura 5.18 se observa penetración discontinua (poros atrapados), la holgura es adecuada, es posible que para que exista capilaridad aumenten la temperatura de soldadura sin dar un precalentamiento por separado al cobre y al acero inoxidable por lo que el material de aporte empieza a burbujear atrapando fundente y aire dando origen a los poros que pueden abrir caminos para posibles fugas.

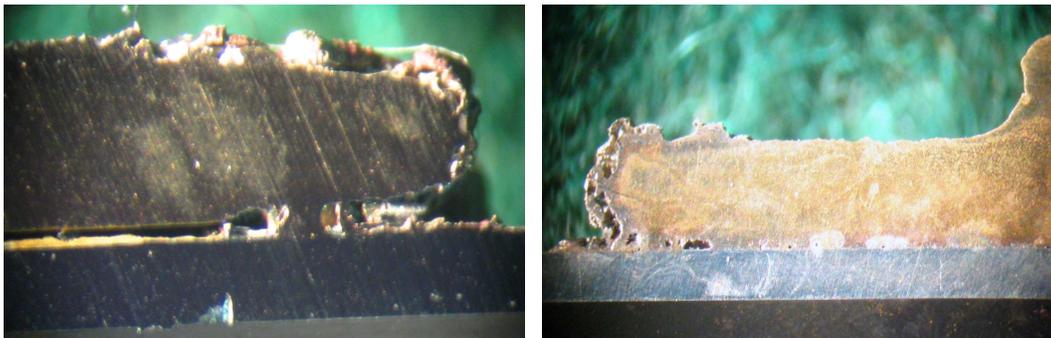


Figura 5. 20 *Falta de mojado en probetas de material BCuP-5 (empresa local)*

En la Figura 5.19 se observa que el material de aporte no ingresa en la holgura, la falta de temperatura para fundir el material de aporte hace que el mismo no ingrese en la separación de la junta.

Para evitar este problema es necesario fundir la varilla de aporte y con el soplete arrastrar las gotas alrededor de la junta, adicionalmente para asegurar que el material fluya por capilaridad se debe seguir aplicando temperatura alrededor de la unión.

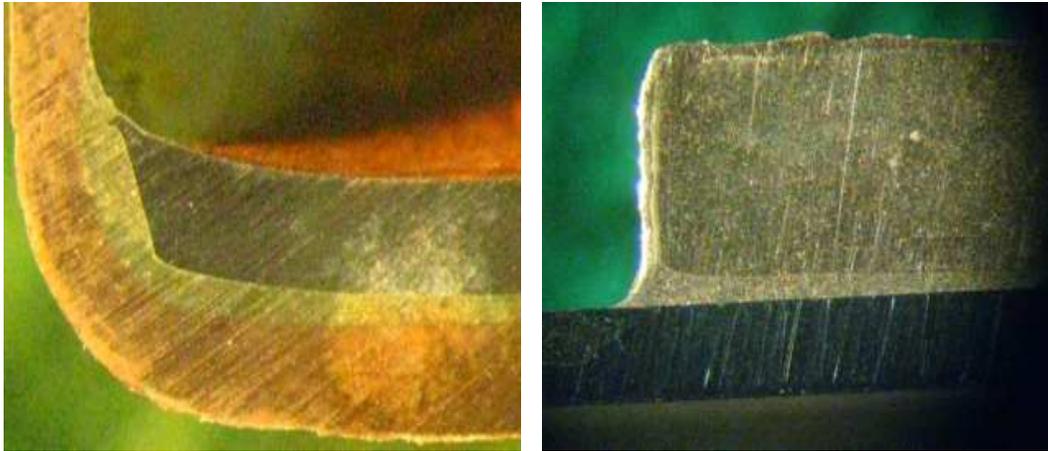


Figura 5. 21 *Macrografía de probetas con material BAg-2 (empresa local)*

La Figura 5.20 corresponde a uniones realizadas con material de aporte en base de Plata, este material tiene buena fluidez y cubre toda la distancia de traslape, además claramente se distinguen el acero, el cobre y el material de aporte con lo que no hay fusión entre metales base y de aporte.



Figura 5. 22 *Penetración irregular en probetas BAg-2 (empresa local)*

En la Figura 5.21 se observa penetración irregular, es decir en algunas zonas de la junta el material tiene más penetración que en otros, este resultado puede obtenerse porque el calor suministrado con el soplete no es constante.

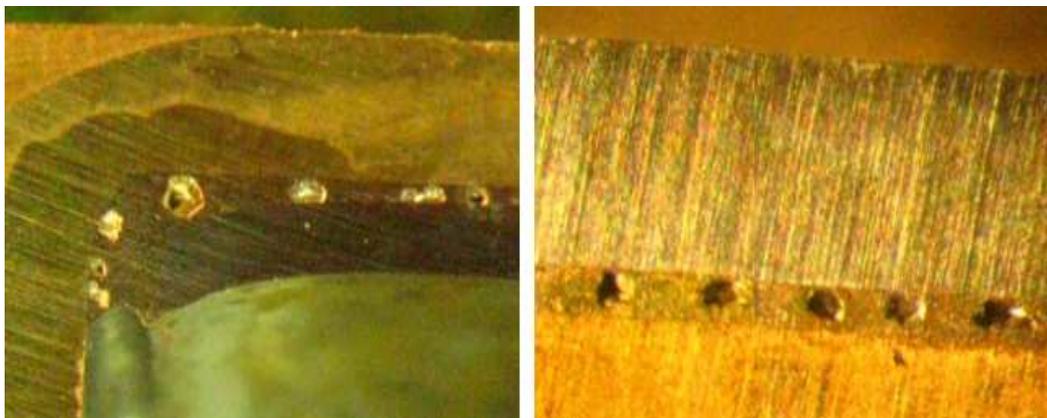


Figura 5. 23 Porosidad en probetas BAg-2 (empresa local)

En las probetas que se indican en la Figura 5.22 el material de aporte fluye pero hay discontinuidades, estos agujeros incluso llegan a ser del tamaño de la holgura. El fundente hace la función de guía del material de aporte, las discontinuidades pueden presentarse por falta de fundente o por no realizar limpieza antes de soldar.

5.2.4.2 Macrografías de Probetas realizadas en la Presente Investigación

De la inspección visual se puede decir que el material de aporte BAg2 se distribuye de manera uniforme y el fenómeno de capilaridad se produce con este material incluso en holguras menores a 0.1 mm (ver Figura 5.28), el material BCuP5 no penetra en ninguna de las holguras ni se distribuye de manera uniforme en la garganta.

Tabla 5. 8 Resultados de la Inspección Macrográfica

Probeta	Material de aporte	Holgura por lado (mm)	Penetración		Medida de penetración (mm)	Holgura centrada	Poros en penetración	Poros en cordón o superficie
			Lado 1	Lado 2				
F	BAg 2	0,2	Si	Si	11	Si	No	Si
E	BAg 2	0,5	Si	Si	6	Si	No	Si
K	BAg 2	0,2	Si	Si	11	Si	No	Si
G	BCuP5	0,2	No	No	1	Si	-	Si
I	BAg 2	0,2	Si	Si	6*	No	No	Si
H	BCuP5	0,2	Si	No	3	Si	-	Si
N	BCuP5	0,5	Si	No	3	Si	-	Si
M	BAg 2	0,5	Si	Si	9*	Si	No	No

* Medida de penetración igual a la medida de traslape.



Figura 5. 24 Soldadura Fuerte en Tubos de acero inoxidable AISI 304

Las uniones de soldadura fuerte se realizaron con materiales BAg-2 y BCuP-5 y las holguras son de 0.2 y 0.5 mm por lado.

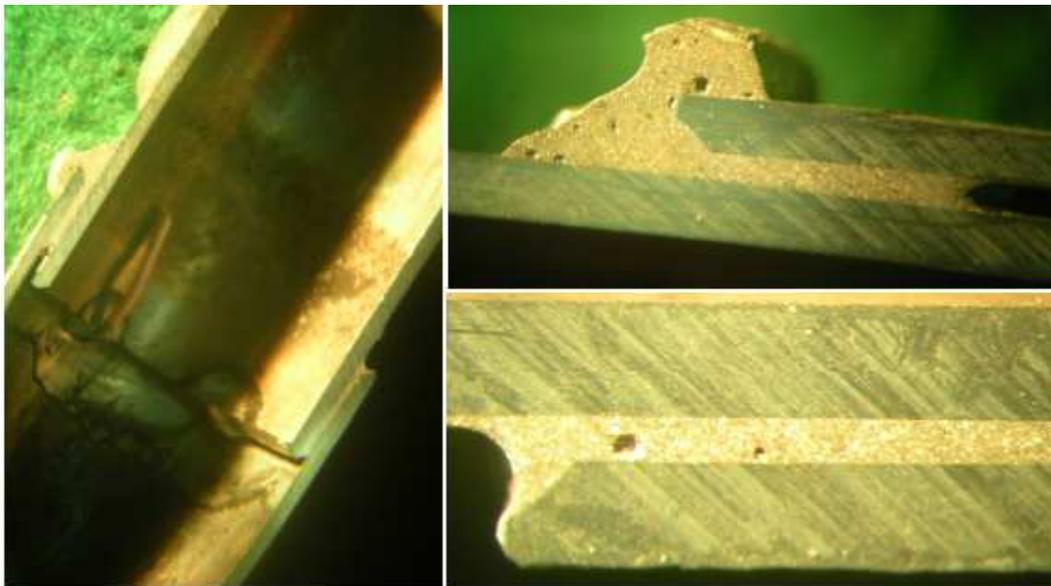


Figura 5. 25 Macrografía de Probeta E

La holgura de la probeta E es de 0.5 mm por lado, el material BAg-2 se distribuye por toda la garganta. Se observan poros en el extremo exterior de la junta que pueden aparecer al momento que se aplica la varilla de aporte, se retira y se vuelve a aplicar; quedando así aire o fundente atrapado, lo importante es que estos poros son pequeños y no aparecen en la parte interior.

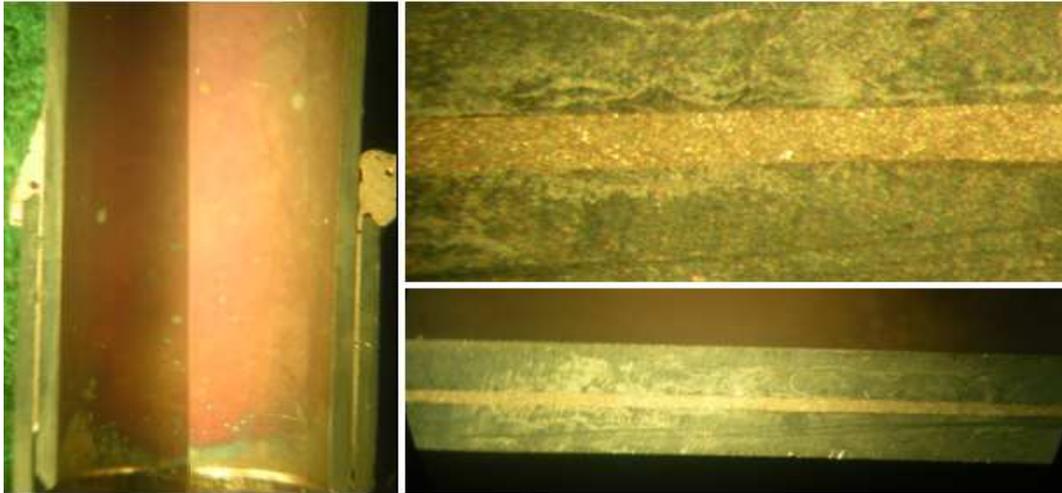


Figura 5. 26 Macrografía de Probeta F

La probeta F tiene holgura centrada de 0,2 mm por lado y a pesar de ser tan pequeña permite que el material de aporte (BAg-2) ingrese por capilaridad, no se observan defectos en el camino del material sino solamente en el extremo exterior.



Figura 5. 27 Macrografía de Probeta G

La probeta G corresponde a una unión con BCuP-5, este tipo de material de aporte no ingresa por capilaridad en la holgura de 0.2mm por lado, en el momento de realizar el proceso la temperatura que se aplica funde fácilmente al material de aporte y éste es arrastrado para cubrir la junta pero no ingresa en la holgura.

Se observan en el extremo exterior poros de 0.2 mm que son mucho más grandes que los que aparecen al utilizar BAg-2. Los alambres de separación sirven de ayuda para centrar la holgura.



Figura 5. 28 Macrografía de Probeta H

La probeta H no tiene penetración del material de aporte BCuP-5.

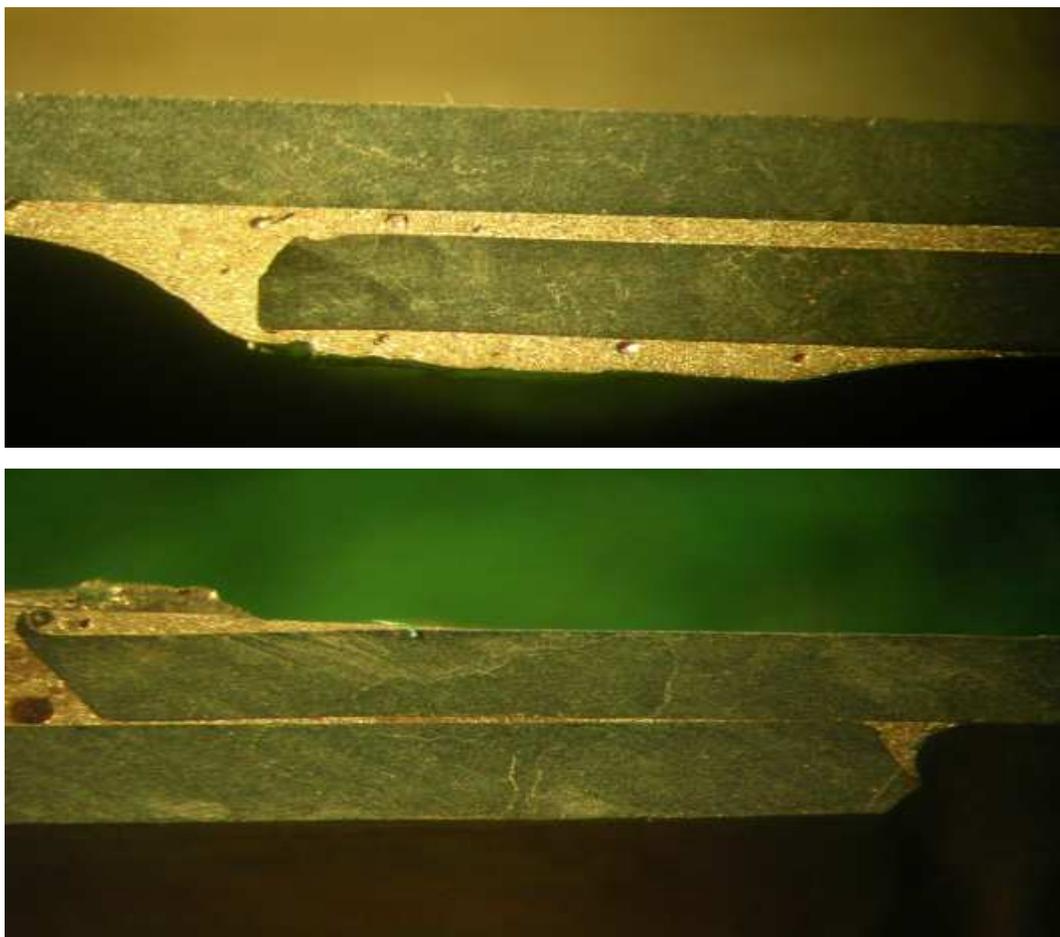


Figura 5. 29 Macrografía de Probeta I

En la probeta I el proceso de soldadura se realizó sin alambres de separación, se observa que el material de aporte BAg-2 ingresa por capilaridad incluso en holguras menores a 0.1mm, los poros se encuentran en la superficie exterior donde el material de aporte queda expuesto a temperatura ambiente.



Figura 5. 30 Macrografía de Probeta K

La probeta K (BAg-2) tiene buena penetración y la holgura está distribuida, se observan parte del alambre que se utiliza para centrar.



Figura 5. 31 Macrografía de Probeta N

En la probeta N (BCuP-5), no se logra penetración por capilaridad con este tipo de material de aporte.

Con las observaciones realizadas en el microscopio, se puede complementar el análisis del resto de ensayos que se aplicaron en las probetas.

El material de aporte en base de Plata BAg-2 (35% Ag) ingresa por capilaridad de manera exitosa en cualquier tipo de holgura y no se hallan poros en el espacio de llenado.

Por otra parte el material de aporte en base de Fósforo y Cobre BCuP5 (15% Ag) es fácil de manejar al momento de realizar la unión, esta varilla de aporte se funde a temperaturas más bajas, se arrastra con facilidad en la junta además de lograr un cordón con mejor aspecto, sin embargo no se logra la capilaridad en ninguna de las holguras y se observan mayor cantidad de defectos.

5.2.4.3 Metalografía

El objetivo de realizar la metalografía es observar de que manera se produce la adherencia entre los metales base y de aporte. Además determinar si existen cambios en la composición del metal base que en este caso se daría por precipitación de carburos de Cromo.

En la Figura 5.31 se puede observar en aumentos de 50x y 400 x, poca penetración del material BCuP5, además de porosidad y discontinuidades.

La Figura 5.32 corresponde a la metalografía del material BAg-2 en aumentos de 100x y 400x.

La penetración por capilaridad es buena con holgura incluso menor a 0,1 mm (ver también figura 4.68). Hay pequeños poros en la parte exterior de la junta y no existen discontinuidades.

En ambos casos se observa un acero inoxidable austenítico conformado en frío con tamaño de grano 0,035 ASTM. Las probetas fueron atacadas con reactivo Marble.

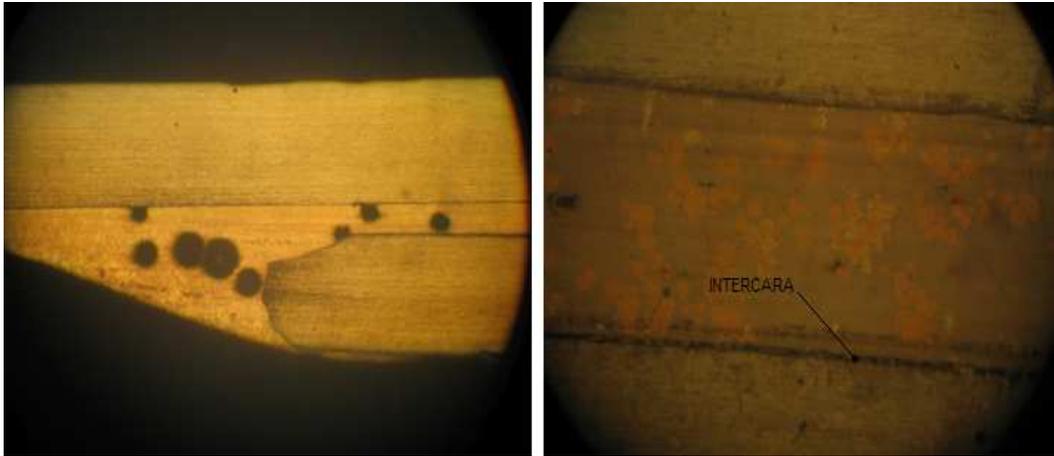


Figura 5. 32 Metalografía Material de Aporte BCuP 5. De izquierda a derecha 50x, 400x.

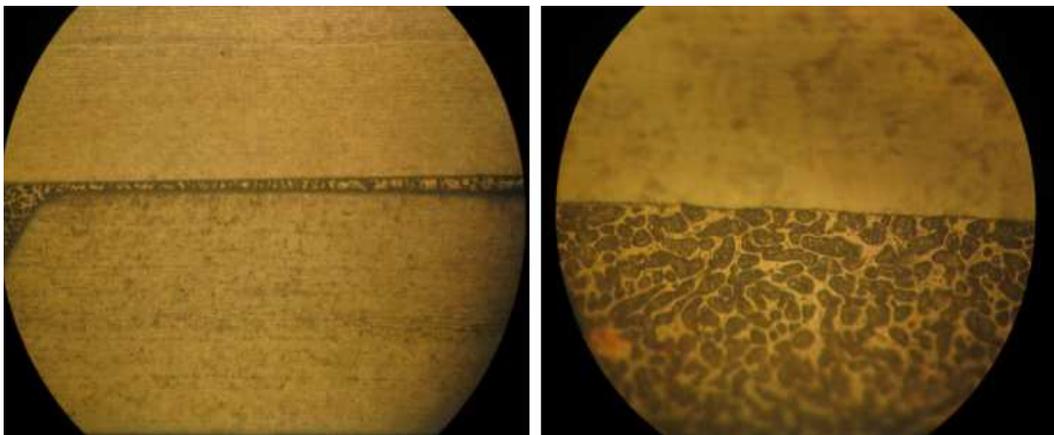


Figura 5. 33 Metalografía Material de Aporte BAg 2. De izquierda a derecha 100x, 400x.

El material de aporte BAg-2 presenta una apariencia de rugosidades a manera de huellas digitales, cuyos relieves proveen de un mejor sistema de anclaje con el material base. Por el contrario el material BCuP-5 presenta una intercara entre el metal base y de aporte y este último tiene apariencia lisa lo que no permite que las superficies se adhieran entre sí. En ninguno de los casos se observa precipitación de carburos. Los metales de aporte y base se distinguen por lo que se afirma que no hay difusión entre los mismos.

5.3 REGISTRO DE PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN (PQR).

Del proceso manual de soldadura fuerte y los ensayos realizados en las probetas se realiza un Registro de Procedimiento de Calificación (PQR). De los ensayos efectuados se concluye la validez de la varilla de aporte BAg-2 para este tipo de soldadura.

PQR REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN						
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO						
Norma: ASME IX Nombre de la Compañía: TESIS –EPN-000 N° de Identificación: 01 Especificación del Material: AISI 304 Proceso de Soldadura: Brazing Posición de Soldadura: 2F Especificación Metal Aporte: AWS BAg2			Fundente: Flux 1801 Gas: Butano 70 Propano 30 Pase Simple ⊗ Múltiple ○ Temperatura de Pre calentamiento: 180 °C Temperatura de Soldadura: 370 °C Temperatura de Post calentamiento: 360 °C			
INSPECCIÓN VISUAL						
Apariencia: Buena Porosidades: Poca porosidad Capilaridad: Excelente						
PRUEBA DE TRACCIÓN						
Probeta N°	Ancho (mm)	Penetración (mm)	Área (in ²)	Carga (lb)	Esfuerzo (psi)	Característica de Falla
1	50	10	0,77	7000	6052	en la soldadura
2	50	9,4	0,73	6400	8805	en la soldadura
3	50	7	0,54	6175	11408	en la soldadura
4	50	8,8	0,68	3900	5731	en la soldadura
PRUEBA DE DOBLADO						
Probeta N°	Tipo de Doblado		Resultado	Observaciones		
1	Externo		Cumple	Se ensayó 3 veces		
2	Interno		Cumple	Se ensayó 3 veces		
3	Externo		Cumple	Se ensayó 3 veces		
PRUEBA HIDROSTÁTICA						
Probeta N°	Presión (PSI)		Tiempo de prueba (min)	Resultado	Observaciones	
	Inicial	Final				
1	750	750	6	Hermético	No existen fugas	
2	800	800	12	Hermético	No existen fugas	
3	850	850	27	Hermético	No existen fugas	
Realizado por:		Revisado por:		Aprobado por:		
_____ Almeida Steeve _____ Villena Lizeth		Ing. Patricio Estupiñán Ing. Carlos Valladares Ing. Gabriel Velasteguí Dr. Víctor Guerrero		_____ Ing. Patricio Estupiñán		

Figura 5. 34 Registro del Procedimiento de Calificación (PQR) – Material de Aporte BAg 2

PQR REGISTRO DEL PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN						
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO						
Norma: ASME IX Nombre de la Compañía: TESIS –EPN-000 N° de Identificación: 02 Especificación del Material: AISI 304 Proceso de Soldadura: Brazing Posición de Soldadura: 2F Especificación Metal Aporte: AWS BCuP5				Fundente: Flux 1801 Gas: Butano 70 Propano 30 Pase Simple ⊗ Múltiple ○ Temperatura de Pre calentamiento: 170 °C Temperatura de Soldadura: 330 °C Temperatura de Post calentamiento: 450 °C		
INSPECCIÓN VISUAL						
Apariencia: Muy Buena Porosidades: Presenta varias Capilaridad: Regular						
PRUEBA DE TRACCIÓN						
Probeta N°	Ancho (mm)	Penetración (mm)	Área (in ²)	Carga (lb)	Esfuerzo (psi)	Característica de Falla
1	50	3	0,23	1900	8190	Falta de mojado
2	50	3	0,23	1125	4850	Falta de mojado
3	50	1,5	0,12	1000	8620	Falta de mojado
4	50	2	0,15	900	5820	Falta de mojado
PRUEBA DE DOBLADO						
Probeta N°	Tipo de Doblado	Resultado	Observaciones			
1	Interno	No cumple	No resiste cargas transversales ni vibraciones			
2	Externo	No cumple	No resiste cargas transversales ni vibraciones			
3	Interno	No cumple	No resiste cargas transversales ni vibraciones			
PRUEBA HIDROSTÁTICA						
Probeta N°	Presión (PSI)		Tiempo de prueba (minutos)	Resultado	Observaciones	
	Inicial	Final				
1	850	820	7	No hermético	Fuga como lágrima	
2	750	0	0	No hermético	Fuga como chorro	
3	700	0	0	No hermético	Fuga como chorro	
Realizado por:		Revisado por:		Aprobado por:		
_____ Almeida Steeve _____ Villena Lizeth		Ing. Patricio Estupiñán Ing. Carlos Valladares Ing. Gabriel Velasteguí Dr. Víctor Guerrero		_____ Ing. Patricio Estupiñán		

Figura 5. 35 Registro del Procedimiento de Calificación (PQR) – Material de Aporte BCuP 5.

5.4 ANÁLISIS FINAL DE RESULTADOS

Las dimensiones del dado se relacionan con el diámetro externo de la tubería a expandir, y la holgura que se desee obtener. La selección de la holgura permite que se produzca el efecto físico de capilaridad. La holgura se define como la separación de la junta e influye de manera importante sobre la resistencia mecánica de la unión. Dependiendo del material de aporte, el Manual de Soldadura AWS provee valores adecuados de separaciones; ya que si estas son demasiado grandes o pequeñas, el fundente puede quedar atrapado. En este estudio se determina que con holgura de 0,2 mm por lado se alcanza mayor resistencia mecánica implicando uniones limpias con mejor capilaridad.

Si el proceso de soldadura fuerte está bien realizado se puede alcanzar valores de resistencia mecánica incluso superiores a las del material base y aporte. Para cumplir este objetivo se debe: diseñar correctamente la junta (holgura, limpieza, alineación) y ejecutar apropiadamente el proceso de soldadura (material de aporte, fundente, sistema de suministro de calor, temperaturas apropiadas, tiempos de exposición, tratamiento térmico).

Luego de eliminar las rebabas y realizar la expansión de los tubos, el paso a seguir es la limpieza que consiste en pulir (lija, grata o cepillo metálico) para generar mayor rugosidad que favorezca la adherencia metal base – aporte, también eliminar restos de lubricante y realizar limpieza con sustancias no corrosivas al acero inoxidable austenítico. La alineación se puede realizar con separadores cuyo diámetro sea igual a la holgura de la junta, esto permitirá una distribución uniforme del metal de aporte, al mantener centrada la holgura.

El precalentamiento permite obtener soldaduras continuas con mayor capilaridad, este rango de temperatura debe ser menor que el sólido de la varilla de aporte (aproximadamente el 30%). El precalentamiento previene fragilidad en los cordones de soldadura e influye en la resistencia mecánica, valores de esta temperatura entre 150 °C y 200°C dan como resultado uniones con buena resistencia mecánica para los materiales de aporte BAg2 y BCuP5. El método de calentamiento con soplete, debe permitir realizar la soldadura sin producir sensibilización de la junta al alcanzar temperaturas entre 425 y 800 °C. En el caso de 800°C el tiempo de exposición se restringe a 30 segundos. En el

presente estudio el precalentamiento alcanza temperaturas y tiempos promedio de 175°C y 1 minuto. La mezcla de gas apropiada para realizar el proceso, con temperaturas menores a 1200°C, es Propano – Butano (30-70) y la llama debe regularse en neutra o ligeramente reductora. El calor debe direccionarse con movimiento aleatorio del soplete, en el sentido del cordón, con distancias de 2 a 5 cm entre la boquilla y la junta; Además evitar la localización del calor.

Luego del precalentamiento se aplica fundente alrededor de la junta, se puede utilizar ácido bórico (Bórax), se retoma el calentamiento y el cambio de coloración de blanco a transparente indica el inicio de trabajo con la varilla de aporte. Paralelamente se calienta la junta y la varilla de aporte.

El arrastre de la varilla de aporte en torno a la junta empieza cuando esta se funde formando la primera gota (temperaturas entre sólidos y líquidos). La temperatura para efectuar la soldadura está entre 300 y 500 °C y mientras se mantenga en este rango no influye en la resistencia mecánica. Para temperaturas de 600 °C el tiempo máximo de exposición debe ser 5 minutos y el tiempo para realizar el cordón de soldadura en la tubería de ½ in en este experimento es de 2 minutos.

La distancia mínima de traslape en la tubería de ½ in es de 2 mm, la inserción del tubo macho puede llegar hasta un valor igual al de su diámetro interno con lo que se define un valor de ½ pulgada (12.7 mm) para la garganta. Una unión con buena resistencia mecánica se logra cuando el material de aporte penetra en toda la distancia de traslape, esto depende de la selección del mismo y de la cantidad que se deposite en la junta. Experimentalmente se ocupa una varilla de aporte para realizar tres juntas (cada junta equivale a 50 mm). El costo de las varillas de aporte BAg 2 es mayor en una relación de 1.5 veces al costo de las varillas BCuP 5, aproximadamente BAg2 implica un costo de soldadura de 0,14 usd/cm y BCuP5, 0,09 usd/cm.

El postcalentamiento es un tratamiento térmico posterior a la soldadura y asegura la fluencia del material de aporte. Se lo debe realizar tomando en cuenta la sensibilización del material base. El rango de postsoldadura puede estar entre 350 y 500°C con tiempo de exposición de 1,5 minutos aproximadamente.

El tiempo en el proceso es útil para controlar la temperatura y establecer la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS). En todo el proceso de soldadura el suministro de calor debe ser uniforme para evitar penetración irregular del material de aporte. Al culminar el proceso de soldadura, la junta se enfría en agua y así se evita la precipitación de carburos de cromo. La limpieza posterior, impide corrosión y se puede realizar con cepillo metálico, grata, lija, etc.

El ensayo de tracción se realiza para obtener información de la resistencia mecánica de la junta con dos holguras y materiales de aporte diferentes. Este ensayo revela que con menor holgura (0,2 mm) y material aporte BAg2 se alcanzan mayores esfuerzos de tracción (máximo valor 11400 psi). El Manual de Soldadura AWS y algunas empresas comercializadoras recomiendan rangos de holgura según el material de aporte que se utilice. Trabajar en el rango de holgura recomendada garantiza buena resistencia mecánica. Los esfuerzos registrados para el material de aporte BCuP 5 aparentemente son altos (máximo valor 8600 psi); sin embargo después de efectuado el ensayo en estas probetas y por inspección visual, se pudo determinar poca: penetración, capilaridad y área de resistencia. Las 2 partes de la junta efectuada con BCuP5 se separan por deslizamiento de las superficies y no por arranque de material de aporte como se ve con el material BAg2. Realmente la carga que la probetas BCuP5 alcanzaron (1900 lb) fueron mucho menores que las de BAg2 (7000 lb). Se puede decir que las temperaturas de soldadura y postsoldadura no influyen en la resistencia mecánica mientras que el precalentamiento adecuado determina mejores resultados.

El objetivo de la tubería AISI 304, es la conducción de fluidos, en la aplicación específica de GLP la presión crítica es 250 psi. El análisis, de la soldadura de las tuberías, como cilindro de pared delgada presenta esfuerzos longitudinales y transversales (causados por esta presión crítica) mucho menores que la resistencia mecánica alcanzada en el ensayo, por lo que no podría haber riesgo de reventamiento.

El ensayo de hermeticidad pretende hallar las causas por las que se podrían producir fugas de fluidos a través de las soldaduras. Los parámetros de soldadura y prueba de estas probetas son similares sin embargo todas las probetas en las

que se utilizó el material de aporte BCuP5 presentaron fugas del fluido de prueba, con lo que se comprueba que el resultado es favorable considerando únicamente el material de aporte BAg2 y no las temperaturas del procedimiento.

Para realizar el ensayo de hermeticidad fue necesario realizar la soldadura fuerte de tubería de acero inoxidable con acoples de cobre, usando material de aporte BAg2; fue necesario calentar hasta 800°C con llama oxiacetilénica (debido al poco mojado que indica la gota de material de aporte) con mayor tiempo de exposición (4 minutos) que implicaría sensibilización de la junta. En el caso de realizar soldadura fuerte de materiales disímiles la holgura debe ser analizada según la expansión térmica de los materiales base porque no se establece holgura para este tipo de uniones en manuales o normas. Se confirma la hermeticidad de material BAg2 ya que ninguna de las uniones cobre-acero inoxidable presentó fugas. La unión directa acero inoxidable – cobre, sin anteponer accesorios de bronce (INEN 2260), implica el uso de mayor temperatura de soldadura generando corrosión intergranular, además de posibilidad de formar un par galvánico.

En este estudio, el ensayo de Doblado es un complemento del ensayo de tracción, y debido a que las probetas BCuP5 tienen poca penetración del material de aporte (pequeña área de traslape), al aplicar bajas cargas de flexión la unión se despega reafirmando que la resistencia mecánica de este material no es buena. Durante la preparación de las probetas BCuP5, se produjo falla de algunas por el efecto de las vibraciones de la herramienta de corte.

La inspección visual mediante macrografía ayuda a entender los resultados del resto de ensayos, porque se puede ver microscópicamente la calidad de la unión. En el caso del material BCuP5 no se observa penetración (o es muy irregular) en las holguras, además de presentar varios defectos como discontinuidades y poros. La falta de penetración y discontinuidades disminuyen la resistencia mecánica, y generan caminos por donde fuga el fluido de prueba.

El material de aporte BAg2 no presenta defectos en el traslape y tiene mejor fluidez que BCuP5, la capilaridad se logra incluso en holguras mucho menores a 0.1 mm (Figura 5.28). Con holguras pequeñas (no inferiores a las

recomendadas por las normas) y un proceso automático (en el que se asegure calentamiento y penetración uniformes) se puede lograr que la resistencia mecánica de la unión de soldadura sea mayor que la del material base y aporte, debido a que a esa escala el material de aporte se comportaría como una fibra de refuerzo en un material compuesto. El material de aporte (fibra) presenta una intercara con el metal base, mientras menor sea el espesor de la intercara hay menor concentración de esfuerzos y mayor adherencia. En este caso si los esfuerzos generados en el metal base (matriz de material compuesto) inician rotura, ésta no se transmite al material de aporte (fibra) y la falla no se produciría en la soldadura.

La intercara puede ser observada metalográficamente y además se determinan las características de adherencia entre los metales base y de aporte. BCuP 5 tiene una intercara de mayor espesor con superficie de apariencia lisa, motivo por el cual la unión de soldadura tiende a separarse con mayor facilidad al aplicar un esfuerzo. Por el contrario BAg 2 presenta rugosidades (huellas digitales) e intercara de menor espesor, que proporcionan mejor anclaje.

La soldadura fuerte no se produce por difusión de metal base con el de aporte y con el análisis metalográfico se corrobora este principio porque se distinguen claramente el material base y aporte.

El proceso de soldadura fuerte se puede aplicar en aceros inoxidable. El material de aporte BAg 2 en comparación con BCuP5 es el más indicado para realizar este tipo de uniones en tubería de ½ pulgada de acero inoxidable AISI 304 para conducción de fluidos. BAg2 tiene alta fluidez, penetra en cualquier holgura sin presentar defectos por lo que estas uniones son herméticas y con buena resistencia mecánica.

A pesar que la varilla BCuP 5 tiene costos bajos y es más fácil de manejar en el proceso de soldadura, desde el punto de vista estructural no conviene usarla, este material no presenta buen desempeño o resultados favorables en ningún ensayo que se realizó en la presente investigación.

Se comprueba que con un diseño de junta, procedimiento de soldadura adecuado y con el grupo de material de aporte BAg; es posible realizar la soldadura fuerte

en tubería de acero inoxidable austenítico destinado para instalaciones de gas licuado de petróleo. Este estudio contribuye la validez de las instalaciones de tubería de acero inoxidable con uniones permanentes por el método de soldadura fuerte. La Norma NTE INEN 2260 permite realizar estas instalaciones con tubería negra, de acero inoxidable y de cobre. De los 3 materiales mencionados el acero inoxidable tiene ventajas: mejor resistencia a la corrosión en comparación a la tubería negra; menores costos y mejor resistencia mecánica que el cobre. La tubería de acero inoxidable se fabrica localmente y además las instalaciones por medio de unión permanente con este material, no tiene restricciones como realizarlas embebidas con camisa de protección como ocurre en el caso de la tubería de cobre y la tubería de acero inoxidable instalada a través de uniones por alta compresión.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. Con este estudio se desarrolla una técnica para aplicar soldadura fuerte de tubería de acero inoxidable austenítico AISI 304 de ½ pulgada (espesor 0.8 mm) sin sensibilizar el material base.
2. Esta investigación de soldadura fuerte en acero inoxidable se anticipa a las necesidades futuras del mercado en el campo de conducción de gas. Estudios nacionales e internacionales de soldadura fuerte se han realizado solamente en Cobre, o se han desarrollado otras técnicas de unión con acero inoxidable que tampoco garantizan seguridad. Por tanto esta investigación es una nueva alternativa tecnológica para la industria ecuatoriana.
3. La tubería de acero inoxidable austenítico se fabrica localmente lo que implica menores costos en relación a la tubería importada de cobre. El ciclo de vida útil de las uniones realizadas con soldadura fuerte en acero inoxidable es superior.
4. La técnica de soldadura fuerte en acero inoxidable es sencilla, el proceso puede ser aplicado por personal técnico especializado siempre que, se mantengan los parámetros y recomendaciones del presente trabajo.
5. El proceso de soldadura fuerte en tubería de acero inoxidable puede realizarse directamente entre tramos de tubería sin necesidad de accesorios con la posibilidad de abaratar costos de fabricación.
6. En instalaciones de gas centralizado, el uso de tubería de acero inoxidable es una alternativa directa con la solución planteada en el presente estudio.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Un proceso de soldadura fuerte exitoso requiere: Limpieza, diseño apropiado de junta, selección de material de aporte y fundente, control del rango de temperatura, suministro de calor uniforme y tratamiento térmico final.
2. Se obtienen mejor hermeticidad y resistencia mecánica con materiales de aporte en base de Plata.
3. Menores holguras y precalentamiento en las juntas garantizan mejores resultados de resistencia mecánica.
4. Las rugosidades creadas durante el proceso de limpieza, además de eliminar partículas extrañas, aporta con adherencia a la soldadura.
5. Todo proceso de soldadura fuerte demanda ventilación por la toxicidad del material de aporte y fundente.
6. Lubricantes como grafito fino facilita la inserción del dado deformador.
7. Evitar calentamiento local de junta con movimiento aleatorio del soplete.
8. El fundente no debe ser escaso pero tampoco excesivo.
9. Para realizar soldadura fuerte de materiales disímiles, éstos deben precalentarse por separado.
10. Si se requieren varios pases, realizar precalentamiento alternado para cada repetición.

BIBLIOGRAFÍA

1. UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE. Departamento de Ingeniería Metalúrgica.<<http://www.metalurgiausach.cl/INTRODUCCION/Capitulo06INTROD.pdf>>. Capítulo 6: Aleaciones Hierro Carbono.
2. VAN VLACK. Elementos de la Ciencia de los Materiales. Editorial Continental. México. 1961.
3. LAUFGANG, S. Aceros Inoxidables. Termo Soldex S.A.. Argentina. 2003.<www.fi.uba.ar/materias/6713/ACEROS_INOXIDABLES.pdf>. 14.01.2006.
4. SUNARC - TECNOLOGÍA EN SOLDADURA. Metalurgia. <<http://www.sunarc.com/Documents/metalurgia.pdf>>.<www.sunarc.com>
5. SHAFFER. Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería. Editorial CECSA – Continental. Primera Edición. México. 2000.
6. DELATTRE, F. Soldadura de los Aceros Inoxidables. Editorial Urmo. España. 1972.
7. MEDRANO, J. Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas de las Juntas Soldadas de Aceros Inoxidables Austeníticos Mediante los Tratamientos Térmicos. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador. 2006.
8. CONDUIT. Información Técnica. Propiedades de los Aceros Inoxidables. <www.conduit.com.ec>. 2004.
9. ACERIND S.C. Corrosión. <<http://www.inoxidable.com/corrosion.htm>> 18-11-06.
10. AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). Handbook. Volumen 6. Welding, Brazing and Soldering. Octava Edición. Estados Unidos, 1993.
11. AMERICAN WELDING SOCIETY. (AWS). O` BRIEN. MANUAL DE SOLDADURA. Tomo II. CAPITULO 12. Soldadura Fuerte. Prentice Hall. Octava Edición. México. 1996.

12. ARGENTA LTDA. SOLDADURAS ESPECIALES. Materiales de Aportación para Soldadura de todos los Metales. Chile. <www.argenta.cl>. 2005.
13. METACONCEPT S.A.. Soldadura Fuerte. España. 2004. <www.metaconcept.fr>.
14. AMERICAN WELDING SOCIETY. SFA AWS A5.8. Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding. Estados Unidos. 1992.
15. PROCOBRE. Manual de Tubería de Cobre. México. <info@procobremexico.com.mx>.
16. AUFHAUSER Corporation. Aufhauser Silver Brazing Alloys Referente Guide. Nueva York. 2006. <www.brazing.com>.
17. CASTOLIN CORPORATION. Castolin Eutectic Technical Data Book. Canadá. 2007. <www.eutectic-na.com>.
18. ICONTEC. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 2505. Instalaciones para Suministro de Gas Combustible Destinadas a Usos Residenciales y Comerciales. Colombia. 2006.
19. CONDUITDEL ECUADOR S.A. Hidrinox. Ecuador. 2004 <www.conduit.com.ec>.
20. SPERKO, W. BRAZING DIMPLER CORPORATION. Brazing Copper Tubing Better and Faster. <www.brazingdimpler.com>. 2003.
21. UMSS. Facultad de Ciencias y Tecnología. Tecnología Mecánica II. Soldadura sin Difusión del Metal Base. Capítulo 4. <<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-44.pdf>>
22. NORMA CHILENA. NCh 2674. Cobre y Aleaciones de Cobre-Accesorios de unión Estampados a Soldar y Roscados - Para Tubos de Cobre. Chile. 2002.
23. COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC. Soldering and Brazing Copper Tube and Fittings. New York. 2005. <www.copper.org>.

24. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. INEN 2260. Instalaciones Para Gas Combustible en Edificaciones de Uso Residencial, Comercial o Industrial. Requisito. Ecuador. 2008. Primera revisión. Primera Edición.
25. TREPACO CIA. LTDA. PROCOBRE. Ecuador. <trepaco@hoy.net>. 2008.
26. MÁRQUEZ, C. CONDUIT DEL ECUADOR S.A. Especificaciones Técnicas. Denominación de la Tubería Hidrinox. Código DTP.15. Ecuador. 2004.
27. MEDASA S.A. Metales de Aportación. Aleaciones Soldadura Fuerte y Fundentes. España. <www.medasa.com>. 2006.
28. OBTESOL. Centro Tecnológico AIMEN. Observatorio Tecnológico de la Soldadura Brazing, Soldeo Fuerte. <www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=category§ionid=2&id=30&Itemid=32>.
29. VIAL C. Apuntes del Curso Metalurgia Física. Capítulo 7. Cobre y sus Aleaciones. <www2.ing.puc.cl/icm cursos/metalurgia/apuntes/cap7/>. 2002.
30. ACERIND S.C. Soldadura de los Aceros Inoxidables. Sección II: Para el Ingeniero de Materiales. <www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf >.
31. CONDUIT DEL ECUADOR S.A. La Revolución en Conducción de Agua. Video. <conduit@conduit.com.ec>. <www.conduit.com.ec>. Ecuador.
32. ELLENBERGER, Phillip. Piping Systems and Pipeline ASME B31 Code Simplified, McGraw Hill. Estados Unidos. 2005.
33. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME. Boiler and Pressure Vessel Code SECTION IX: Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators. Brazing Data. Estados Unidos. 2004.
34. MIROLIUBOV, I. Problemas de Resistencia de Materiales. Ediciones Bandeirantes. Brasil. 1985.

35. FERNANDEZ, S. CEDINOX. Seminario Sobre Dimensionamiento de Estructuras en Acero Inoxidable. España. 2006. <www.ceintec.upc.edu/Archivos/Acero_inox_familias_durabilidad_fabricacion.pdf>.
36. LENNTECH. Cobre, Agua Residual, Purificación del Aire y Tratamiento del Agua. <www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/cu.htm>. Holanda. 2008.
37. ARGENTA LTDA. Tecnología en Soldadura, Asistencia Técnica y Desarrollo, Capacitación – Brazing, Ensamblaje de las piezas. Chile. <www.argenta.cl/empresa/f_empresa.html>.
38. CASTOLIN EUTECTIC S.A. Sager Representante en Ecuador. Manual de Soldadura para Mantenimiento. Ecuador. 2007.
39. CAMPING STATION. COLEMAN. Butane Propane Fuel. 2009. <<http://www.campingstation.com/butanepropane-fuel-p-2169.html>>.
40. EMBRACO. Informaciones Generales Para Aplicación, Brasaje de los Tubos Compresores. <www.embraco.com>. Noviembre 2006.
41. LINDE GAS AGA. Catálogo de Electrodo Comunes, Especiales y Gases Para Corte y Soldadura. <www.aga.com>. Ecuador. 2006.
42. DAVIS, H. Ensaye e Inspección de los Materiales de Ingeniería. Editorial Continental. México. 1964.
43. THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM International. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. ASTM: E8. Estados Unidos. 2001.
44. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.9. Building Services Piping, Asme Code for Pressure Piping. Estados Unidos 1996.
45. JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. Light Gauge Stainless Steel Tubes for Ordinary Piping. JSA JIS: G 3448. Japón 2004.

46. THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
ASTM International. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. ASTM A240 / A240M - 09^a. Estados Unidos. 2009.
47. THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
ASTM International Specification for General Requirements for Specialized Carbon and Alloy Steel Pipe. ASTM A530 / A530M - 04^a. Estados Unidos. 2004.

ANEXOS

ANEXO 1

COD.: DTP.15

ESPECIFICACIONES TECNICAS

Revisión anterior: 07/11/02
Ultima Revisión: 21/06/04CONDUIT
DEL ECUADOR S.A.
**DENOMINACION DE LA TUBERIA: HIDRINOX
PRODUCIDO BAJO NORMA JIS G 3448
PARA CONDUCCION DE FLUIDOS:**
**DESCRIPCION: TUBOS DE ACERO INOXIDABLE 304 CON
COSTURA POR EL METODO TIG**


1.- DIMENSIONES Y PESOS

MEDIDA NOMINAL	EQUIV. PULGADAS	DIAMETRO EXTERNO mm.	TOLERANCIA EN DIAMETRO mm.	TOLERANCIA EN ESPESOR mm.	ESPESOR DE PARED mm.	PESO Kg/m
13	1/2"	15,88	-0,37	+/- 0,12	0,80	0,301
20	3/4"	22,22	-0,37	+/- 0,12	1,00	0,529
25	1"	28,58	-0,37	+/- 0,12	1,00	0,687
30	1 1/4"	34,00	+/- 0,34	+/- 0,12	1,20	0,980
40	1 1/2"	42,70	+/- 0,43	+/- 0,12	1,20	1,240
50	2"	48,60	+/- 0,49	+/- 0,12	1,20	1,420
60	2 1/2"	60,50	+/- 0,60	+/- 0,15	1,50	2,200

Los tubos se producen en longitudes de 4,00 m.

2. MATERIA PRIMA

Acero Inoxidable 304 bajo la norma ASTM A-240

3. PROPIEDADES MECANICAS

Resistencia a la tracción: Mínima 520N/mm²

Elongación: Mínima 35%

4. TOLERANCIAS

Longitud: ± 6,35 mm

5. RENDIMIENTOS

Presión de servicio en condiciones críticas 250 PSI

DIAME	13	20	25	30	40	50	60
PRUEBA HIDRA. Kg/cm ²	160	130	100	140	110	90	100
VIBRACION (2 millones de vibraciones)	SATISFACTORIO						
GOLPES DE PRESION A 40 Kg/cm ² (10.000 golpes)	SATISFACTORIO						

6. TIPO DE JUNTA DEL SISTEMA.

Las uniones del sistema se realizan bajo la norma: JWWA G-116-1982

ACOPLES DE CAÑOS DE ACERO INOXIDABLE PARA CAÑERIAS DE ACERO INOXIDABLE.

APLICACIÓN GAS GLP

El o ring está fabricado de NBR de alto porcentaje de Acrido Nitrilo.

El sistema HIDRINOX para gas satisface con la norma "DVGW DG-4550BL0118 ÖVGW G 2.663 System test marks".

Las uniones prensadas para la instalación de sistemas de gas satisfacen los requerimientos de la norma DVGW VP 614/ ÖVGW G1- TR - Gas y las presiones permitidas en ella.

COEFICIENTE DE LA EXPANSION														
10-6 mm oC (20 oC a 100 oC)	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	14,3	13,7	15,2	15,2	15,5	9,6	9,6	10	9,8
(20 oC a 500 oC)	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	19,6 a 1000 oC	18,2 a 1000 oC	19,0 a 800 oC	19,0 a 800 oC	19,2 a 800 oC	11,4	11,4	11,2	-
RESISTENCIA LECT. ESPECIFICA A TEMPS. BAJO TECHO														
Microhmios-cm a 20 oC	72	72	72	72	72	78	78	74	74	72	57	57	60	72
PERMEABILIDAD MAGNETICA														
a 200 H.	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,02	1,02	1,02	Magnético	Magnético	Magnético	Magnético
CALOR ESPECIFICO														
calorias/g oC (0100 oC)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11
RESISTENCIA LECT. ESPECIFICA A TEMPS. BAJO TECHO														
Microhmios-cm a 20 oC	72	72	72	72	72	78	78	74	74	72	57	57	60	72
PERMEABILIDAD MAGNETICA														
a 200 H.	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,02	1,02	1,02	Magnético	Magnético	Magnético	Magnético
NUMERO DE AISI	302	303	304	304L	308	309	310	316	316L	321	410	416	430	431
PROPS. MECANICAS A TEMPERATURAS BAJO TECHO														
Alargamiento en 50.8 mm. %	50	60	60	60	55	45	50	55	55	55	30	20	30	20
Reducción de área %	60	60	70	70	65	65	65	70	70	65	75	60	55	60
Carga de rotura kg/mm2	63,3	70,3	59,7	57	59,7	63,3	66,6	59,7	57	63,3	45,7	63,3	52,7	73,9
Dureza Brinel	165	160	150	145	150	165	165	165	150	150	160	180	155	220
Dureza Rockwell B	85	80	80	77	80	85	85	85	85	80	80	90	80	97

ANEXO 3

TABLA DE CORROSIÓN

SUBSTANCIA		Temperatura		Condición	Tipo	
		oC	oF		304	316
Acetato de etilo		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Acetileno		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Acetona		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Acido acético	Solución al 10%	21	70	Agitado	Muy resistente	Muy resistente
	Vapor al 30%	-	-	Caliente	Mediano	Resistente
	Vapor al 100%	-	-	Caliente	No resistente	Mediano
Acido benzoico		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Acido carbónico seco		-	-	-	Muy resistente	Muy resistente
Acido fosfórico	10%	-	-	Agitado	Muy resistente	Muy resistente
	10%	-	-	Ebullición	Muy resistente	Resistente
	25%	-	-	Ebullición	Resistente	Resistente
	40%	-	-	Ebullición	Poco resistente	Resistente
Acido hidrociorhídrico		21	70	-	No resistente	No resistente
Acido láctico	5%	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	10%	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	Concentrado	-	-	Ebullición	Mediano	Resistente
SUBSTANCIA		Temperatura		Condición	Tipo	
		oC	oF		304	316
Acido nítrico	5%	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	5%	-	-	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
	65%	-	-	Ebullición	Resistente	Resistente
	Concentrado	-	-	Ebullición	Resistente	Resistente
	Concentrado	-	-	Vaporización	Poco resistente	Poco resistente
Acido nitroso al 5%		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente

Acido oxálico	10%	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	50%	-	-	Ebullición	Poco resistente	Mediano
SUBSTANCIA		Temperatura		CONDICIÓN	TIPO	
		°C	°F		304	316
Acido sulfúrico	5%	21	70	-	Mediano	Resistente
	5%	-	-	Ebullición	No resistente	Mediano
	10%	21	70	-	Mediano	Resistente
	10%	-	-	Ebullición	No resistente	Poco resistente
	50%	21	70	-	Poco resistente	Mediano
	50%	-	-	Ebullición	No resistente	Poco resistente
	Concentrado	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	Concentrado	-	-	Ebullición	Poco resistente	Poco resistente
	Humeante	-	-	-	Mediano	Resistente
SUBSTANCIA		Temperatura		Condición	Tipo	
		oC	oF		304	316
Agua clorinada saturada		21	70	-	Mediano	Resistente
Agua de mar		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Agua oxigenada		21	70	-	Muy resistente	Resistente
Alcohol etílico		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
		-	-	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
Alcohol metílico		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Amoniaco	En general	21 - 100	70 - 212	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
	Anhídrido	43+	109+	Ventilado	No resistente	No resistente
	Hidróxido	-	-	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
Anhídrido acético	90% anhídrido	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	90% anhídrido	82	180	Ventilado	Poco resistente	Mediano
Azúcar (jugo)		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente

Bencina (benzal)		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Bórax solución al 5%		-	-	Caliente	Muy resistente	Muy resistente
Carbonato de calcio		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
SUBSTANCIA		Temperatura		CONDICIÓN	TIPO	
		°C	°F		304	316
Carbonato de sodio	5%	-	-	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
	50%	-	-	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
SUBSTANCIA		Temperatura		Condición	Tipo	
		oC	oF		304	316
Cerveza	Malta y mezclas	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	3.5% - 4.5%	71	160	-	Muy resistente	Muy resistente
Cloro	Gas	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	Gas seco	21	70	-	Poco resistente	Mediano
	Gas húmedo	100	212	-	No resistente	No resistente
Clorobenzina		-	-	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
Cloroformo seco		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Cloruro de acético seco		-	-	Caliente	Resistente	Resistente
Cloruro de aluminio		21	70	-	Poco resistente	Mediano
Cloruro de bario 5% y saturado		21	70	-	Resistente	Muy resistente
Cloruro de etileno		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Cloruro de etilo		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Cloruro de sodio	2%	21	70	Ventilado	Muy resistente	Muy resistente
	Saturado	-	-	Ebullición	Resistente	Muy resistente
Cloruro férrico	1% saturación	21	70	-	No resistente	No resistente
Cloruro ferroso	sol. saturada	21	70	-	No resistente	Mediano

Eter		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
SUBSTANCIA		Temperatura		Condición	Tipo	
		oC	oF		304	316
Flúor (gas)		21	70	-	No resistente	No resistente
Frutas (jugo)		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Gasolina		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
SUBSTANCIA		Temperatura		CONDICIÓN	TIPO	
		°C	°F		304	316
Hidróxido de sodio	20%	-	-	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
	30%	-	-	Ebullición	Resistente	Resistente
Leche		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Madera (pulpa)		21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
Monóxido de carbono		760	1400	-	Muy resistente	Muy resistente
		871	1600	-	Muy resistente	Muy resistente
Nitrato de sodio		-	-	-	Resistente	Muy resistente
Sulfato de aluminio	10%	-	-	Ebullición	Resistente	Muy resistente
	Saturado	-	-	Ebullición	Muy resistente	Muy resistente
Sulfato de amonia	5%	21	70	-	Muy resistente	Muy resistente
	10%	-	-	Caliente	Resistente	Muy resistente
Sulfato de cobre		100	212	-	Muy resistente	Muy resistente
Sulfito de sodio	25%	-	-	-	Muy resistente	Muy resistente
	50%	-	-	-	Muy resistente	Muy resistente
SUBSTANCIA		Temperatura		Condición	Tipo	
		oC	oF		304	316
Vegetales (jugo)		-	-	-	Muy resistente	Muy resistente
Vino		24	75	-	Muy resistente	Muy resistente
Whisky Escocés		-	-	-	Muy resistente	Muy resistente

ANEXO 4

Aufhauser Silver Brazing Alloys Reference Guide

		Nominal Composition											Appx. Wire Length-Inches (BcuP/lb) (Bag/to)			
AWS A5.8	Product name	Ag	Cu	Zn	Cd	P	Ni	Sn	Mn	Melt °F	Flow °F	Density	Color	0.031	0.062	0.09
Phos Copper SilverAlloys																
BCuP-2	PhosCopper 0	0	92.75			7.25				1310	1350	4.17 (.286)	Copper Yellow	4620	1150	510
BCuP-6	PhosCopper 2	2	91			7				1190	1300	4.21 (.289)	Light Copper	4570	1140	500
BCuP-3	PhosCopper 5	5	89			6				1190	1325	4.29 (.294)	Light Copper	4500	1120	490
BCuP-7	PhosCopper 5F	5	88.25			6.75				1190	1300	4.29 (.294)	Light Copper	4500	1120	490
-	PhosCopper 6D	6	87.9			6.1				1190	1465	4.29 (.294)	Light Copper	4500	1120	490
BCuP-4	PhosCopper 6F	6	86.75			7.25				1190	1275	4.29 (.294)	Light Copper	4500	1120	490
BCuP-5	PhosCopper 15	15	80			5				1190	1300	4.45 (.305)	Light Copper	4340	1080	475
-	PhosCopper 18M	18	75.75			6.25				1190	1220	4.40 (.302)	Light Yellow	4390	1100	487
Cadmium Bearing SilverAlloys																
-	SilverAlloy Cd-20	20	45	30	5					1140	1500	4.63	Light Yellow	285	70	31
BAG-27	SilverAlloy Cd-25	25	35	26.5	13.5					1125	1375	4.71	Light Yellow	280	70	30
BAG-33	SilverAlloy Cd-25L	25	30	27.5	17.5					1125	1260	4.67	Light Yellow	280	70	31
BAG-2a	SilverAlloy Cd-30	30	27	23	20					1125	1310	4.79	Light Yellow	275	65	30
BAG-2	SilverAlloy Cd-35	35	26	21	18					1125	1295	4.84	Light Yellow	270	65	30
BAG-1	SilverAlloy Cd-45	45	15	16	24					1125	1145	4.96	Light Yellow	265	65	25
BAG-1a	SilverAlloy Cd-50	50	15.5	16.5	18					1160	1175	4.98	Light Yellow	260	65	28
BAG-3	SilverAlloy Cd-50Ni3	50	15.5	15.5	16		3			1170	1270	5.02	Light Yellow	260	65	29
Cadmium Free SilverAlloys																
-	SilverAlloy A-5	5	58	37						1545	1615	4.47	Brass Yellow	295	70	32
-	SilverAlloy A-9	9	53	38						1410	1565	4.49	Brass Yellow	290	70	32
-	SilverAlloy A-20	20	45	35						1315	1500	4.58	Brass Yellow	285	70	32
-	SilverAlloy A-25	25	52.5	22.5						1250	1575	4.71	Brass Yellow	280	70	31
BAG-37	SilverAlloy A-25T	25	40	33				2		1265	1420	4.62	Light Yellow	285	70	31
BAG-20	SilverAlloy A-30	30	38	32						1250	1410	4.66	Light Yellow	280	70	31
BAG-35	SilverAlloy A-35	35	32	33						1260	1390	4.67	Light Yellow	280	70	31
BAG-34	SilverAlloy A-38T	38	32	28				2		1200	1330	4.77	Light Yellow	275	65	30
-	SilverAlloy A-40	40	36	24						1235	1415	4.79	Yellow White	275	65	30
BAG-4	SilverAlloy A-40Ni2	40	30	28			2			1220	1435	4.76	Light Yellow	275	65	30
-	SilverAlloy A-40Ni5	40	30	25			5			1220	1580	4.81	White	270	65	30
-	SilverAlloy A-40L	40	30.5	29.5						1245	1340	4.63	Yellow	285	70	31
BAG-28	SilverAlloy A-40T	40	30	28				2		1200	1310	4.76	Light Yellow	275	65	30
BAG-5	SilverAlloy A-45	45	30	25						1225	1370	4.8	Yellow White	270	65	30
BAG-36	SilverAlloy A-45T	45	27	25				3		1195	1270	4.72	Pale Yellow	275	70	31
BAG-22	SilverAlloy A-49NM	49	16	23			4.5	7.5		1260	1290	4.7	White	280	70	31
BAG-6	SilverAlloy A-50	50	34	16						1250	1425	4.92	Yellow White	265	65	29
BAG-24	SilverAlloy A-50Ni2	50	20	28			2			1220	1305	4.73	White	275	70	31
-	SilverAlloy A-50T	50	22	25				3		1190	1230	4.8	Pale Yellow	270	65	30
BAG-13	SilverAlloy A-54Ni1	54	40	5			1			1325	1575	5.07	White	260	65	29
BAG-7	SilverAlloy A-56T	56	22	17				5		1145	1205	4.96	White	265	65	29
-	SilverAlloy A-60	60	25	15						1245	1345	5.02	White	260	65	29
BAG-9	SilverAlloy A-65	65	20	15						1240	1325	5.06	White	260	65	29
BAG-10	SilverAlloy A-70	70	20	10						1275	1360	5.15	White	255	60	28
-	SilverAlloy A-75	75	22	3						1365	1450	5.24	White	250	60	28
Cd/Zn Free SilverAlloys																
-	SilverAlloy B-7T	7	85					8		1225	1805	4.8	Yellow	270	65	30
BAG-13a	SilverAlloy B-56Ni2	56	42				2			1420	1640	5.14	White	255	60	28
BAG-18	SilverAlloy B-60T	60	30					10		1115	1325	5.17	White	255	60	28
BAG-8	SilverAlloy B-72	72	28							1435	1435	5.24	White	250	60	28
-	SilverAlloy B-72Ni	71.5	28			0.5				1435	1450	5.27	White	250	60	27
-	SilverAlloy Z-75	75		25						1300	1345	5.06	White	260	65	29
BAG-23	SilverAlloy Z-85M	85						15		1760	1780	5.1	White	255	60	28
Layered SilverAlloys																
-	Layermet A-40Ni2									1220	1435					
-	Layermet A-40Ni5									1220	1580					
-	Layermet A-50Ni2									1220	1305					
-	Layermet Cd-50Ni3									1170	1270					

ANEXO 5

Aufhauser Silver Brazing Alloys Reference Guide

Product name	Description
Phos Copper SilverAlloys	
PhosCopper 0	Very fluid, fast flow and economical. Used with copper, brass, and bronze base metal with recommended joint clearance .001" to .003".
PhosCopper 2	Silver addition lowers solidus temperature, not as fluid as PhosCopper 0, gap clearance .001" to .003".
PhosCopper 5	Used when gap clearance range is .003 to .006". Ideal for larger copper pipe sizes.
PhosCopper 5F	For copper, brass or bronze. Slightly more fluid than PhosCopper 5 and PhosCopper 15. Used as preform rings for heat exchangers.
PhosCopper 6D	Developed to mimic performance of the PhosCopper 15 alloy at lower cost.
PhosCopper 6F	Reasonably fluid, similar to PhosCopper 0 in joint clearance of .001 to .003". Ideal flow as preform.
PhosCopper 15	Most versatile, easy to use. Best for unstable joint clearance (.002" to .006") and brazing temperature. High strength and ductility.
PhosCopper 18M	Automatic brazing of copper and copper products.
Cadmium Bearing SilverAlloys	
SilverAlloy Cd-20	Low silver at expense of broad melt range. Require rapid heating to prevent liquation.
SilverAlloy Cd-25	Less silver than SilverAlloy Cd-30 at the expense of increased melt temperature and range.
SilverAlloy Cd-25L	Similar to SilverAlloy Cd-25 but requires better heat control. Reduced melt range but more prone to oxidation.
SilverAlloy Cd-30	Less silver than SilverAlloy Cd-35 at the expense of increased melt temperature and range.
SilverAlloy Cd-35	Broader melt range than SilverAlloy Cd-45. Suitable for larger gap clearance and easier filleting.
SilverAlloy Cd-45	Lowest melting range in joining ferrous, non-ferrous and dissimilar metals with close joint clearance requirement.
SilverAlloy Cd-50	Similar to SilverAlloy Cd-45 properties with narrower melt range. Used on same base metals.
SilverAlloy Cd-50Ni3	Universal alloy in joining of carbide tool assemblies. Nickel addition improves corrosion resistance in marine environment and caustic media.
Cadmium Free SilverAlloys	
SilverAlloy A-5	Used for simultaneous brazing and heat-treating of steels. Improved ductility to the brass brazing alloys.
SilverAlloy A-9	Good color match to band instruments and other brass assemblies. Compatible to heat-treat cycles of carbon steel.
SilverAlloy A-20	Excellent temperature match to heat treatment of carbon steels. Good color match to yellow brass assemblies.
SilverAlloy A-25	Less silver than SilverAlloy A-30 at the expense of increased melt temperature and range. Moderate ductility.
SilverAlloy A-25T	Least silver of the Ag-Cu-Zn-Sn family. Moderate ductility limits joint design and application.
SilverAlloy A-30	Good for refrigeration assemblies where higher temperatures can be employed. Good for copper, nickel-silvers, and other non ferrous alloys.
SilverAlloy A-35	Dissimilar metals brazing in refrigeration tubing. Moderate melt temperature for ferrous and non-ferrous alloys.
SilverAlloy A-38T	Similar melt temperatures to cadmium-bearing SilverAlloy Cd-30 and SilverAlloy Cd-35. Suitable for ferrous and non-ferrous metals.
SilverAlloy A-40	For nickel, steel and copper alloys, good wide gap filling characteristics.
SilverAlloy A-40Ni2	Good corrosion properties with stainless steels. Often used in joining of tungsten carbides.
SilverAlloy A-40Ni5	Similar applications as SilverAlloy A-40Ni2 and A-50Ni2. with broader melt range for better gap filling characteristics.
SilverAlloy A-40L	Narrower melt range suitable for furnace brazing of steel, nickel, copper alloys. Good ductility.
SilverAlloy A-40T	Intermediate melt temperatures of the tin containing family. Used in joining ferrous and non ferrous.
SilverAlloy A-45	General purpose alloy for brazing of ferrous and non-ferrous metals. Excellent replacement to Cd containing alloys.
SilverAlloy A-45T	Good for dissimilar metals with moderate flow characteristics.
SilverAlloy A-49NM	Low temperature melting alloy for joining carbides and ferrous alloys.
SilverAlloy A-50	Widely used for electrical applications and in joining dissimilar metals.
SilverAlloy A-50Ni2	Used with 300 series stainless in Food, Medical and Dental fields. Good Cd free alternative for SilverAlloy Cd-50Ni3 in carbide brazing.
SilverAlloy A-50T	Similar to SilverAlloy A-56T at expense of increased melt temperature and range.
SilverAlloy A-54Ni1	Low zinc suitable for furnace brazing. Good for elevated service temperatures to 700 °F. used for carbon assemblies.
SilverAlloy A-56T	Excellent replacement to cadmium containing alloys when low melt temp. is required. Good corrosion properties. Color match to stainless.
SilverAlloy A-60	Similar to SilverAlloy A-65. Good for nickel and silver alloys.
SilverAlloy A-65	Third lowest melt alloy of the "Silversmith Alloys". Good color match to silver.
SilverAlloy A-70	Used on sterling silver, next lower melt temperature below SilverAlloy A-75 in step brazing.
SilverAlloy A-75	Used on sterling silver. Excellent color match to silver, highest melting of "Silversmith Alloys".
Cd/Zn Free SilverAlloys	
SilverAlloy B-7T	Good for vacuum and atmosphere brazing. A replacement to copper braze when lower melt temperature is required.
SilverAlloy B-56Ni2	Good for elevated application to 700 °F. Low zinc content reduces zinc deposit within furnace during brazing operation.
SilverAlloy B-60T	Excellent for furnace and vacuum brazing. Good corrosion resistance to marine environment.
SilverAlloy B-72	Good for atmosphere and vacuum furnace brazing of ferrous and non-ferrous alloys. Used in critical electronic and aerospace brazements.
SilverAlloy B-72Ni05	Similar to SilverAlloy B-72 Cd Free with nickel addition to impart improved corrosion properties with stainless steel.
SilverAlloy Z-75	Joining of steel and stainless steel assemblies that come into contact with ammonia (NH ₃).
SilverAlloy Z-85M	Brazing of specialty steels and alloy used in high temperature service.
Layered SilverAlloys	
Layermet A-40Ni2	Similar to Layermet A-50Ni2 with higher brazing temperature, also exhibit good strength and wetting action on carbide.
Layermet A-40Ni5	Similar to Layermet A-40Ni2 with higher nickel for strength and corrosion resistance.
Layermet A-50Ni2	A popular cadmium-free tri-layered silver-copper-silver strip in 1/2/1 ratio that delivers superb performance in carbide brazing applications.
Layermet Cd-50Ni3	A cadmium bearing Layermet with exceptional strength, flow characteristics, and extremely low brazing temperature.

ANEXO 6

Aufhauser Silver Brazing Alloys Reference Guide

Available Specifications									
Product name	AMS	AWS A5.8	BS 1845	DIN 8513	Federal QQ-B-654A ⁽¹⁾	ISO 3677	NFA 81-362	Handy & Harman	JW Harris
PhosCopper SilverAlloys									
PhosCopper 0	-	BCuP-2	CP 3	L-Cu P 7	BCuP-2 ⁽²⁾	B Cu 93P 710-820	07 B1	Fos-Flo 7	Harris 0
PhosCopper 2	-	BCuP-6	CP 2	L-Ag 2 P	-	B Cu 92P Ag 645-800	06 B1	Sil-Fos 2	Stay-Silv 2
PhosCopper 5	-	BCuP-3	CP 4	L-Ag 5 P	BCuP-3 ⁽²⁾	B Cu 89P Ag 645-780	06 B2	Sil-Fos 5	Stay-Silv 5
PhosCopper 5F	-	BCuP-7	-	-	-	B Cu 89P Ag 645-770	-	Sil-Fos SHP	Stay-Silv 5HP
PhosCopper 6D	-	-	-	-	-	-	-	-	Dynaflow
PhosCopper 6F	-	BCuP-4	-	-	BCuP-4 ⁽²⁾	-	-	Sil-Fos 6	Stay-Silv 6HP
PhosCopper 15	-	BCuP-5	-	L-Ag 15 P	BCuP-5	B Cu 80 Ag P 645-770	05 B1	Sil-Fos	Stay-Silv 15
PhosCopper 18M	-	-	-	-	-	-	-	Not Available	Not Available
Cadmium Bearing SilverAlloys									
SilverAlloy Cd-20	-	-	-	-	-	-	-	-	Not Available
SilverAlloy Cd-25	-	BAG-27	-	-	-	-	-	Easy-Flo 25	Not Available
SilverAlloy Cd-25L	-	BAG-33	-	L-Ag 25 Cd	-	B Cu 33 Zn Ag Cd 605-720	-	-	Not Available
SilverAlloy Cd-30	-	BAG-2a	AG 12	L-Ag 30 Cd	-	B Ag 30 Cd Zn Cu 600-690	30 A1	Easy-Flo 30	Not Available
SilverAlloy Cd-35	4768	BAG-2	-	-	VIII	B Ag 35 Cd Zn Cu 610-700	35 A1	Easy-Flo 35	Not Available
SilverAlloy Cd-45	4769	BAG-1	-	L-Ag 45 Cd	VII	B Ag 45 Cd Zn Cu 620-635	45 A1	Easy-Flo 45	Not Available
SilverAlloy Cd-50	4770	BAG-1a	AG 1	L-Ag 50 Cd	IV	B Ag 50 Cd Zn Cu 620-640	50 A1	Easy-Flo 50	Not Available
SilverAlloy Cd-50Ni3	4771	BAG-3	AG 9	-	V	B Ag 50 Cd Zn Ni 635-685	50 A2	Easy-Flo 3	Not Available
Cadmium Free SilverAlloys									
SilverAlloy A-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy A-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy A-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy A-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy A-25T	-	BAG-37	-	L-Ag-25Sn	-	B Cu 40Zn Ag Sn 680-760	25 A2	Braze 255	Safety-Silv 25
SilverAlloy A-30	-	BAG-20	-	L-Ag 30	BAG-20	B Cu 38Zn Ag 650-750	-	Braze 300	Safety-Silv 30
SilverAlloy A-35	-	BAG-35	-	-	-	B Ag 35 Zn Cu 680-750	-	-	Safety-Silv 35
SilverAlloy A-38T	4761	BAG-34	-	-	-	B Ag 38 Cu Zn Sn 650-720	-	Braze 380	Safety-Silv 38T
SilverAlloy A-40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy A-40Ni2	-	BAG-4	-	-	BAG-4	B Ag 40 Cu Zn Ni 670-780	-	Braze 403	Safety-Silv 40N2
SilverAlloy A-40Ni5	-	-	-	-	-	-	-	Braze 404	Safety-Silv 40N5
SilverAlloy A-40L	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy A-40T	-	BAG-28	-	L-Ag 40Sn	-	B Ag 40 Cu Zn Sn 640-680	-	Braze 402	Safety-Silv 40T
SilverAlloy A-45	-	BAG-5	-	-	BAG-5	B Ag 45 Zn Cu 660-740	45 A2	Braze 450	Safety-Silv 45
SilverAlloy A-45T	-	BAG-36	-	L-Ag 45Sn	-	B Ag 45 Cu Zn Sn 640-680	-	Braze 452	Safety-Silv 45T
SilverAlloy A-49NM	-	BAG-22	AG 18	L-Ag 49	BAG-22	B Ag 49 Zn Cu Mn Ni 625-705	-	-	-
SilverAlloy A-50	-	BAG-6	-	-	-	-	-	Braze 501	Safety-Silv 50
SilverAlloy A-50Ni2	4788	BAG-24	-	-	-	B Ag 50 ZnCu Ni 660-750	-	Braze 505	Safety-Silv 50N
SilverAlloy A-50T	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy A-54Ni1	4772	BAG-13	-	-	-	-	-	Braze 541	Safety-Silv 54
SilverAlloy A-56T	4763	BAG-7	AG 20	-	BAG-7	B Ag 56 Cu Zn Sn 620-650	56 A1	Braze 560	Safety-Silv 56
SilverAlloy A-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy A-65	-	BAG-9	-	-	BAG-9	B Ag 65 Zn Cu 670-720	63 A1	Braze 650	Safety-Silv 65
SilverAlloy A-70	-	BAG-10	-	-	BAG-10	-	-	Braze 700	Safety-Silv 70
SilverAlloy A-75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd/Zn Free SilverAlloys									
SilverAlloy B-7T	4766	-	-	-	-	-	-	Braze 852	Safety-Silv 85
SilverAlloy B-56Ni2	4773	BAG-13a	-	-	BAG-13a	B Ag 60 Cu Sn 600-720	60 A1	Braze 603	Safety-Silv 60T
SilverAlloy B-60T	-	BAG-18	-	-	BAG-18	-	-	-	-
SilverAlloy B-72	-	BAG-8	-	-	-	-	-	-	-
SilverAlloy B-72Ni05	4765	-	-	-	-	-	-	Braze 559	Safety-Silv 56N
SilverAlloy Z-75	4774	-	-	-	-	-	-	Braze 630	Safety-Silv 63T
SilverAlloy Z-85M	-	BAG-23	-	-	BAG-23	-	-	-	-
Layered SilverAlloys									
Layermet A-40Ni2	-	-	-	-	-	-	-	Trimet 201	Ag Clad 40Ni2
Layermet A-40Ni5	-	-	-	-	-	-	-	Trimet 202	-
Layermet A-50Ni2	-	-	-	-	-	-	-	Trimet 259	-
Layermet Cd-50Ni3	-	-	-	-	-	-	-	Trimet 258	-

⁽¹⁾ QQ-B-650C, QQ-B-654, QQ-S-561D, MIL-B-15395 Superseded by QQB-654A.⁽²⁾ QQ-B-650B Superseded by AWS A5.8.

ANEXO 7

SFA-5.8

2001 SECTION II

TABLE A1
SOLIDUS, LIQUIDUS, AND BRAZING TEMPERATURE RANGES*

AWS Classification	Solidus		Liquidus		Brazing Temperature Range	
	°F	°C	°F	°C	°F	°C
SILVER						
B _{Ag} -1	1125	607	1145	618	1145-1400	618-760
B _{Ag} -1a	1160	627	1175	635	1175-1400	635-760
B _{Ag} -2	1125	607	1295	702	1295-1550	702-843
B _{Ag} -2a	1125	607	1310	710	1310-1550	710-843
B _{Ag} -3	1170	632	1270	688	1270-1500	688-816
B _{Ag} -4	1240	671	1435	779	1435-1650	779-899
B _{Ag} -5	1225	663	1370	743	1370-1550	743-843
B _{Ag} -6	1270	688	1425	774	1425-1600	774-871
B _{Ag} -7	1145	618	1205	652	1205-1400	652-760
B _{Ag} -8	1435	779	1435	779	1435-1650	779-899
B _{Ag} -8a	1410	766	1410	766	1410-1600	766-871
B _{Ag} -9	1240	671	1325	718	1325-1550	718-843
B _{Ag} -10	1275	691	1360	738	1360-1550	738-843
B _{Ag} -13	1325	718	1575	857	1575-1775	857-968
B _{Ag} -13a	1420	771	1640	893	1600-1800	871-982
B _{Ag} -18	1115	602	1325	718	1325-1550	718-843
B _{Ag} -19	1400	760	1635	891	1610-1800	877-982
B _{Ag} -20	1250	677	1410	766	1410-1600	766-871
B _{Ag} -21	1275	691	1475	802	1475-1650	802-899
B _{Ag} -22	1260	680	1290	699	1290-1525	699-830
B _{Ag} -23	1760	960	1780	970	1780-1900	970-1038
B _{Ag} -24	1220	660	1305	750	1305-1550	750-843
B _{Ag} -26	1305	705	1475	800	1475-1600	800-870
B _{Ag} -27	1125	605	1375	745	1375-1575	745-860
B _{Ag} -28	1200	649	1310	710	1310-1550	710-843
B _{Ag} -33	1125	607	1260	682	1260-1400	681-760
B _{Ag} -34	1200	649	1330	721	1330-1550	721-843
B _{Ag} -35	1265	685	1390	754	1390-1545	754-841
B _{Ag} -36	1195	646	1251	677	1251-1495	677-813
B _{Ag} -37	1270	688	1435	779	1435-1625	779-885
B _{VAg} -0	1761	961	1761	961	1761-1900	961-1038
B _{VAg} -6b	1435	779	1602	872	1600-1800	871-982
B _{VAg} -8	1435	779	1435	779	1435-1650	779-899
B _{VAg} -8b	1435	779	1463	795	1470-1650	799-899
B _{VAg} -18	1115	602	1325	718	1325-1550	718-843
B _{VAg} -29	1155	624	1305	707	1305-1450	707-788
B _{VAg} -30	1485	807	1490	810	1490-1700	810-927
B _{VAg} -31	1515	824	1565	852	1565-1625	852-885
B _{VAg} -32	1650	900	1740	950	1740-1800	950-982
GOLD						
B _{Au} -1	1815	991	1860	1016	1860-2000	1016-1093
B _{Au} -2	1635	891	1635	891	1635-1850	891-1010
B _{Au} -3	1785	974	1885	1029	1885-1995	1029-1091
B _{Au} -4	1740	949	1740	949	1740-1840	949-1004
B _{Au} -5	2075	1135	2130	1166	2130-2250	1166-1232
B _{Au} -6	1845	1007	1915	1046	1915-2050	1046-1121
B _{V Au} -2	1635	891	1635	891	1635-1850	891-1010
B _{V Au} -4	1740	949	1740	949	1740-1840	949-1004
B _{V Au} -7	2015	1102	2050	1121	2050-2110	1121-1154
B _{V Au} -8	2190	1200	2265	1240	2265-2325	1240-1274

PART C — SPECIFICATIONS FOR WELDING RODS,
ELECTRODES, AND FILLER METALS

SFA-5.8

TABLE A1 (CONT'D)
SOLIDUS, LIQUIDUS, AND BRAZING TEMPERATURE RANGES*

AWS Classification	Solidus		Liquidus		Brazing Temperature Range	
	°F	°C	°F	°C	°F	°C
PALLADIUM						
BVPd-1	2245	1230	2255	1235	2255-2285	1235-1252
ALUMINUM						
BAISi-2	1070	577	1142	617	1110-1150	599-621
BAISi-3	970	521	1085	585	1060-1120	571-604
BAISi-4	1070	577	1080	582	1080-1120	582-604
BAISi-5	1070	577	1095	591	1090-1120	588-604
BAISi-7	1038	559	1105	596	1090-1120	588-604
BAISi-9	1044	562	1080	582	1080-1120	582-604
BAISi-11	1038	559	1105	596	1090-1120	588-604
COPPER						
BCu-1	1981	1083	1981	1083	2000-2100	1093-1149
BCu-1a	1981	1083	1981	1083	2000-2100	1093-1149
BVCu-1X	1981	1083	1981	1083	2000-2100	1093-1149
BCu-2	1981	1083	1981	1083	2000-2100	1093-1149
RCuZn-A	1630	888	1650	899	1670-1750	910-954
RCuZn-B	1590	866	1620	882	1620-1800	882-982
RCuZn-C	1590	866	1630	888	1670-1750	910-954
RCuZn-D	1690	921	1715	935	1720-1800	938-982
BCuP-1	1310	710	1695	924	1450-1700	788-927
BCuP-2	1310	710	1460	793	1350-1550	732-843
BCuP-3	1190	643	1495	813	1325-1500	718-816
BCuP-4	1190	643	1325	718	1275-1450	691-788
BCuP-5	1190	643	1475	802	1300-1500	704-816
BCuP-6	1190	643	1450	788	1350-1500	732-816
BCuP-7	1190	643	1420	771	1300-1500	704-816
NICKEL						
BNi-1	1790	977	1900	1038	1950-2200	1066-1204
BNi-1a	1790	977	1970	1077	1970-2200	1077-1204
BNi-2	1780	971	1850	999	1850-2150	1010-1177
BNi-3	1800	982	1900	1038	1850-2150	1010-1177
BNi-4	1800	982	1950	1066	1850-2150	1010-1177
BNi-5	1975	1079	2075	1135	2100-2200	1149-1204
BNi-5a	1931	1065	2111	1150	2100-2200	1149-1204
BNi-6	1610	877	1610	877	1700-2000	927-1093
BNi-7	1630	888	1630	888	1700-2000	927-1093
BNi-8	1800	982	1850	1010	1850-2000	1010-1093
BNi-9	1930	1055	1930	1055	1950-2200	1066-1204
BNi-10	1780	970	2020	1105	2100-2200	1149-1204
BNi-11	1780	970	2003	1095	2100-2200	1149-1204
COBALT						
BCo-1	2050	1120	2100	1149	2100-2250	1149-1232
MAGNESIUM						
BMg-1	830	443	1110	599	1120-1160	604-627

*Solidus and liquidus shown are for the nominal composition in each classification.

TABLE 1
CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS FOR SILVER FILLER METALS

AWS Classification	UNS Number ^a	Composition, Weight Percent										Other Elements, Total ^b		
		Ag	Cu	Zn	Cd	Ni	Sn	Li	Mn					
BAG-1	P07450	44.0-46.0	14.0-16.0	14.0-18.0	23.0-25.0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-1a	P07500	49.0-51.0	14.5-16.5	14.5-18.5	17.0-19.0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-2	P07350	34.0-36.0	25.0-27.0	19.0-23.0	17.0-19.0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-2a	P07300	29.0-31.0	26.0-28.0	21.0-25.0	19.0-21.0	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-3	P07501	49.0-51.0	14.5-16.5	13.5-17.5	15.0-17.0	2.5-3.5	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-4	P07400	39.0-41.0	29.0-31.0	26.0-30.0	—	1.5-2.5	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG 5	P07453	44.0-46.0	29.0-31.0	23.0-27.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-6	P07503	49.0-51.0	33.0-35.0	14.0-18.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-7	P07563	55.0-57.0	21.0-23.0	15.0-19.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-8	P07720	71.0-73.0	Remainder	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-8a	P07723	71.0-73.0	Remainder	—	—	—	—	0.25-0.50	—	—	—	—	—	0.15
BAG-9	P07650	64.0-66.0	19.0-21.0	13.0-17.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-10	P07700	69.0-71.0	19.0-21.0	8.0-12.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-13	P07540	53.0-55.0	Remainder	4.0-6.0	—	0.5-1.5	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-13a	P07560	55.0-57.0	Remainder	—	—	1.5-2.5	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-18	P07600	59.0-61.0	Remainder	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-19	P07925	92.0-93.0	Remainder	—	—	—	—	0.15-0.30	—	—	—	—	—	0.15
BAG-20	P07301	29.0-31.0	37.0-39.0	30.0-34.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-21	P07630	62.0-64.0	27.5-29.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-22	P07490	48.0-50.0	15.0-17.0	21.0-25.0	—	—	—	—	—	—	—	—	7.0-8.0 Remainder	0.15
BAG-23	P07850	84.0-86.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-24	P07505	49.0-51.0	19.0-21.0	26.0-30.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-26	P07250	24.0-26.0	37.0-39.0	31.0-35.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-27	P07251	24.0-26.0	34.0-36.0	24.5-28.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-28	P07401	39.0-41.0	29.0-31.0	26.0-30.0	12.5-14.5	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-33	P07252	24.0-26.0	29.0-31.0	26.5-28.5	16.5-18.5	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-34	P07380	37.0-39.0	31.0-33.0	26.0-30.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-35	P07351	34.0-36.0	31.0-33.0	31.0-35.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-36	P07454	44.0-46.0	26.0-28.0	23.0-27.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15
BAG-37	P07253	24.0-26.0	39.0-41.0	31.0-35.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15

NOTES:

a. SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys.

b. The brazing filler metal shall be analyzed for those specific elements for which values are shown in this table. If the presence of other elements is indicated in the course of this work, the amount of those elements shall be determined to ensure that their total does not exceed the limit specified.

See Table A2 for discontinued brazing filler metal classification.

See Table 6 for the following Ag classifications not included here: BVAg-0, BVAg-6b, BVAg-8b, BVAg-29 to BVAg-32.

TABLE 4
CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS FOR COPPER, COPPER-ZINC, AND COPPER-PHOSPHORUS FILLER METALS

AWS		Chemical Composition, Weight Percent ^a											Other
Classification	UNS Number ^b	Cu	Ag	Zn	Sn	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Al	Si	Elements, Total ^c
BCu-1	C14180	99.90 min	—	—	—	—	—	—	0.075	0.02	0.01*	—	0.10 ^f
BCu-1a	—	99.00 min ^d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.30 ^d
BCu-2 ^e	—	86.50 min	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.50
RBCuZn-A ^f	C47000	57.0-61.0	—	Remainder	0.25-1.00	*	*	—	—	0.05*	0.01*	—	0.50 ^f
RBCuZn-B ^f	C68000	56.0:MIN:60.0 ^g	—	Remainder	0.80-1.10	0.25-1.20	0.01-0.50	0.20-0.80 ^h	—	0.05*	0.01*	0.04-0.15	0.50 ^f
RBCuZn-C ^f	C68100	56.0-60.0	—	Remainder	0.80-1.10	0.25-1.20	0.01-0.50	—	—	0.05*	0.01*	0.04-0.15	0.50 ^f
RBCuZn-D ^f	C77300	46.0-50.0	—	Remainder	—	—	—	9.0-11.0	0.25	0.05*	0.01*	0.04-0.25	0.50 ^f
BCuP-1	C55180	Remainder	—	—	—	—	—	—	4.8-5.2	—	—	—	0.15
BCuP-2	C55181	Remainder	—	—	—	—	—	—	7.0-7.5	—	—	—	0.15
BCuP-3	C55281	Remainder	4.8-5.2	—	—	—	—	—	5.8-6.2	—	—	—	0.15
BCuP-4	C55283	Remainder	5.8-6.2	—	—	—	—	—	7.0-7.5	—	—	—	0.15
BCuP-5	C55284	Remainder	14.5-15.5	—	—	—	—	—	4.8-5.2	—	—	—	0.15
BCuP-6	C55280	Remainder	1.8-2.2	—	—	—	—	—	6.8-7.2	—	—	—	0.15
BCuP-7	C55282	Remainder	4.8-5.2	—	—	—	—	—	6.5-7.0	—	—	—	0.15

NOTES:

- a. Single values are maximum, unless noted.
- b. SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys.
- c. The filler metal shall be analyzed for those specific elements for which values or asterisks are shown in this table. If the presence of other elements is indicated in the course of this work, the amount of those elements shall be determined to ensure that their total does not exceed the limit specified.
- d. The balance is oxygen, present as cuprous oxide. Oxygen is not to be included in "Other Elements."
- e. These chemical composition requirements pertain only to the cuprous oxide powder and do not include requirements for the organic vehicle in which the cuprous oxide is suspended, when supplied in paste form.
- f. The total of all other elements including those for which a maximum value or asterisk is shown, shall not exceed the value specified in "Other Elements, Total."
- g. Silver residual is included in Cu analysis.
- h. Includes cobalt.

TABLE 3
CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS FOR ALUMINUM AND MAGNESIUM FILLER METALS

AWS Classification	UNS Number ^b	Chemical Composition, Weight Percent ^a											Other Elements ^c		
		Si	Cu	Mg	Bi	Fe	Zn	Mn	Cr	Ni	Ti	Be	Al	Each	Total
BAISI-2	A94343	6.8-8.2	0.25	—	—	0.8	0.20	0.10	—	—	—	—	Remainder	0.05	0.15
BAISI-3	A94145	9.3-10.7	3.3-4.7	0.15	—	0.8	0.20	0.15	0.15	—	—	—	Remainder	0.05	0.15
BAISI-4	A94047	11.0-13.0	0.30	0.10	—	0.8	0.20	0.15	—	—	—	—	Remainder	0.05	0.15
BAISI-5	A94045	9.0-11.0	0.30	0.05	—	0.8	0.10	0.05	—	0.20	—	—	Remainder	0.05	0.15
BAISI-7	A94004	9.0-10.5	0.25	1.0-2.0	—	0.8	0.20	0.10	—	—	—	—	Remainder	0.05	0.15
BAISI-9	A94147	11.0-13.0	0.25	0.10-0.5	—	0.8	0.20	0.10	—	—	—	—	Remainder	0.05	0.15
BAISI-11	A94104	9.0-10.5	0.25	1.0-2.0	0.02-0.20	0.8	0.20	0.10	—	—	—	—	Remainder	0.05	0.15
BMg-1	M19001	0.05	0.05	Remainder	...	0.005	1.7-2.3	0.15-1.5	—	0.005	—	0.0002- 0.0008	8.3-9.7	—	0.30

NOTES:

- Single values are maximum, unless otherwise noted.
- SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys.
- The filler metal shall be analyzed for those specific elements for which values are shown in this table. If the presence of other elements is indicated in the course of this work, the amount of those elements shall be determined to ensure that they, or their total do not exceed the limits specified.

TABLE 3
CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS FOR NICKEL AND COBALT FILLER METALS

AWS Classification	UNS Number ^b	Chemical Composition, Weight Percent ^a														Other Elements, Total ^c		
		Ni	Cr	B	Si	Fe	C	P	S	Al	Ti	Mn	Cu	Zr	W		Co	Se
BNi-1	N99600	Remainder	13.0-15.0	2.75-3.50	4.0-5.0	4.0-5.0	0.60-0.90	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-1a	N99610	Remainder	13.0-15.0	2.75-3.50	4.0-5.0	4.0-5.0	0.06	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-2	N99620	Remainder	6.0-8.0	2.75-3.50	4.0-5.0	2.5-3.5	0.06	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-3	N99630	Remainder	--	2.75-3.50	4.0-5.0	0.5	0.06	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-4	N99640	Remainder	--	1.50-2.20	3.0-4.0	1.5	0.06	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-5	N99650	Remainder	18.5-19.5	0.03	9.75	--	0.06	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-5a	N99651	Remainder	18.5-19.5	1.0-1.5	7.0-7.5	0.5	0.10	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-6	N99700	Remainder	--	--	--	--	0.06	10.0-12.0	0.02	0.02	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-7	N99710	Remainder	13.0-15.0	0.01	0.10	0.2	0.06	9.7-10.5	0.02	0.02	0.05	0.04	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-8	N99800	Remainder	--	--	6.0-8.0	--	0.06	0.02	0.02	0.05	0.05	21.5-24.5	4.0-5.0	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-9	N99612	Remainder	13.5-16.5	3.25-4.00	--	1.5	0.06	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	--	0.10	0.005	0.50
BNi-10	N99622	Remainder	10.0-13.0	2.0-3.0	3.0-4.0	2.5-4.5	0.40-0.55	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	15.0-17.0	0.10	0.005	0.50
BNi-11	N99624	Remainder	9.00-11.75	2.2-3.1	3.35-4.25	2.5-4.0	0.30-0.50	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	11.50-12.75	0.10	0.005	0.50
BCo-1	R39001	16.0-18.0	18.0-20.0	0.70-0.90	7.5-8.5	1.0	0.95-0.45	0.02	0.02	0.05	0.05	--	--	0.05	3.5-4.5	Remainder	0.005	0.50

NOTES:

- Single values are maximum.
- SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys.
- The filler metal shall be analyzed for those specific elements for which values are shown in this table. If the presence of other elements is indicated in the course of this work, the amount of those elements shall be determined to ensure that their total does not exceed the limit specified.

ANEXO 8**INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN**

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA**NTE INEN 2 260:2008****Primera Revisión**

**INSTALACIONES DE GASES COMBUSTIBLES PARA USO
RESIDENCIAL, COMERCIAL E INDUSTRIAL.
REQUISITOS.**INSTALLATION OF COMBUSTIBLE GAS RESIDENCIAL, COMERCIAL OR INDUSTRIAL USE.
SPECIFICATIONS.**7.3 Tuberías**

- a) Estas deben resistir la acción del gas combustible y del medio exterior, al que deben estar protegidas, mediante un sistema eficaz.
- b) Los espesores de las tuberías, deben cumplir como mínimo con las condiciones de ensayo de presión impuestas a estas instalaciones, y deben tener una resistencia mecánica que cumpla con los requisitos de las normas de cada tipo de tubería.
- c) Las tuberías vistas deben ser señaladas e identificadas con los colores de acuerdo a la NTE INEN 440 y las ocultas (embebidas, enterradas o por ductos) señalizadas.

7.3.1 Tipos de tubería. Los tipos de tubería que se pueden utilizar son: metálicas y plásticas.**7.3.1.1** Tuberías metálicas.

- a) *Materiales.* Las tuberías deben ser de acero al carbono, acero inoxidable o cobre, cuya composición química no sea atacada por el gas combustible, ni por el medio exterior con el que estén en contacto. Para la conducción de gas combustible, en ningún caso se debe utilizar tubería de hierro fundido. Los tipos de tubería metálica que pueden ser utilizados en las instalaciones para suministro de gas son:

- a.1) Tubería de acero al carbono, mínimo cédula 40 y de acuerdo con las siguientes normas: ASTM A53 (grado A y B) ó ISO 65 (serie Heavy); negro o galvanizada por inmersión en caliente.
- a.2) Tuberías de cobre rígida o flexible, sin costura, según las normas: ISO 1635 o ASTM B 88 de tipo K o L.
 - a.2.1) No se debe emplear tuberías de cobre si el contenido de sulfuro de hidrógeno por cada metro cúbico del combustible gaseoso es superior a 7 mg en condiciones normales.
 - a.2.1) Se debe utilizar tubo rígido (temple duro) con un espesor mínimo de 0.89 mm, pudiéndose utilizar tubo flexible con un espesor mínimo de 1,2 mm y un diámetro exterior máximo de 28,58 mm (en estado recocido).
- a.3) Tubería flexible corrugada de acero inoxidable tipo CSST fabricada según las especificaciones de la norma ANSI/AGALC1.
- a.4) Tubería rígida de acero inoxidable tipo AISI 304 L y AISI 316 según ASTM A 240, fabricada según las especificaciones dimensionales y de presión de las normas JIS G 3448 o UNE 19 – 049 – 1, ASTM A 312 M, hasta que se elabore la norma NTE INEN correspondiente.

7.4 Uniones para tubería, elementos y accesorios.-

Las uniones de los tubos entre sí y de éstos con los accesorios y elementos de las instalaciones, se deben hacer de forma que el sistema utilizado asegure la estanqueidad, sin que esta sea afectada por los distintos tipos y presiones de gas que se pueden suministrar, ni por el medio exterior que esté en contacto.

7.4.1 Uniones mediante soldadura

- 1) Los procesos de soldadura utilizables dependen de los materiales de los tubos y/o accesorios a unir y de si son del mismo o de diferente material.
- 2) En general las técnicas de soldadura y, en su caso, los materiales de aportación para su ejecución, deben cumplir con unas características mínimas de temperaturas y tiempo de aplicación, resistencia a la tracción, resistencia a la presión y al gas distribuido y deben ser adecuadas a los materiales a unir. El proceso de soldadura y los soldadores que lo apliquen deben estar calificados, según Código ASME Sección IX o AWS A 5.8 o NTE INEN 128.ç
- 3) En la realización de las soldaduras se deben seguir las instrucciones del fabricante de los tubos, de los accesorios y del material de aporte, teniendo especial precaución en la limpieza previa de las superficies a soldar, en la utilización del decapante adecuado al tipo de soldadura y en la eliminación de los residuos del fundente.

- 4) Las uniones soldadas deben ser siempre por soldadura fuerte para presiones de operación hasta 4 bar (60 PSIG).
- 5) Se denomina soldadura fuerte, cuando los materiales de aporte se funden a mínimo 500°C.
- 6) Para la soldadura fuerte por capilaridad, el material de aporte debe cumplir con los parámetros de la norma ANSI/AWS A5.8.
- 7) Se prohíbe el uso de la soldadura blanda incluidas las aleaciones de plomo – estaño y estaño – plata, cuyas temperaturas de fusión son menores a 500°C.

7.4.1.2 Unión Cobre-cobre o aleación de cobre.- Las uniones de tubos de cobre se deben realizar mediante soldadura por capilaridad, a través de accesorios de cobre o de aleación de cobre y utilizando materiales de aporte clasificados como soldadura fuerte.

- a) No se debe utilizar el abocardado del tubo de cobre para soldar por capilaridad, excepto en la construcción de baterías de contadores centralizados, siempre que una vez realizada la unión soldada, el espesor resultante sea como mínimo el espesor del tubo.
- b) No se debe realizar la extracción o perforación de la tubería principal para soldar derivaciones, excepto en los módulos de centralización de contadores.

7.4.1.3 Unión acero-acero.- Las uniones de los tubos y accesorios de acero deben realizarse mediante soldadura eléctrica al arco. Para diámetros nominales, (DN), inferiores o iguales a 50 mm, se podrá utilizar soldadura oxiacetilénica.

7.4.1.4 Unión acero inoxidable-acero inoxidable.- Las uniones de los tubos de acero inoxidable deben realizarse mediante capilaridad, a través de accesorios de acero inoxidable o de aleación de cobre, ó bien a tope directamente entre tubos y utilizando materiales de aporte en soldadura fuerte.

- a) No se debe utilizar el abocardado del tubo de cobre para soldar por capilaridad, excepto en la construcción de baterías de contadores centralizados, siempre que una vez realizada la unión soldada, el espesor resultante sea como mínimo el espesor del tubo.

7.4.1.5 Unión cobre o bronce-acero.- No se permite la unión directa de tubos de cobre y acero. La unión de un tubo o accesorio de cobre con un tubo o accesorio de acero se debe realizar intercalando un accesorio de bronce.

- a) La unión de dicho accesorio de bronce con un tubo o accesorio de acero, debe realizarse por soldadura fuerte a tope, con material de aporte de aleación de cobre y punto de fusión mínimo de 850°C.

7.4.1.6 Unión cobre – acero inoxidable.- No se deben unir de forma directa tubos de cobre y de acero inoxidable. La unión de un tubo ó accesorio de cobre con un tubo

o accesorio de acero inoxidable, se debe realizar intercalando un accesorio de bronce.

- a) Este tipo de soldadura debe realizarse con las técnicas de soldadura que se han descrito en los literales 2 y 4 del numeral 7.4.1.

7.4.4 Uniones mediante Juntas a Presión en Frío (Press Fit)

7.4.4.1 El sistema de uniones mediante Juntas a Presión en Frío (Press Fit) debe cumplir con los requerimientos de la Norma Técnica Bases de ensayo VP 614 de la DVGW (Asociación Alemana del Departamento Técnico Agua y Gas), hasta que se elabore la norma NTE INEN correspondiente.

- a) En estas uniones deben utilizarse material con certificación de conformidad con norma.
- b) Se pueden instalar al exterior sin necesidad de ductos o al interior de los edificios en ductos independientes con ventilación al exterior de los edificios, sin exceder la presión de operación máxima de 103,8 kPa (15PSIG).
- c) Cuando estas uniones se utilicen en instalaciones interiores de la vivienda deben cumplir con:
- c1) Presión máxima de operación 6,92 kPa (1PSIG)
- c2) Estar instalada dentro de una camisa o un ducto de ventilación exclusivo, canalizando al exterior de la edificación en los extremos.
- d) Este tipo de uniones no se utilizarán en tuberías que conduzcan gas en fase líquida.

LIMITACIONES EN LA INSTALACIÓN DE TUBERÍAS

TIPO DE TUBERÍA LUGAR DE INSTALACIÓN	POLIETILENO O	POLIETILENO -ALUMINIO- POLIETILENO	COBRE	ACERO	ACERO INOXIDABLE RÍGIDO	ACERO INOXIDABLE CORRUGADO
AL INTERIOR DE LA EDIFICACIÓN	PROHIBIDO	ACEPTADO (ver requisito adicional nota 8)	ACEPTADO (ver requisito adicional nota 8)	ACEPTADO (ver requisito adicional nota 8)	ACEPTADO (ver requisito adicional nota 8)	ACEPTADO (ver requisito adicional nota 8)
VISTA (ver requisitos adicionales nota 10)	PROHIBIDO (ver excepción en nota 1)	PROHIBIDO (ver excepción en nota 1)	ACEPTADO O	ACEPTADO O	ACEPTADO	ACEPTADO
EMBEBIDAS EN	PROHIBIDO (ver excepción	ACEPTADO (ver requisito adicional en nota	ACEPTADO O (ver requisito	ACEPTADO	ACEPTADO	ACEPTADO (ver requisito adicional en

aclaración en nota 8)						
EN ZONAS COMUNALES DENTRO DE EDIFICIOS (ver requisitos adicionales nota 9)	PROHIBIDO	ACEPTADO (ver requisito adicional en nota 13, a)	ACEPTADO	ACEPTADO	ACEPTADO	ACEPTADO
HUECOS DE ASCENSORES O MONTACARGAS	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO
LOCALES QUE CONTENGAN TRANSFORMADORES ELECTRICOS DE POTENCIA	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO
LOCALES QUE CONTENGAN RECIPIENTES DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO (ver aclaración en nota 11)	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO
DUCTOS DE EVACUACIÓN DE BASURAS O PRODUCTOS RESIDUALES	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO
CHIMENEAS O DUCTOS DE EVACUACIÓN DE PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO
DUCTOS O BOCAS DE AIREACIÓN O VENTILACIÓN, (ver excepción en nota 12)	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO	PROHIBIDO

NOTA 1: Se podrá instalar tuberías de polietileno sobre el nivel del suelo en acometidas que discurran por muros externos que requieran conectarse al conjunto regulador y medidor. La tubería debe estar dentro de una camisa para protección mecánica y radiación ultravioleta()ver tabla 4, a una altura máxima de 1,80 mts, con su extremo superior sellado.

NOTA 2 : La tubería de acero enterrada debe tener protección contra la corrosión activa y pasiva.

NOTA 3: Las tuberías que pasen por un sótano o subsuelo deben ser continuas (soldadas), sin uniones mecánicas y dentro de una camisa o ducto de ventilación ; los extremos de la camisa o ducto deben terminar en una zona externa a la edificación, al menos un extremo debe estar abierto.

- a) El venteo del extremo(s) debe ser hacia el exterior por encima del nivel del suelo y estar instalado de modo que se evite el ingreso de agua e insectos, la sección de la camisa de protección debe ser 1,5 veces el diámetro de la tubería.

NOTA 4: El techo falso por donde discurra la tubería, debe tener una ventilación hacia cualquiera de los siguientes lugares: 1) exterior del edificio, 2) local que contenga los artefactos de gas, 3) zona comunal ventilada hacia el exterior del edificio. Las ventilaciones serán mínimo de 100 cm².

NOTA 5: Tuberías embebidas que se instalan incrustadas en una edificación y cuyo acceso solo puede lograrse mediante la remoción de parte de muros o pisos del inmueble. Las tuberías embebidas serán ubicadas en sitios que brinden protección contra daños mecánicos.

- a) Las tuberías embebidas en paredes se recubrirán con mortero mezcla 1:3:3 de espesor mínimo de 20 mm alrededor de toda la tubería.
- b) Las tuberías embebidas en pisos se recubrirán con un mortero de 20 mm de espesor. El concreto no contendrá acelerante, agregados de escoria o productos amoniacales ni aditivos que contengan productos que ataquen los metales.
- c) Las tuberías embebidas no podrán estar en contacto físico con otros elementos mecánicos, tales como varillas de refuerzo, ductores eléctricos o tuberías de otros servicios.

NOTA 6: Las tuberías enterradas deben estar a una profundidad mínima de 60 cm y cuando crucen calles a 80 cm mínimo. Si no se puede cumplir con estas profundidades entonces debe instalarse en la parte superior de la tubería protecciones con ladrillos o algún material de obra de similar característica.

- a) Cuando se ponga protección la tubería debe estar a una profundidad mínima de 30 cm y para cruces de calles a 60 cm mínimo.
- b) Cuando la tubería esté ubicada en jardines debe estar protegida en su parte superior.
- c) Toda tubería enterrada debe estar señalizada mediante una cinta amarilla e impresa con la leyenda PELIGRO TUBERÍA DE GAS. Las tuberías enterradas serán instaladas de tal forma que en sentido paralelo se encuentren mínimo a 20 cm de otros servicios y sus cajas de revisión y en cruces mínimo a 10 cm. Si no es posible mantener estas distancias mínimas entonces la tubería debe instalarse dentro de un ducto o protegida por algún material de obra incombustible, en la longitud del cruce.
- d) En ningún caso la tubería podrá estar en contacto con los materiales de protección.

NOTA 7: Las tuberías que discurren por un sótano o subsuelo deben ser soldados y dentro de un camisa o ducto de ventilación; los extremos de la camisa o ducto deben terminar en una zona externa a la edificación, al menos un extremo debe estar abierto.

- a) El venteo de los extremo (s) debe ser hacia el exterior por encima del nivel del suelo y está instalado de modo que se evite el ingreso de agua e insectos, la sección de la camisa de protección debe ser 1,5 veces el diámetro de la tubería.
- b) Cuando sean materiales disímiles debe utilizarse separadores o aislantes para evitar la corrosión galvánica.

NOTA 8: Se incluye la prohibición a techos falsos, pisos, paredes de los dormitorios y baños.

NOTA 9: La zona comunal del edificio debe tener al menos una ventilación inferior hacia el exterior del edificio de mínimo 200 cm² esta ventilación podrá ser un ducto el que debe ventilarse hacia fuera el edificio y sobre el nivel del terreno, no tendrá una abertura hacia gradas o ductos.

NOTA 10: Las distancias mínimas de separación de un tubería vista a conducciones de otros servicios deben estar de acuerdo al siguiente cuadro:

Tubería de otros servicios	Curso paralelo (cm)	Cruce (cm)
Conducción agua caliente	3	1
Conducción eléctrica	3	1
Conducción de vapor	5	5
Chimeneas y ductos de extracción de gases de combustión	60	60
Suelo por donde discurren	5	Ninguno

- 1) Las tuberías vistas que discurran por locales comerciales, e industriales deben colocarse a una separación mínima de 1 cm de las paredes y techos.
- 2) Estas distancias aplican a las tuberías vistas y ocultas a excepción de las enterradas, ver tabla 3 nota 6

NOTA 11: Los vehículos a motor o un vehículo cisterna móvil, no tienen la consideración de tanques de combustible líquido.

NOTA 12: Las tuberías podrán discurrir por aquellos ductos que sirvan para la ventilación de los locales con instalaciones y equipos que utilicen el propio gas suministrado.

NOTA 13: Las tuberías de cobre, acero inoxidable corrugado y PE-AL-PE, deben estar protegidas con una lámina metálica de acero de mínimo 1,5 mm de espesor o con mortero (masillado) de mínimo se 50 mm para que lo proteja contra los daños mecánicos.

- a) La tubería podrá estar protegida contra eventuales daños físicos a través de camisas o ductos según aplique tabla 4.
- b) Una camisa o ducto puede realizar varias funciones a la vez, el material de la misma debe cumplir los requisitos específicos de ambas funciones, ver tabla 4.

TABLA 4

MATERIALES DE LAS CAMISAS Y DUCTOS

FUNCIÓN	MATERIAL DE CAMISAS	MATERIAL DE DUCTOS
Protección mecánica de tuberías	Acero, con espesor mínimo de 1,5 mm	Materiales metálicos (acero, cobre, etc), con espesor mínimo de 1,5 mm.
	Otros materiales de similar resistencia	De obra, (espesor mínimo de 5 cm)
Ventilación de tuberías en sótanos (ver nota A)	Materiales metálicos (acero, cobre, etc.)	Materiales metálicos (acero, cobre, etc.)
Ventilación de tuberías en el resto de casos (ver nota A)	Materiales metálicos (acero, cobre, etc.) Otros materiales rígidos (por ejemplo plásticos rígidos)	Materiales metálicos (acero, cobre, etc) De obra.
Acceso a armarios de regulación y contadores.	Materiales metálicos (acero, cobre, etc.)	
Tuberías situadas en suelo o subsuelo.	Otros materiales rígidos (por ejemplo, plásticos rígidos)	

NOTA A: En estos casos, el material debe asegurar la estanqueidad.

ANEXO 9

METACONCEPT SOLDADURA FUERTE METALES DE APORTE

Un POCO DE TÉCNICA

Existen varias técnicas para unir piezas metálicas entre sí. En función de la naturaleza misma de estas piezas, del comportamiento mecánico deseado, de las temperaturas extremas de funcionamiento, de la conductividad térmica o eléctrica deseada, puede recurrirse a diferentes técnicas. Se habla de soldadura cuando se procede al ensamblado por capilaridad de 2 piezas metálicas cuya temperatura de fusión del metal de aporte es inferior a la de las piezas que se desean juntar. Soldar con latón es una técnica de montaje por intervalos con un metal de aporte cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas montadas. Por último, se habla de soldadura en caso de un montaje homogéneo o heterogéneo de piezas metálicas cuyos metales soportes participan en el baño de fusión. El cuadro siguiente retoma las principales características de los métodos descritos anteriormente:

La aportación de un flux decapante es absolutamente necesaria salvo si se trata de soldadura eléctrica (autógena). Este flux puede estar presente con el metal de aporte (hilos o varillas revestidos o forrados) o en un acondicionamiento separado (polvo, gel o líquido). El flux elegido depende generalmente de la temperatura de la fusión del metal de aportación y de la naturaleza de las piezas por unir (tipo de aleación y estado de superficie).

En las fichas relativas a nuestros productos de soldadura blanda se menciona toda una gama de soldadura con estaño en forma de hilos y barras. En este documento, tratamos de la soldadura fuerte Cobre/Fósforo y Cobre/Cinc/Plata, de la soldadura con varilla de latón y de la soldadura por arco eléctrico.

	Metal de aportación	Metales a ensamblar	T° a alcanzar	Herramientas	Observaciones
Soldadura blanda	Aleaciones a base de estaño	Casi todos	200 - 450 °C	Soldador, Soplete monogas	Flux decapante obligatorio, integrado (hilo decapante) o externo (líquido, gel o crema)
Soldadura Fuerte	Aleaciones de cobre, plata, cinc	Salvo cinc, plomo y estaño	600 - 850 °C	Soplete monogas o de dos gases	Flux decapante obligatorio, integrado (fósforo o revestimiento) o externo (polvo, gel o crema)
Soldadura por latón	Latón	Acero, acero inoxidable, fundiciones, cobre	850 - 920°C	Soplete de dos gases	Flux decapante obligatorio, integrado (forrado o revestimiento) o externo (polvo, gel o crema)
Soldadura	Según las piezas por ensamblar	Todos los metales que soporten una temperatura elevada	1500 - 2000°C	Puesto eléctrico o llama	Necesidad de disponer de piezas limpias, el decapante se utiliza tras la soldadura para preparar los tratamientos ulteriores



Ejemplos de aplicaciones con soldaduras fuertes o soldaduras por arco en la chapistería, calderería, la construcción naval y los intercambiadores térmicos

SOLDADURA FUERTE

La principal diferencia entre la soldadura blanda y la fuerte reside en la temperatura de fusión del metal de aportación. Mientras que las aleaciones de soldadura blanda funden a temperaturas medias de 180 a 250°C, las aleaciones de soldadura fuerte funden a 600-700°C. De un punto de vista normativo, se habla de soldadura blanda a menos de 450°C y fuerte por encima de esta temperatura. Esta diferenciación tiene dos consecuencias importantes: por un lado la herramienta que va a aportar la fuente de calor será diferente generalmente y, por otro, las piezas a soldar deberán, en caso de la soldadura fuerte, tener un punto de fusión superior al liquidus del metal de aportación. El punto común sigue siendo el principio de aportación de la soldadura que, bajo el efecto de la fuente de calor, se extiende por capilaridad entre las piezas que desean ensamblar. Estas dos técnicas se utilizan sobre todo para los montajes de piezas de juego menor (0,05 a 0,2 mm) que deben soportar un esfuerzo de cizalladura demasiado importante para una soldadura blanda. Los conductos de fluidos se montan generalmente con una u otra de estas dos técnicas.

Existen dos grandes familias de soldaduras fuertes. La primera reúne las aleaciones a base de Cobre/Fósforo (con un 2 a 15% de plata para mayor fluidez y mejor comportamiento de las características mecánicas a baja temperatura) que tienen la particularidad de no necesitar decapante externo, puesto que el Fósforo posee propiedades autodecapantes sobre el Cobre. Atención, en caso de que se junten piezas de aleación de cobre, se necesita un decapante externo o una varilla recubierta. La segunda familia comprende las soldaduras a base de Plata, mayoritariamente un 40%. El cuadro siguiente recapitula los diferentes tipos de soldadura fuerte:

Aleación soldadura fuerte	Metales a ensamblar	Observaciones
Cobre/Fósforo	Cobre puro o de fontanería	El fósforo desempeña un papel de decapante. No se necesita decapante externo
Cobre/Fósforo	Aleaciones de cobre (latón)	Necesidad de utilizar un decapante externo
Cobre/Fósforo/Plata	Cobre y aleaciones	Necesita un decapante externo, más fluido gracias a la presencia de la plata que preserva también las características mecánicas a baja temperatura
Plata 40%	Metales cobreados, Aceros	Necesita un decapante externo, más fluido y punto de fusión inferior gracias al porcentaje de plata que preserva también las características mecánicas a baja temperatura