



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PROCESO DE SOLDADURA SUBACUÁTICA SEGÚN LA ESPECIFICACIÓN
D3.6 DE LA AWS**

Pablo Alexander Jiguan Aguilón

Asesorado por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROCESO DE SOLDADURA SUBACUÁTICA SEGÚN LA ESPECIFICACIÓN
D3.6 DE LA AWS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PABLO ALEXANDER JIGUAN AGUILÓN

ASESORADO POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Álvaro Antonio Ávila Pinzón
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Coronado Noj
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROCESO DE SOLDADURA SUBACUÁTICA SEGÚN LA ESPECIFICACIÓN D3.6 DE LA AWS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 26 de julio de 2017.



Pablo Alexander Jiguan Aguilón

Guatemala, 19 de julio de 2018

Ing. Julio Cesar Campos Paiz
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ing. Campos Paiz

Por medio de la presente informo a usted que, como asesor del estudiante universitario **PABLO ALEXANDER JIGUAN AGUILÓN**, con registro académico **201114528**, CUI **1722947890101**, procedí a revisar el contenido, así como las conclusiones y recomendaciones expuestas, en el trabajo final de graduación titulado: **"PROCESO DE SOLDADURA SUBACUÁTICA SEGÚN LA ESPECIFICACIÓN D3.6 DE LA AWS"**.

Después de haber discutido en reuniones conjuntas con el interesado y habiéndole hecho las modificaciones pertinentes, me permito emitir el dictamen favorable, pues satisface los requisitos para su aprobación.

Sin otro particular, me suscribo.

Atentamente,


INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Colegiado No. 3071
Asesor



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.190.2018

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **PROCESO DE SOLDADURA SUBACUÁTICA SEGÚN LA ESPECIFICACIÓN D3.6 DE LA AWS** desarrollado por el estudiante **Pablo Alexander Jiguan Aguilón**, CUI **1722947890101** con Reg. Académico No. **201114528** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, julio de 2018

/aej

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales de Ingeniería del trabajo de graduación titulado: **PROCESO DE SOLDADURA SUBACUÁTICA SEGÚN LA ESPECIFICACIÓN D3.6 DE LA AWS** desarrollado por el estudiante **Pablo Alexander Jiguan Aguilón**, CUI **1722947890101** con Reg. Académico No. **201114528** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala septiembre de 2018

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

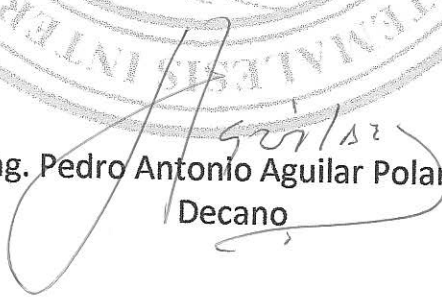


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 372.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROCESO DE SOLDADURA SUBACUÁTICA SEGÚN LA ESPECIFICACIÓN D3.6 DE LA AWS**, presentado por el estudiante universitario: **Pablo Alexander Jiguan Aguilón**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser el creador de todo lo que nos rodea y por haberme permitido llegar hasta este momento para cerrar una etapa importante en mi vida.

Mis padres

Pablo Jacinto Jiguan López y Flory Amparo Aguilón Guzman, por enseñarme desde pequeño que es posible superar cualquier obstáculo de la vida si se trabaja con esfuerzo, disciplina, excelencia y siempre respetando y preocupándose por las demás personas. Les agradezco haberme enseñado a nunca rendirme y a nunca olvidar mis sueños. Gracias por todo su amor y espero que siempre estén a mi lado, su amor será siempre mi inspiración.

Mis hermanas

Brenda, Carla, Lusaida y Marggie Jiguan Aguilón, por el cariño, el apoyo y por enseñarme a que se puede llegar lejos esforzándose y realizando las cosas con excelencia.

Mis amigos

Por estar siempre en los buenos y malos momentos de la carrera, por enseñarme siempre a seguir adelante, por compartirme sin ningún egoísmo sus conocimientos y anécdotas que me ayudaron a mejorar como persona y a saber que siempre es bueno pedir ayuda.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios que me brindó un lugar y todos los recursos necesarios para formarme como un profesional, desde los primeros años hasta este punto de mi vida.

Facultad de Ingeniería

Por haberme permitido ser parte de ella, por darme el conocimiento necesario para desarrollarme exitosamente y por haberme cobijado durante el tiempo de mi formación.

**Escuela de Ingeniería
Mecánica**

Por ser la escuela que me enseñó a nunca rendirme a pesar de los obstáculos, por las decepciones y alegrías y por cada uno de los ingenieros que compartieron su conocimiento dentro y fuera del aula. A todos ellos muchas gracias.

**Instituto Técnico
Vocacional Dr. Imrich
Fischmann**

Por ser el primer lugar en el que pude desarrollarme como profesional, por todas las enseñanzas de vida aprendidas, por permitirme conocer personas que me ayudaron a desarrollarme; gracias por todos esos profesores que fomentaron en mí el gusto por aprender nuevas cosas.

Todas esas personas que con su conocimiento brindado hicieron parte en este trabajo de graduación

A todas esas personas gracias por el conocimiento brindado en mi etapa como técnico soldador, quienes me ayudaron y apoyaron en el inicio de mi carrera. Agradezco al ingeniero Hugo Ramírez, por brindarnos sus conocimientos en el curso de metalurgia y metalografía, el cual fue fundamental en este trabajo. También, un agradecimiento especial al ingeniero Carlos Pérez que me enseñó que las cosas se deben hacer con excelencia, gracias por todo el conocimiento brindado en sus cursos que pude cursar con usted y de nuevo gracias por ser parte de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	7
2.1. Soldadura SMAW (<i>shielded metal arc welding</i>).....	7
2.2. Equipo	9
2.2.1. Fuente de energía	9
2.2.2. Máquinas estáticas	9
2.2.3. Máquinas estáticas DC.....	9
2.2.3.1. Rectificación por diodos de estado sólido	12
2.2.3.2. Rectificación por tiristor de rectificador controlado por silicio (SCR).....	13
2.2.3.3. Rectificación por transistores.....	15
2.2.4. Máquinas estáticas AC	16
2.2.4.1. Fuente de potencia por transformador	16

	2.2.4.1.1.	Control por bobina móvil.....	17
	2.2.4.1.2.	Control de derivación móvil.....	18
	2.2.4.1.3.	Control por reactor de núcleo móvil	19
	2.2.4.1.4.	Control de reactor saturable	20
2.2.5.		Máquinas rotativas	21
2.2.6.		Característica estática y dinámica.....	23
	2.2.6.1.	Característica estática.....	24
	2.2.6.1.1.	Fuentes de voltaje constante.....	24
	2.2.6.1.2.	Fuentes de corriente constante.....	25
	2.2.6.1.3.	Fuentes combinadas de voltaje y corriente constante.....	26
	2.2.6.2.	Características dinámicas	26
2.2.7.		Portaelectrodos	27
2.2.8.		Pinza de masa.....	28
2.2.9.		Cables para soldadura	29
2.3.		Estructura cristalina.....	30
	2.3.1.	Sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC).....	30
	2.3.2.	Sistema cúbico centrada en las caras (FCC)	31
	2.3.3.	Sistema hexagonal compacto (HCP)	31
2.4.		Metalografía	32
2.5.		Metalurgia	40
	2.5.1.	Tensiones residuales	42

2.5.2.	Cambios microestructurales	43
2.5.3.	Tratamientos térmicos	43
2.5.3.1.	Pre calentamiento	44
2.5.3.2.	Post calentamiento	45
2.5.3.2.1.	Recuperación	46
2.5.3.2.2.	Relajamiento.....	47
2.5.3.2.3.	Revenido o regulación de temple por recocido.....	47
2.5.3.3.	Tratamiento térmico post soldadura	49
2.5.3.3.1.	Distensionado.....	49
3.	EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL	51
3.1.	Máscara de buceo medio rostro	51
3.2.	Máscara de buceo de rostro completo	52
3.3.	Casco de buceo.....	53
3.4.	Traje de buceo.....	53
3.4.1.	Traje seco.....	54
3.4.2.	Traje húmedo.....	55
3.4.3.	Traje semiseco	56
3.5.	Guantes	57
3.6.	Botines o calcetas de buceo	58
4.	SOLDADURA HÚMEDA.....	59
4.1.	Generalidades	59
4.1.1.	Soldadura clase A.....	60
4.1.2.	Soldadura clase B.....	60
4.1.3.	Soldadura clase O	61
4.1.4.	Solidificación y transformación microestructural	69

4.2.	Equipo	70
4.2.1.	Generadores de corriente eléctrica	71
4.2.2.	Interruptores de seguridad	73
4.2.3.	Cables eléctricos	74
4.2.4.	Pinza portaelectrodos.....	76
4.3.	Tipos de electrodos	79
4.3.1.	Revestimiento fundente.....	80
4.3.2.	Revestimiento impermeable	80
4.3.3.	Almacenamiento de los electrodos.....	81
4.3.4.	Manipulación y transporte de electrodos.....	82
4.4.	Procedimiento para soldar	82
4.4.1.	Soldadura en chapas a tope con bisel	83
4.4.2.	Soldadura para tubería con bisel.....	84
4.4.3.	Soldadura en filete	85
4.4.4.	Soldadura de filete en tubo.....	87
4.4.4.1.	Técnica de autoconsumo o de arrastre.....	89
4.4.4.2.	Procedimiento para la soldadura de arrastre	90
4.4.4.3.	Técnica de manipulación o de tejido	93
5.	SOLDADURA SECA.....	95
5.1.	Generalidades.....	95
5.1.1.	Soldadura en atmósfera seca.....	95
5.1.2.	Soldadura en hábitat seco.....	98
5.1.3.	Soldadura en cámara seca.....	99
5.1.4.	Soldadura de punto seco.....	100
5.1.5.	Soldadura automatizada.....	101
5.1.6.	Proceso de soldadura TIG.....	101

5.1.7.	Proceso de soldadura SMAW	103
5.2.	Equipo	105
5.2.1.	Equipo TIG.....	105
5.2.1.1.	Fuentes de energía.....	106
5.2.1.1.1.	Fuente en corriente continua.....	107
5.2.1.1.2.	Fuente en corriente alterna	108
5.2.1.2.	Portaelectrodos.....	110
5.3.	Tipos de gases utilizados	112
5.4.	Tipos de electrodos	114
5.4.1.	Electrodo de wolframio puro	115
5.4.2.	Wolframio aleado con torio	115
5.4.3.	Wolframio aleado con zirconio.....	116
5.5.	Procedimiento para soldar.....	116
5.5.1.	Preparación de la unión.....	116
5.5.2.	Cebado del arco	117
5.5.2.1.	Cebado por raspado	117
5.5.2.2.	Cebado por alta frecuencia.....	118
5.5.3.	Técnica de soldeo manual.....	119
6.	CORTES DE METALES BAJO AGUA	121
6.1.	Generalidades	121
6.1.1.	Corte por arco-oxígeno.....	121
6.1.2.	Corte arco-agua.....	123
6.1.3.	Corte por electrodos ultratérmicos.....	123
6.1.4.	Corte oxifundente o Lanza Berfix.....	125
6.1.5.	Corte por electrodos revestidos o por arco metálico	125

6.2.	Equipo utilizado	126
6.2.1.	Equipo utilizado para corte por arco-oxígeno	126
6.2.1.1.	Soplete	126
6.2.1.2.	Reguladores de oxígeno	127
6.2.2.	Equipo utilizado para corte por arco-agua.....	128
6.2.2.1.	Fuente de corriente	128
6.2.2.2.	Soplete	129
6.2.3.	Equipo utilizado para corte por electrodos ultratérmicos.....	129
6.2.3.1.	Fuente de corriente	129
6.2.3.2.	Soplete	131
6.2.3.3.	Mangueras	131
6.2.3.4.	Cables	131
6.2.3.5.	Interruptores de seguridad	132
6.2.4.	Equipo utilizado para sistema de corte oxifundete o lanza Berfix	132
6.2.5.	Equipo utilizado para sistema de corte por electrodos revestidos	133
6.3.	Tipos de gases.....	133
6.3.1.	Corte por arco-oxígeno	134
6.3.2.	Corte por electrodos ultratérmicos	136
6.3.3.	Corte oxifundente o lanza Berfix	137
6.4.	Tipos de electrodos para corte.....	138
6.4.1.	Corte por arco-oxígeno	138
6.4.1.1.	Revestimiento fundente.....	139
6.4.1.2.	Revestimiento impermeable.....	139
6.4.2.	Corte por arco-agua	140
6.4.3.	Corte por electrodos ultratérmicos	140
6.4.4.	Corte por lanza Berfix.....	143

6.4.5. Corte por electrodos revestidos	144
CONCLUSIONES	145
RECOMENDACIONES	149
BIBLIOGRAFÍA	151

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Buzos profesionales listo para ingresar al agua, año 1926	2
2.	Escuela de Salvamento de la U.S. NAVY, año 1942	3
3.	Equipo de buzos salvamentistas de la Segunda Guerra Mundial	4
4.	Buzo con equipo Dragger en una plataforma Off Shore en el golfo de México en el año 1960	5
5.	La industria Off Shore, uno de los principales campos de acción de la soldadura subacuática.....	6
6.	Esquema del proceso de soldadura eléctrica.....	7
7.	Esquema de la polaridad directa e inversa de una máquina DC.....	10
8.	Esquema de polaridad directa DC con electrones viajando a la pieza a soldar.....	11
9.	Esquema de la polaridad inversa DC con electrones viajando hacia el electrodo.....	12
10.	Rectificación por puente de diodos de silicio.....	13
11.	Rectificación por tiristor (SCR)	14
12.	Control de fase con SCR.....	15
13.	Máquina corriente alterna con control por bobina	18
14.	Máquina corriente alterna con control de derivación móvil.....	19
15.	Máquina corriente alterna con control por reactor de núcleo móvil	20
16.	Máquina corriente alterna con control de reactor saturable	21
17.	Esquema de un generador con campo magnético contenido en el rotor.....	22

18.	Esquema de un generador con campo magnético contenido en el estator.....	23
19.	Curva volt-ampere para una fuente de voltaje constante.....	24
20.	Curva volt-ampere para una fuente de corriente constante	25
21.	Curva volt-ampere para una fuente de voltaje y corriente constante	26
22.	Portaelectrodo.....	28
23.	Pinza de masa tensada con resorte.....	28
24.	Diámetro recomendado para cables de cobre para soldadura	29
25.	Sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC)	30
26.	Sistema cúbico centrado en la cara (FCC)	31
27.	Sistema hexagonal compacto (HCP)	32
28.	Inclusión de escoria en cordones de soldadura	36
29.	Crecimiento epitaxial de los cristales al solidificar.	37
30.	Relación de aspecto de ranura de soldadura	38
31.	Influencia del tiempo y la temperatura en el relevado de esfuerzos en el acero	46
32.	Influencia de la temperatura y el tiempo en la dureza de un acero SAE 1035.....	49
33.	Máscara de buceo de medio rostro.....	52
34.	Máscara de buceo de rostro completo.....	52
35.	Casco de buceo completo	53
36.	Clasificación de los trajes de buceo de acuerdo al aislamiento al medio.....	54
37.	Traje seco para buzo	55
38.	Traje húmedo para actividades de buceo	56
39.	Traje semiseco.....	57
40.	Guantes de neopreno para buzos.....	58
41.	Botines de neopreno para buzos	58
42.	Soldadura húmeda subacuática	59

43.	Soldadura húmeda SMAW en acero con socavación visible y poros de gas..	66
44.	Microestructura de la junta, soldadura húmeda SMAW hecha con acero S420G2 + M: fisura extensa visible en el límite entre la soldadura y la ZAT	67
45.	Microestructura de la junta, soldadura húmeda SMAW hecha en acero S420G2 + M usando un electrodo austenítico húmedo: numerosas grietas ramificadas visibles.....	68
46.	Diagrama de enfriamiento continuo (CCT) que muestra una región de bainita con curvas de enfriamiento superpuesta; muestra la temperatura a la que comenzará cada microestructura	70
47.	Marcas de rectificadores y generadores de corriente continua	72
48.	Sistema de control de soldadura Piranha.....	72
49.	Interruptores de cuchillas	73
50.	Tipos de cables y conectores utilizados en soldadura submarina.....	75
51.	Calibres de cables recomendados según su longitud	76
52.	Modelos de pinzas portaelectrodos.....	77
53.	Nomenclatura de una pinza portaelectrodos para soldadura submarina	78
54.	Tipos de electrodos para soldadura húmeda	79
55.	Posiciones de soldadura a tope	83
56.	Posiciones de soldadura en tubería	85
57.	Posiciones para soldadura de filete.....	86
58.	Posiciones para la soldadura en filete de tubo	88
59.	Técnica de autoconsumo para soldadura unión tipo filete	90
60.	Rangos de corriente para soldadura bajo el agua dependiendo del diámetro del electrodo.....	91
61.	Vista de un dique utilizado para la reparación del casco de un barco, con el acceso de entrada desde la parte superior.....	97

62.	Hábitat seco utilizado para la reparación de la plataforma marina K-nodeon.....	98
63.	Soldadura en minihábitat donde el buzo soldador está parcialmente sumergido en el agua	99
64.	Sistema de soldadura de punto seco utilizado en reparaciones subacuáticas.....	100
65.	Proceso tungsteno inerte gas (TIG).....	103
66.	Proceso arco manual metálico (MMA).....	105
67.	Equipo utilizado en el proceso TIG	106
68.	Fuente de corriente continua	107
69.	Componentes de una máquina de corriente alterna	109
70.	Configuraciones del portaelectrodos TIG: (a) configuración normal, (b) configuración recta, (c) configuración corta.....	111
71.	Portaelectrodos con refrigeración forzada para el proceso TIG.....	112
72.	Cebado por raspado. G = fuente de alimentación	118
73.	Cebado por alta frecuencia.....	119
74.	Técnica de soldeo manual	120
75.	Corte con el proceso de arco-oxígeno	122
76.	Corte por electrodos ultratérmicos.....	124
77.	Procesos utilizados en el corte por arco-oxígeno	127
78.	Regulador de oxígeno.....	128
79.	Encendido de electrodos por cápsulas CDI	130
80.	Longitud de cables, diámetro y corriente para corte por electrodo ultratérmico	132
81.	Electrodos Sea cut para corte por arco-oxígeno.....	139
82.	Corte transversal de un electrodo ultratérmico	141
83.	Diámetros de electrodos utilizados en función del espesor de placas de acero.....	142
84.	Electrodos exotérmicos Exodus International	143

85.	Lanza térmica Indurflame	144
-----	--------------------------------	-----

TABLAS

I.	Presión de oxígeno para un determinado espesor de placa	135
II.	Presión de oxígeno dependiendo de la profundidad de trabajo	136

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
C	Carbono
cm	Centímetro
δ	Cuarta letra en minúscula del alfabeto griego
° C	Grado Celsius
°	Grados sexagesimales
kJ/mm	Kilo Joule por milímetro
m	Metro
mm	Milímetro
%	Porcentaje
α	Primera letra en minúscula del alfabeto griego
”	Pulgada
γ	Tercera letra en minúscula del alfabeto griego

GLOSARIO

ANSI	El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares, más conocido como ANSI (por sus siglas en inglés: American National Standards Institute), es una organización sin fines de lucro que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en Estados Unidos.
Austenita	Es una forma de ordenamiento específica de los átomos de hierro y carbono, también es llamada acero gamma.
AWS	La Sociedad Americana de Soldadura, más conocida como AWS (por sus siglas en inglés: American Welding Society), es una organización sin fines de lucro que proporciona códigos y normas relacionadas con los procesos de soldadura y corte en todo el mundo.
Bainita	Es una mezcla de fases de ferrita y cementita.
Disgregación	Desunión de las partes de un todo que era compacto.
Electrólisis	Proceso químico por el cual una sustancia o cuerpo inmerso en una disolución se descompone por la acción de una corriente eléctrica continua.

Entrehierro	Es la región situada en el aire entre los dos polos magnéticos de un imán o de un electroimán.
Escobilla	Son bloques de grafito que mediante resortes establecen una conexión eléctrica entre la parte fija y la parte rotatoria de un motor o generador eléctrico.
FCAW	Alambre tubular relleno de fundente (por sus siglas en inglés: <i>flux cored arc welding</i>), es un proceso en el que se forma el arco entre un electrodo alimentado continuamente y el metal base.
Ferrita acicular	Es una microestructura de la ferrita que se caracteriza por cristales en forma de aguja.
GMAW	Soldadura por arco metálico con gas (por sus siglas en inglés: <i>gas metal arc welding</i>), proceso de soldadura que establece un arco eléctrico entre un alambre que es alimentado de manera continua y la pieza a soldar.
Martensita	Es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa.
Pericia	Es la habilidad, sabiduría y experiencia en una determinada materia.

Perlita	Tipo de microestructura formada por capas alternas de hierro alfa y cementita durante el enfriamiento lento de un acero.
Permeabilidad	La permeabilidad en magnetismo es la capacidad de una sustancia o media para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos.
Poliformismo	Es la capacidad de un material de existir en más de una forma o estructura cristalina.
PSI	Libra de fuerza por pulgada cuadrada (del inglés: <i>Pounds-force per square inch</i>), es una unidad de presión que pertenece al sistema inglés de unidades.
Reacción exotérmica	Es cualquier reacción química que desprende energía.
SMAW	Proceso de soldadura manual con electrodo revestido, que genera un arco eléctrico entre un electrodo y el metal base.
Soplete	Instrumento tubular en el que se inyecta por uno de sus extremos una mezcla de oxígeno y un gas combustible, que al salir por la boquilla del extremo opuesto produce una llama utilizada para cortar o soldar metales.

TIG

Soldadura con gas inerte tungsteno (por sus siglas en inglés: *tungsten inert gas*), este proceso se caracteriza por el uso de un electrodo no consumible de tungsteno, aleado a veces con torio o circonio.

WPS

Las especificaciones del proceso de soldadura (en inglés: *weldin procedure specification*) representa un documento que relaciona las variables a considerar en la realización de una soldadura específica.

RESUMEN

La soldadura subacuática es el proceso de unión de metales por medio de la fusión de un material de aporte y un metal base que se puede llevar a cabo en contacto directo con el agua o en un hábitat seco sumergido en agua; al primero de estos métodos se le conoce como soldadura subacuática húmeda; mientras que al segundo se le llama soldadura subacuática seca.

Como las condiciones ambientales para la soldadura subacuática no son las mismas que para las uniones en superficie, se debe de contar con equipo especial para llevar a cabo este proceso; también, se debe tener en cuenta que los tiempos de enfriamiento y solidificación de la soldadura son menores a los de uniones realizadas en superficie; esto repercute en la formación de estructuras con una elevada dureza en los alrededores de la soldadura, que pueden causar falla en la junta al momento de estar en servicio. Para evitar este inconveniente, los electrodos cuentan con un revestimiento que al evaporarse crea burbujas; su función es reducir la transferencia de calor de la junta hacia el agua, lo que repercute en mayores tiempos de enfriamiento y en una mejora de las propiedades mecánicas de la soldadura.

En el proceso de corte subacuático las temperaturas alcanzadas son mayores que para los cortes en superficie, para el corte de metales bajo agua se utilizan distintos procesos que dependerán del tipo de metal o material a cortar. Para realizar cortes en metales ferrosos el oxígeno es el gas a utilizar; para metales no ferrosos se puede emplear el corte por electrodo revestido, corte arco gas. Cuando es necesario realizar el corte de materiales que no son metálicos se puede utilizar el corte por electrodos ultratérmicos.

OBJETIVOS

General

Describir los procesos de corte y soldadura subacuáticos según la especificación D3.6 de la AWS.

Específicos

1. Describir el equipo de protección personal utilizado en las operaciones de corte y soldadura subacuática.
2. Evaluar los procesos de soldadura subacuática húmeda y seca.
3. Analizar el equipo requerido para llevar a cabo los procesos de soldadura subacuática húmeda y seca.
4. Determinar los distintos tipos de soldadura utilizados en la soldadura húmeda y seca.
5. Examinar los tipos de electrodos y gases empleados en el proceso de soldadura subacuática.
6. Analizar el equipo requerido para realizar el proceso de corte subacuático.
7. Evaluar las distintas técnicas de corte de metales bajo el agua.

INTRODUCCIÓN

Entre los años de 1939 a 1941 se desarrolló la Segunda Guerra Mundial, en este evento sin precedente estuvieron involucradas la mayor parte de las naciones del mundo, incluidas las grandes potencias. Estas naciones contaban con tanques, submarinos y armamentos nunca antes vistos. Durante este conflicto los vehículos de transporte marítimo y terrestre sufrieron ataques graves o leves, en cada uno de estos ataques los vehículos podían ser destruidos en su totalidad o necesitarían de grandes reparaciones.

Este fue el punto de partida de un nuevo proceso de soldadura de metales; también, influyó para que se le diera la importancia que no tenía hasta ese momento el corte de metales bajo agua. Ambas técnicas tenían como objetivo realizar las reparaciones de barcos y submarinos en mar abierto; así es como nacen los procesos de corte y soldadura subacuáticos.

El tema de investigación en este documento es la soldadura subacuática, se pretende abordar los dos métodos en los que se puede llevar a cabo esta técnica: la soldadura subacuática húmeda y soldadura seca, ambos métodos se realizan en el agua.

Posterior a conocer los efectos de cada una de estas soldaduras sobre el metal base y sobre sus propiedades mecánicas, se describirán los equipos utilizados; el procedimiento correcto para realizar ambas soldaduras y también se analizará que tipo de soldadura es la más adecuada dependiendo la profundidad, los materiales a soldar, los requerimientos de la junta en cuanto a

propiedades mecánicas y el costo económico de llevar a cabo uno de estos procesos.

Para el proceso de corte bajo agua se analizarán los diversos métodos de corte; el empleo de cada uno de estos dependerá del material a trabajar. Se conocerá cual es la mejor técnica para realizar las operaciones de corte en metales ferrosos, no ferrosos y en materiales que no son metales. Finalmente, se analizará el equipo para cada proceso de corte, el tipo de gas a emplear y los electrodos, esto último en caso de ser utilizados para el corte de material.

La finalidad de este proyecto es el de presentar un documento que sirva como un apoyo a personas, empresas o cualquier interesado en conocer los procesos de soldadura y corte subacuático y que pueda contribuir al desarrollo de las personas que ya se encuentran involucrados en este tema.

Se presentan seis capítulos, en los cuales se analiza y describe la historia de la soldadura subacuática, se realiza un repaso de la soldadura SMAW; el cual, según mi opinión, es el proceso en el que se fundamenta esta nueva técnica; se describen los dos procesos de soldadura subacuática y se finaliza con el proceso de corte bajo agua.

1. ANTECEDENTES

Los inicios de la soldadura bajo el agua se dan en el año de 1974, este es el año en el que la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) forma un subcomité, el cual fue llamado D3b; esta agrupación tuvo el encargo de realizar las investigaciones pertinentes sobre esta nueva técnica y fue el ente que tuvo la tarea de realizar especificaciones para llevar a cabo estos procesos de forma correcta; estas normas planteadas por este comité tenían como objetivo proveer estándares para calificar a soldadores submarinos y los procedimientos correctos de cómo llevar a cabo los procesos de soldadura y corte bajo agua.

Para realizar estas especificaciones el comité D3b estuvo conformado por ingenieros, petroleras y personas que representaban las agencias gubernamentales de los Estados Unidos, entre otros. Las primeras especificaciones sobre este proceso se dieron a conocer en el año de 1983; sin embargo, en el año de 1999 estas fueron desarrolladas de acuerdo a los requerimientos del Instituto Americano de Estándares (ANSI). Con el apoyo de esta institución, estas especificaciones se aplicaron prontamente en Asia, Europa y Oriente Medio, lo cual tuvo como repercusión que estas reglamentaciones fueran aprobadas brevemente alrededor del mundo.

Antes de la conformación del comité D3b en el año de 1974, existieron varias operaciones realizadas bajo agua; la más utilizada en ese momento fue el corte bajo agua; una de estas operaciones de corte subacuático se llevó a cabo en el año de 1908, en este proceso fue utilizado un soplete común de corte, en este tipo de soplete la llama de calefacción y la llama de corte salen de la boquilla del soplete; sin embargo, al emplear este tipo de soplete el

resultado no fue satisfactorio, esto debido a que el soplete empleado presento problemas al momento de calentar la pieza.

Posteriormente a realizar este primer intento de corte subacuático fue utilizada una cámara hermética donde se producía la combustión de los gases empleados en el corte; esta cámara estaba provista de un ducto por el cual eran evacuados los gases productos de la combustión.

Al perfeccionarse la técnica de corte subacuático, se puso a prueba en el año de 1926 para realizar el salvamento de un submarino norteamericano; este submarino se encontraba 43 metros de profundidad, en este proceso de corte fue empleado un soplete oxhídrico el cual realizó las operaciones de corte en cables, láminas y pernos con éxito. Se demostró que el corte bajo agua era exitoso a profundidades mayores a 10 metros

Figura 1. **Buzos profesionales listos para ingresar al agua, año 1926**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

El ataque hacia Pearl Harbor en el año de 1941 y la Segunda Guerra Mundial fueron el punto de partida para que los procesos de corte y soldadura subacuáticos tomaran la importancia que no habían tenido hasta ese momento, esto debido a que fueron necesarias reparaciones en los cascos de los barcos y también el cambio de remaches en mar abierto; estas reparaciones impulsaron la investigación de los procesos de corte y soldadura bajo agua; uno de estos investigadores fue el químico holandés P.C Van Der Willigen empleado en la fábrica Philips, quien en el año de 1946 creó electrodos impermeables, utilizados para el proceso de soldadura.

El proceso de corte con soplete oxhídrico fue muy utilizado hasta 1942, año cuando un grupo de fuerzas navales perfeccionaron el proceso de corte arco – oxígeno; en este proceso eran utilizados electrodos de carbón, los cuales eran atravesados por oxígeno y una corriente eléctrica; al combinar estos elementos era posible realizar cortes en metales que se encontraban bajo el agua.

Figura 2. **Escuela de Salvamento de la U.S. NAVY, año 1942**

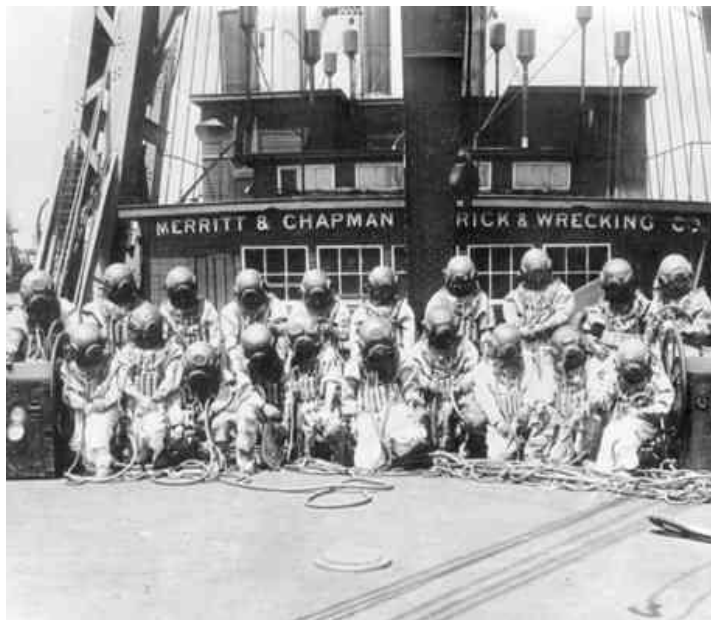


Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Al avanzar la Segunda Guerra Mundial y aumentar las necesidades de reparaciones de buques en mar abierto, se hizo necesario desarrollar nuevos elementos para poder mejorar los procesos de corte y soldadura bajo el agua. Dentro de estos elementos se encontraban los electrodos impermeables, nuevos sopletes y pinzas portaelectrodos; estos cambios aumentaron la confiabilidad en los procesos y facilitaron las reparaciones en mar abierto.

Figura 3. **Equipo de buzos salvamentistas de la Segunda Guerra Mundial**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Con los primeros avances hechos en estos procesos a partir de la Segunda Guerra Mundial, se dan en la década de 1960, y gracias al apoyo de la industria petrolera en alta mar, nuevas aplicaciones a los procesos de corte y

soldadura; estas técnicas ya no solamente fueron empleadas para la reparación de buques en mar abierto, también, fueron utilizadas para la construcción de estructuras bajo el agua como tuberías. De estos nuevos campos de aplicación para los procesos bajo el agua, y debido a los posteriores usos que se les dieron, estas técnicas fueron mejorándose con el pasar del tiempo.

Al irse mejorando las técnicas de corte y soldadura subacuática en los años posteriores a 1960 fueron empleadas en salvamentos de emergencia; esto sucedió exactamente en el año de 1975, cuando fueron realizadas 62 reparaciones en el casco de un barco; estas reparaciones fueron realizadas por un grupo de 18 buzos soldadores que trabajaron durante 53 días, consumiendo un total de 500 libras de electrodo al realizar las reparaciones requeridas.

Figura 4. **Buzo con equipo Dragger en una plataforma Off Shore en el golfo de México en el año 1960**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Desde 1971 hasta la fecha, la soldadura subacuática ha sido la técnica preferida para reparar plataformas petroleras; en años más recientes, como en 1990, fueron realizadas reparaciones en la tubería de combustible de la planta nuclear de Wolf Creek en Kansas.

Figura 5. **La industria Off Shore, uno de los principales campos de acción de la soldadura subacuática**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

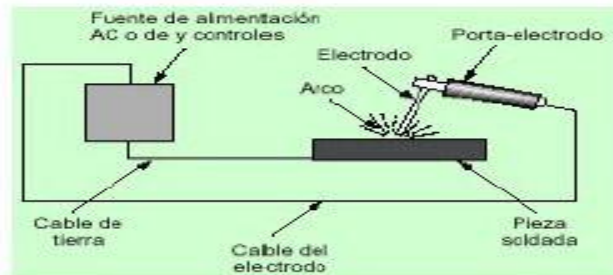
http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. Soldadura SMAW (*shielded metal arc welding*)

La soldadura por arco metálico con electrodo revestido engloba distintas técnicas para realizar este proceso; entre estas técnicas esta la soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido, también llamada soldadura eléctrica; en este tipo de proceso se pueden unir dos o más metales gracias al calor generado por un arco eléctrico controlado, el aumento de temperatura derrite una varilla de electrodo revestido; el derretimiento del electrodo ocurre cuando el circuito eléctrico entre la tierra que se conecta a la pieza a soldar y el porta electrodo se rompe; esto produce que los electrones salten a grandes velocidades desde la punta del electrodo hacia la pieza a unir, produciéndose así el arco eléctrico, el cual derretirá la varilla de electrodo debido a la temperatura alcanzada durante la soldadura.

Figura 6. Esquema del proceso de soldadura eléctrica



Fuente: *Soldadura eléctrica al arco: normas de seguridad.*

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_494.pdf. Consulta: 30 de septiembre de 2017.

Para que el arco eléctrico se mantenga estable es necesario mantener una distancia adecuada entre la punta del electrodo y la pieza a soldar, esta distancia es aproximadamente el diámetro de la varilla del electrodo a utilizar. La estabilidad del arco eléctrico también se logra gracias al revestimiento del electrodo. Conocido también como fundente, al calentarse el electrodo gracias al aumento de intensidad que lo atraviesa, el fundente se evapora, produciendo una atmosfera protectora alrededor del arco eléctrico y del mismo metal de aporte fundido; también, produce una escoria que se encarga de cubrir el metal fundido hasta que este se solidifique y se enfríe.

El revestimiento del electrodo crea una barrera protectora que impide que el oxígeno y nitrógeno presentes en el aire interactúen durante la fusión de los metales para producir óxidos y nitruros, capaz de debilitar la unión realizada, evitando así que se puedan producir pequeños defectos en el cordón de soldadura, como las porosidades; este defecto se debe a la incrustación del oxígeno y nitrógeno en la soldadura que produce pequeños agujeros en el mismo cordón.

Durante el proceso de soldadura eléctrica, los alrededores del cordón de soldadura en el material base sufren cambios debido a la transferencia de calor que se da desde el electrodo, lo cual se presenta en el material base como un aumento de su temperatura; esto provoca que se produzcan cambios entre la zona soldada y el límite del metal base en las orillas del cordón de soldadura; esta zona que se ve afectada por el incremento de temperatura es llamada ZAT (zona afectada térmicamente).

Esta zona tiene gran importancia en cualquier tipo de soldadura ya que en esta se dan cambios en la estructura del material base; provoca esfuerzos internos, problemas de corrosión en el lugar de la unión soldada y fallas en las

uniones. Para evitar los esfuerzos producto de la soldadura es necesario realizar algunos tratamientos térmicos.

2.2. Equipo

Conjunto de elementos que son utilizados para llevar a cabo el proceso de soldadura eléctrica. Entre ellos se pueden mencionar: la fuente de energía, portaelectrodo, pinzas de masa y cables para soldadura.

2.2.1. Fuente de energía

La fuente de energía, fuente de poder o simplemente llamada máquina de soldar puede ser clasificada en:

- Máquinas estáticas
- Máquinas rotativas

2.2.2. Máquinas estáticas

Son aquellas en las cuales no existe movimiento alguno entre sus elementos. Sin embargo, algunas de estas poseen un ventilador. Estas pueden funcionar con corriente continua (CC o DC) y corriente alterna (AC).

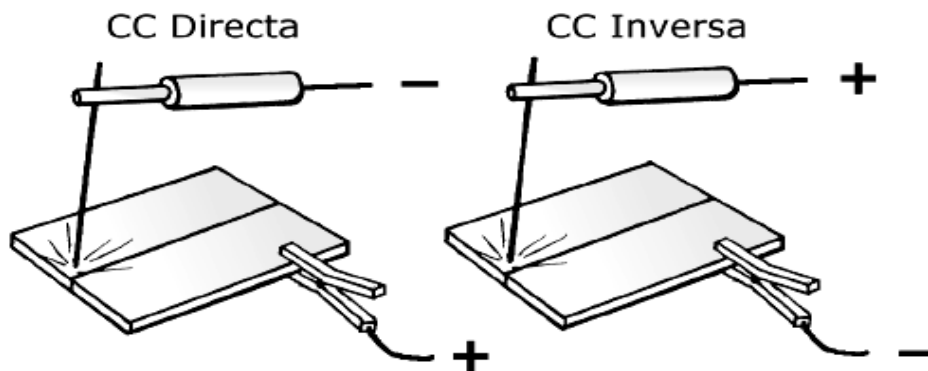
2.2.3. Máquinas estáticas DC

Es una máquina que es alimentada con corriente alterna del sistema eléctrico, emplea un transformador para cambiar los niveles de tensión e intensidad de la señal de entrada y la entrega a dispositivos electrónicos tales como diodos, tiristores o transistores. Estos elementos tienen la finalidad de

convertir la corriente alterna en corriente directa; en las máquinas de corriente continua el elemento principal es un rectificador. Cuando las máquinas estáticas funcionan con corriente alterna el principal elemento es el transformador.

La máquina estática DC funciona con corriente directa, puede utilizarse en polaridad directa y polaridad inversa; la ventaja de la corriente directa es que se pueden utilizar los diferentes electrodos que cuenten con revestimiento; también, existe una mejor estabilidad del arco eléctrico, se produce menos salpicadura al momento del proceso de soldadura y a bajos amperajes es la mejor opción.

Figura 7. **Esquema de la polaridad directa e inversa de una máquina DC**



Fuente: *Soldadura al arco eléctrico.*

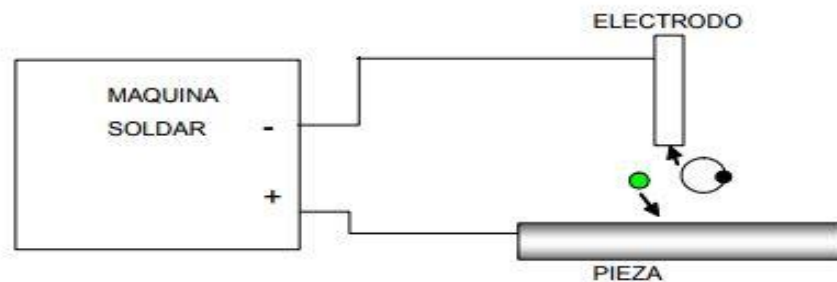
http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/soldadura_electrica_y_oxiacetilenica.pdf

f. Consulta: 20 de septiembre de 2017.

La polaridad de una máquina DC indica la dirección del flujo de corriente en el propio circuito de la máquina; la polaridad directa se da cuando el portaelectrodo se conecta al polo negativo de la máquina de soldar y la masa o

tierra se conecta al polo positivo; este tipo de polaridad presenta una mayor velocidad de fusión del electrodo y para piezas grandes presenta la ventaja de que los electrones golpeen la pieza a gran velocidad que produce un aumento de temperatura en el material base que provoca que la pieza se caliente mucho más rápido que el electrodo.

Figura 8. **Esquema de polaridad directa DC con electrones viajando a la pieza a soldar**

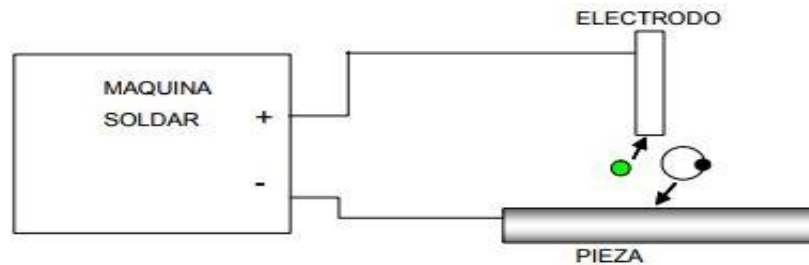


Fuente: *Soldadura por arco eléctrico SMAW.*

<https://adnervillarroel.files.wordpress.com/2010/07/soldadura-por-arco-electrico.pdf>. Consulta: 19 de marzo de 2018.

En la polaridad inversa el portaelectrodo se conecta al borne positivo de la máquina y la pinza de masa se conecta al borne negativo; en esta polaridad existe una mayor penetración en el momento de la soldadura y es utilizada al momento de soldar chapas delgadas; el elemento que define la polaridad a utilizarse en una máquina DC es el electrodo; esto hace que sea necesario seguir las instrucciones de los fabricantes de electrodos en cada proceso de soldadura para obtener los mejores resultados.

Figura 9. **Esquema de la polaridad inversa DC con electrones viajando hacia el electrodo**



Fuente: *Soldadura por arco eléctrico SMAW.*

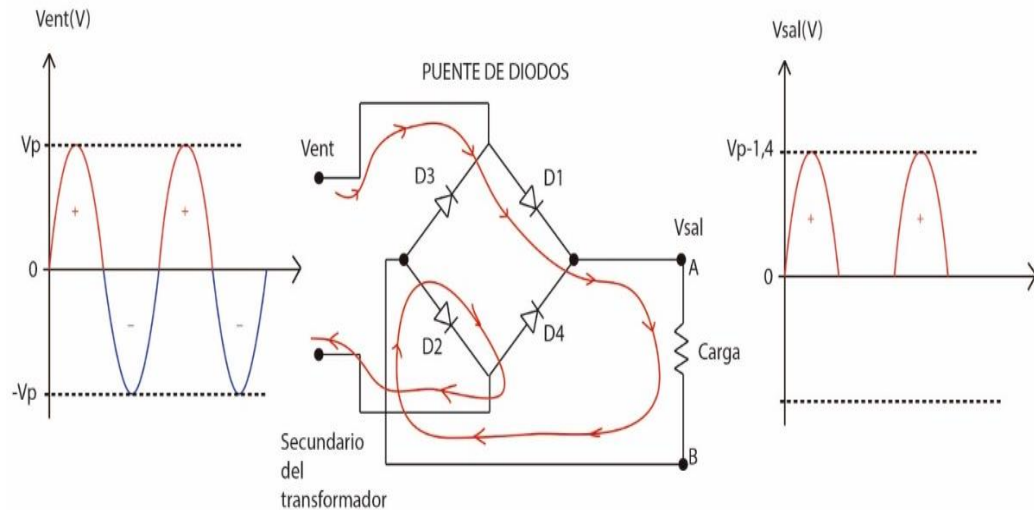
<https://adnervillarroel.files.wordpress.com/2010/07/soldadura-por-arco-electrico.pdf>. Consulta: 19 de marzo de 2018.

2.2.3.1. Rectificación por diodos de estado sólido

El diodo es un dispositivo electrónico de silicio que es empleado como un rectificador de corriente alterna a directa; este elemento permite la conducción de corriente en una sola dirección. Este componente electrónico cuenta con dos terminales, una de estas terminales es el ánodo y la otra terminal es el cátodo; para que el diodo permita la conducción de la corriente el ánodo debe ser más positivo que el cátodo, es decir que el voltaje en el ánodo debe ser mayor que en el cátodo; sin embargo, si el cátodo es más positivo que el ánodo, el diodo no conduce y se comporta como un circuito abierto.

Para convertir la corriente alterna en corriente directa son empleados cuatro diodos de silicio, llamado comúnmente puente de diodos; este elemento modifica la señal senoidal de la red eléctrica que elimina el semiciclo negativo, que dejan solamente el semiciclo positivo.

Figura 10. **Rectificación por puente de diodos de silicio**

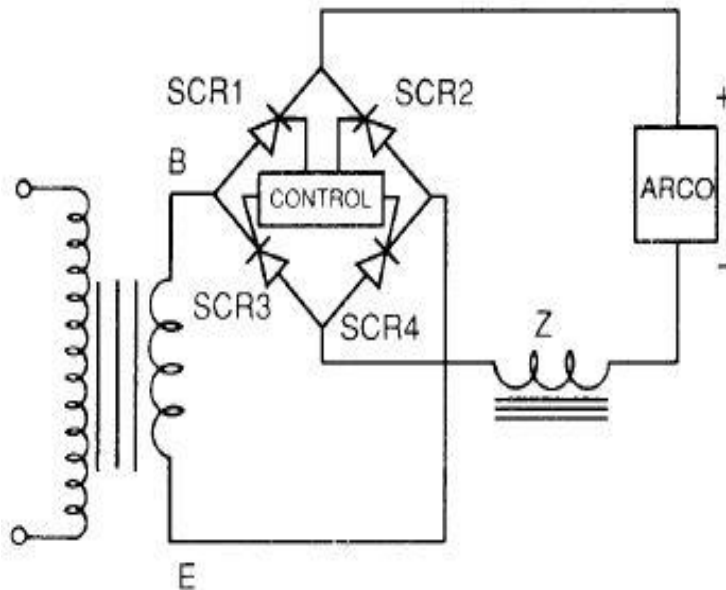


Fuente: *MrElberni, tutoriales de electricidad y electrónica*. <http://mrelbernitutoriales.com/el-rectificador-blog/>. Consulta: 11 de septiembre de 2017.

2.2.3.2. **Rectificación por tiristor de rectificador controlado por silicio (SCR)**

Cuando es necesario controlar la potencia de salida para el proceso de soldadura; altera la corriente o la forma senoidal de la onda del voltaje se hace necesario utilizar un tiristor. El SCR es una variación del diodo, la diferencia se encuentra en que el tiristor cuenta con un disparador que es llamado compuerta; el tiristor está listo para conducir cuando se le aplica una señal eléctrica positiva a la compuerta y conducirá la corriente siempre que el ánodo sea más positivo que el cátodo; al enviar una señal hacia la compuerta no se podrá interrumpir la conducción de la corriente, esto solamente sucederá cuando el voltaje en el ánodo sea menor con respecto al cátodo. Para que el tiristor vuelva a conducir es necesario mandar nuevamente una señal a la compuerta.

Figura 11. **Rectificación por tiristor (SCR)**

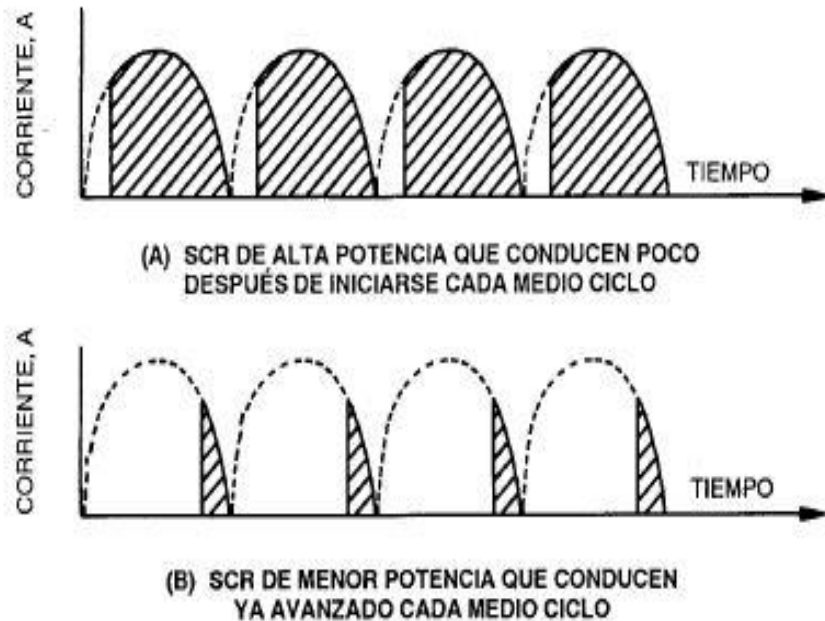


Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta 20 de agosto de 2017.

Par controlar la potencia de salida, se hace necesario conocer el momento correcto de cada semiciclo cuando se debe enviar la señal a la compuerta para iniciar la conducción, cuando es necesario una potencia de salida elevada; la conducción se debe iniciar un poco después del comienzo del semiciclo y si es necesario una potencia baja, la conducción se debe iniciar en un tiempo mayor de haberse iniciado el semiciclo; esta regulación es conocida como control de fase. La potencia que puede ser entregada con este elemento de rectificación es proporcional al área bajo la curva de la onda senoidal.

Figura 12. **Control de fase con SCR**



Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

2.2.3.3. **Rectificación por transistores**

Debido al costo elevado del transistor en comparación con los otros dispositivos rectificadores, este elemento es utilizado solamente cuando es necesario un control preciso de más de una variable en una fuente de potencia. El transistor es un elemento en el que la conducción de corriente será proporcional a la señal de control, si la señal de control es pequeña la magnitud de la corriente será pequeña, caso contrario con una señal grande de control.

La desventaja de los transistores frente a los SCR es la capacidad de conducción de corriente, ya que se hace necesario utilizar varios transistores para igualar la corriente de salida que produce un solo SCR.

2.2.4. Máquinas estáticas AC

Como se mencionó anteriormente, en una máquina estática de corriente alterna, su principal elemento *de estas máquinas* es el transformador, ya que es el encargado de cambiar el voltaje y corriente desde la red que alimenta a esta máquina a valores apropiados para el trabajo de soldadura. Ya que durante el proceso de soldadura es necesario controlar la tensión e intensidad a entregar; existen diversas formas de controlar estos dos valores: control por bobina móvil, control de derivación móvil, control de bobina secundaria derivada, reactor de núcleo móvil, control de reactor saturable y control por amplificador magnético.

Cada una de estas fuentes de potencia AC se basan en el principio de acoplamiento magnético que se produce desde una bobina hacia otra, este efecto se da sin que ambas bobinas estén en contacto directo y según la relación de vueltas que cada bobina tenga respecto de la otra. Esta relación determinará la potencia que se podrá entregar para el proceso de soldadura eléctrica.

2.2.4.1. Fuente de potencia por transformador

Este tipo de fuente utiliza transformadores de una sola fase o también llamados monofásicos, los cuales son conectados a la red eléctrica existente en los edificios y cambian los valores de tensión e intensidad que llega a estos lugares a valores adecuados para el proceso de soldadura; los transformadores de este tipo también sirven como elementos aislantes para los circuitos de

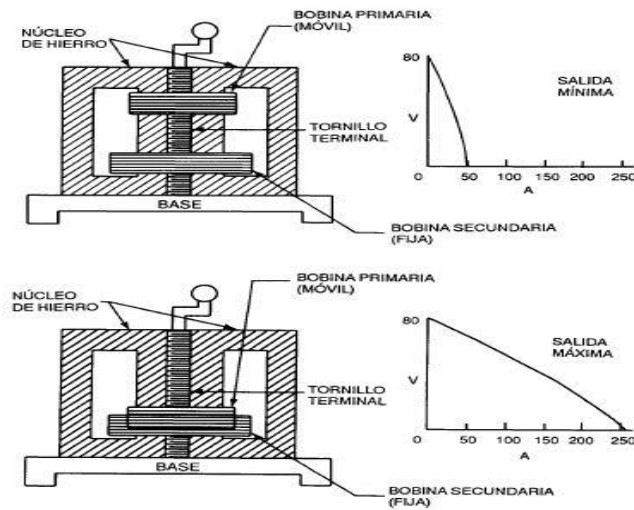
soldadura con respecto a los circuitos propios de la instalación; al existir diversas aplicaciones en el proceso de soldadura se hace necesario que los transformadores puedan entregar la potencia adecuada para cada proceso, esto hace necesario emplear elementos que puedan controlar la corriente y el voltaje entregado para cada aplicación. A continuación, se presentan estos métodos.

2.2.4.1.1. Control por bobina móvil

En este tipo de transformador como en cualquier otro existe una bobina primaria y una bobina secundaria, una de estas bobinas es móvil, mientras que la otra es fija; en la mayoría de los transformadores con este diseño la bobina secundaria se encuentra fija, a la bobina primaria se le conecta un tornillo terminal, al girar el tornillo la bobina primaria se acerca o aleja a la bobina fija.

El cambio de la distancia de una bobina con respecto a la otra regula el acoplamiento magnético, y ya que al incrementarse la separación entre ambas bobinas, disminuyen las líneas de campo magnético que atraviesan a la bobina fija, los volt amperios que podrá entregar la máquina en esta configuración entre bobinas a la salida son mínimos; lo contrario sucede cuando la bobina primaria se acerca a la secundaria; en este momento existe mayor número de línea de campo magnético en la bobina fija y, por lo tanto, se podrá entregar mayor volt amperios.

Figura 13. **Máquina corriente alterna con control por bobina**



Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

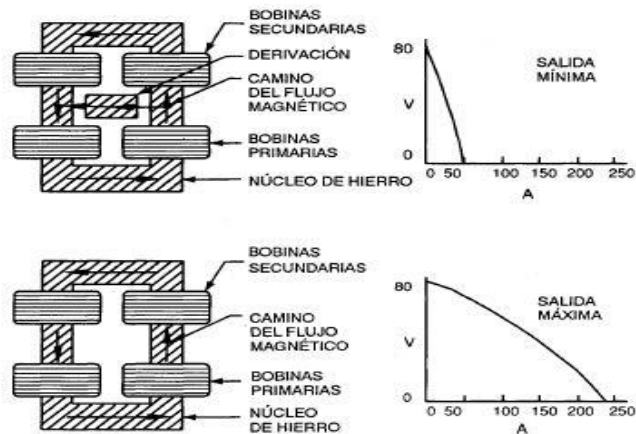
<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta 20 de agosto de 2017.

2.2.4.1.2. **Control de derivación móvil**

En este tipo de control las bobinas primaria y secundaria se encuentran fijas y la variación del flujo magnético se logra por medio de una derivación de núcleo; este núcleo está fabricado del mismo material de las chapas que forman el núcleo del transformador.

Cuando esta derivación se interpone entre ambas bobinas existe una dispersión de las líneas de campo magnético y estas no logran concatenar totalmente con el segundo devanado, esto produce que la intensidad entregada sea mínima. Cuando esta derivación no se interpone entre ambos bobinados la corriente de salida es máxima.

Figura 14. **Máquina corriente alterna con control de derivación móvil**



Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

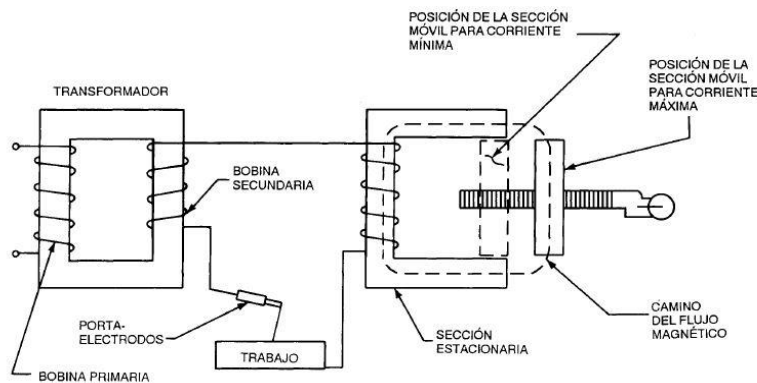
2.2.4.1.3. **Control por reactor de núcleo móvil**

Este tipo de controlador cuenta con un transformador de voltaje constante y un reactor en serie. El funcionamiento de este tipo de control se basa en el cambio de la inductancia del transformador; este cambio está relacionado con el camino por el cual las líneas de campo magnético viajarán para acoplarse con él según bobinado.

Para obtener corrientes elevadas durante el proceso de soldadura, debe existir una separación entre la pieza fija y la móvil; con esto se logra que la permeabilidad del trayecto por el cual viajarán las líneas de campo se reduzca y la corriente aumente; caso contrario, sucede cuando la pieza móvil esta

acoplada al elemento fijo, esto produce un aumento en la permeabilidad del circuito que hace que la reactancia aumente y la corriente de salida disminuya.

Figura 15. **Máquina corriente alterna con control por reactor de núcleo móvil**



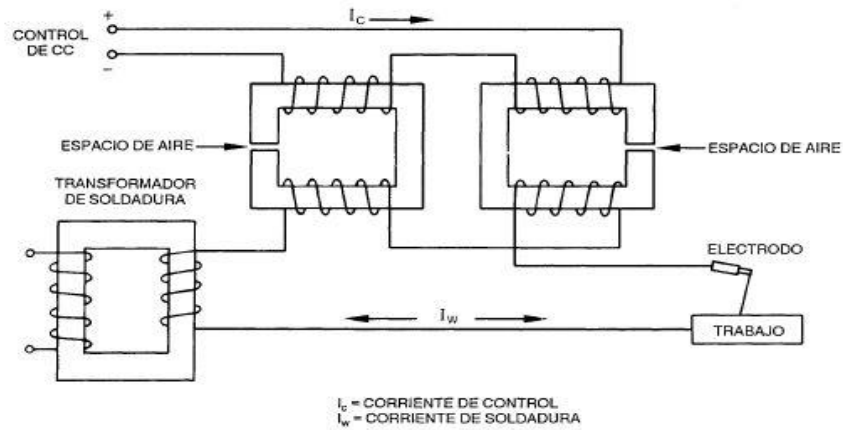
Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

2.2.4.1.4. Control de reactor saturable

El control por reactor saturable cuenta con un circuito de corriente directa de baja tensión e intensidad que es el encargado de modificar el magnetismo presente en los núcleos reactores. Los reactores saturables son llamados amplificadores magnéticos, esto debido a que al producirse una variación en la potencia del circuito DC, la potencia de salida sufrirá de un aumento considerable. Un reactor saturable tiende a producir distorsiones en la onda senoidal procedente del transformador, para evitar estas distorsiones se hace necesario colocar entrehierros en el núcleo del reactor.

Figura 16. **Máquina corriente alterna con control de reactor saturable**



Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

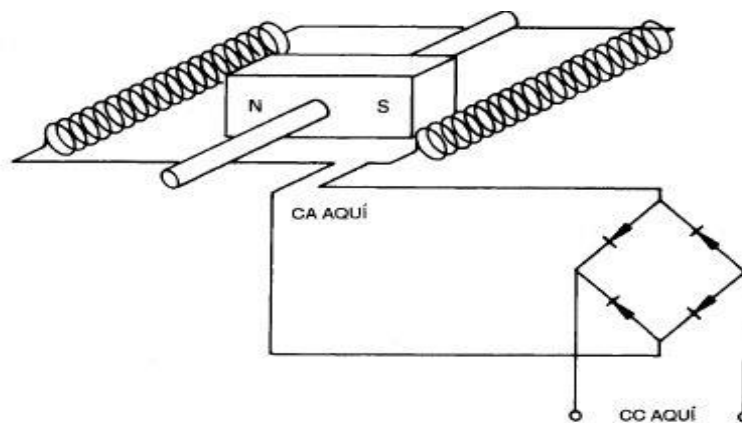
2.2.5. Máquinas rotativas

Una máquina rotativa es un dispositivo en el que uno de sus elementos está en movimiento con respecto a las demás piezas, el elemento que se encuentra en movimiento es llamado rotor y el elemento fijo se llama estator; estos dos elementos se encuentran dentro de un generador o estator.

Un generador es una máquina rotativa que convierte energía mecánica en energía eléctrica; esta energía puede ser corriente alterna y corriente directa, que posteriormente será empleada en el proceso de soldadura. La energía mecánica puede provenir de un motor de combustión interna o de un motor eléctrico.

Para el caso de los generadores de corriente alterna, estos pueden ser asíncronos o síncronos; la diferencia está en la velocidad de rotación del rotor con respecto al campo magnético resultante que se produce dentro de cada uno de estos generadores. En el generador asíncrono la velocidad de rotación del rotor no es la misma que la del primotor, el cual gira a velocidad mayor a la de sincronismo, y que entrega la energía producida por el estator. Un generador síncrono es una máquina en la cual la velocidad de rotación del rotor está ligada con la frecuencia de la red a la cual está conectada. Para los generadores de corriente alterna la diferencia con los de corriente alterna, se encuentra en que las bobinas del campo magnético se encuentran en el rotor, en lugar de encontrarse en el estator.

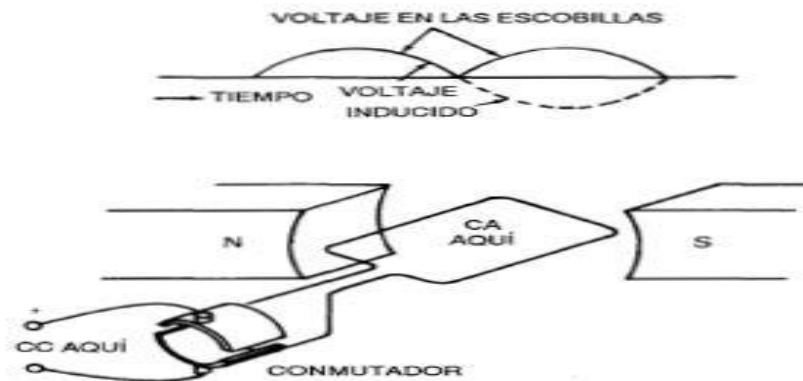
Figura 17. **Esquema de un generador con campo magnético contenido en el rotor**



Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

Figura 18. **Esquema de un generador con campo magnético contenido en el estator**



Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

En este tipo de máquinas el estator cuenta con las bobinas de la corriente para soldadura, al girar el rotor se produce la energía necesaria en corriente alterna para el proceso de soldadura.

Para la obtención de corriente directa a partir de generadores se emplean los distintos métodos de rectificación vistos para las máquinas estáticas o se pueden emplear escobillas en el arrollamiento del rotor.

2.2.6. Característica estática y dinámica

Estas características afectan la estabilidad del arco eléctrico de distinta manera, esto dependiendo del proceso de soldadura que se realice. Para la característica estática, se emplea un grupo de curvas de voltaje de salida contra corriente de salida, estas curvas también son llamadas curvas volt-ampere.

2.2.6.1. Característica estática

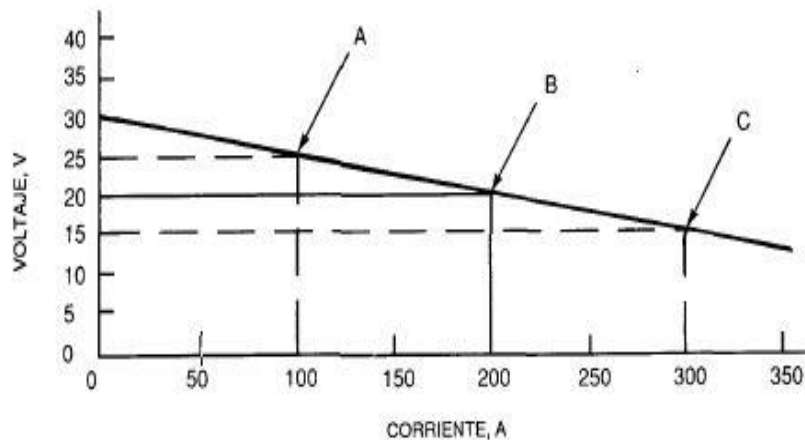
Dependiendo de la característica volt-amperes las fuentes pueden ser:

- Fuentes de voltaje constante
- Fuentes de corriente constante

2.2.6.1.1. Fuentes de voltaje constante

Este tipo de característica es la adecuada para procesos de soldadura por arco de metal con gas, soldadura de arco sumergido y por arco con núcleo de fundente. Esta propiedad sirve para obtener un arco eléctrico de longitud constante, un pequeño cambio en la tensión producirá una variación apreciable en el nivel de corriente de salida, lo que producirá que la tasa de fusión del electrodo cambie en el momento de soldar.

Figura 19. Curva volt-amperes para una fuente de voltaje constante



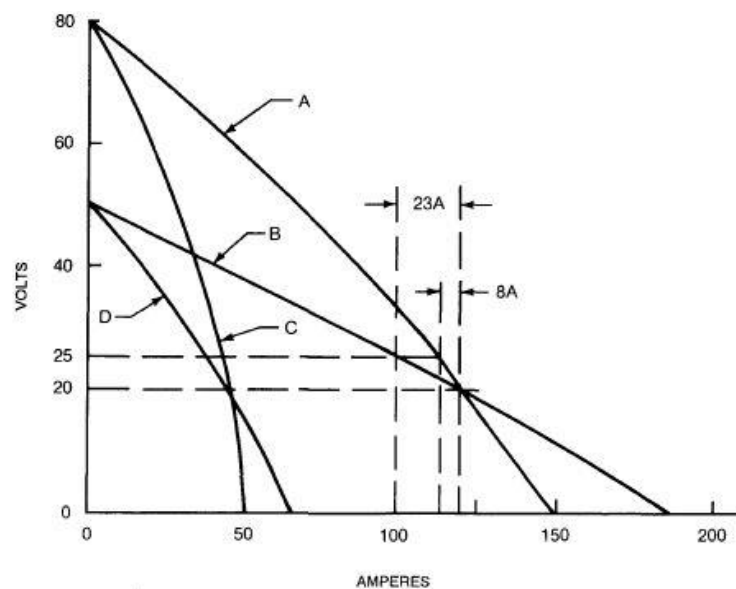
Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

2.2.6.1.2. Fuentes de corriente constante

En este tipo de fuentes el cambio en la corriente es muy pequeño, por lo tanto, se asemeja a un proceso a corriente constante, el cual tendrá una quema de electrodo casi constante mientras la longitud del arco eléctrico no sea muy grande. Una curva con una menor pendiente podrá brindar una mayor variación de la corriente al cambiar la longitud del arco, esto ayudaría a controlar la tasa de fusión y el tamaño del charco cuando exista dificultad para soldar en una posición determinada.

Figura 20. Curva volt-ampere para una fuente de corriente constante



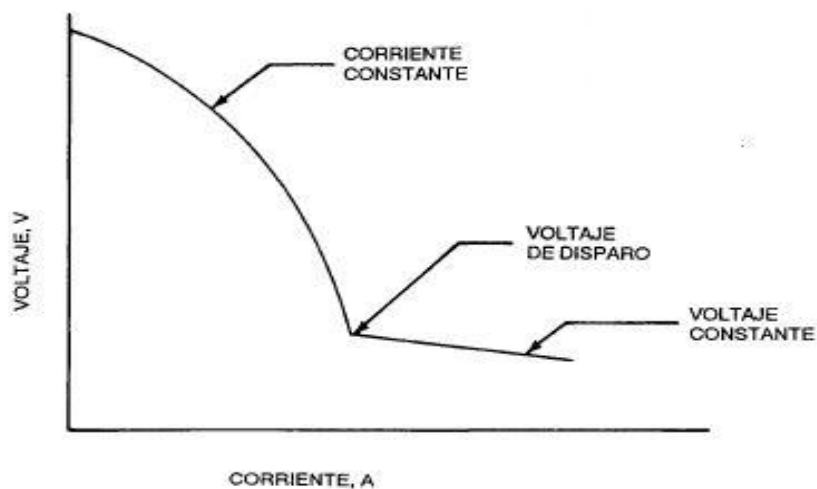
Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

2.2.6.1.3. Fuentes combinadas de voltaje y corriente constante

Este tipo de curva se emplea en el proceso SMAW ya que ayuda en encendido del arco y evita que el electrodo se pegue en el charco si se disminuye la distancia del arco.

Figura 21. **Curva volt-ampere para una fuente de voltaje y corriente constante**



Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

2.2.6.2. Características dinámicas

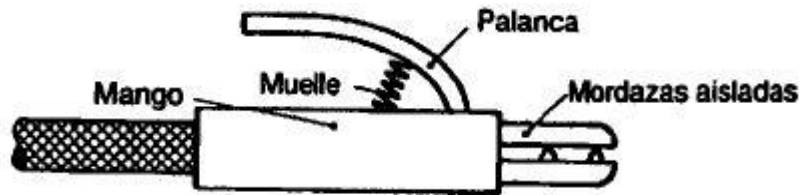
Las características dinámicas se determinan realizando mediciones de corriente y voltaje transitorias que aparecen durante el arco eléctrico en el proceso de soldadura; estas características son variaciones instantáneas en

intervalos muy cortos de tiempo del orden de milésimas de segundo. El arco eléctrico que se produce en el proceso de soldadura cambia continuamente, estos cambios se dan, durante el encendido del arco, cuando la longitud del arco eléctrico cambia, cuando se transfiere metal a través del arco. Estos cambios abruptos deben ser cubiertos por la fuente de potencia, para obtener un proceso estable durante la quema del electrodo. Para tener un conjunto de buenas características dinámicas de la fuente de potencia es necesario realizar el correcto diseño de las máquinas de soldar; esto ayudará a obtener una mayor uniformidad en la transferencia del metal, una reducción en la salpicadura y una menor turbulencia en el charco del metal depositado.

2.2.7. Portaelectrodos

El portaelectrodos es un elemento cuya función principal es la sujeción del electrodo durante el proceso de soldadura. Este dispositivo es el medio por el cual la corriente viaja desde la fuente de potencia, atraviesa el cable y llega hasta el electrodo. Está formado por un mango de un material aislante que impide que el soldador esté en contacto con el circuito de soldadura, cuenta con quijadas de cobre que hacen contacto directo con el núcleo del electrodo para que este sea el camino por el cual la corriente llega hasta el electrodo y produce el calor necesario para que este se derrita durante el proceso; para evitar que el portaelectrodo se caliente y que este calor sea una molestia para el soldador es necesario mantener en buenas condiciones las quijadas. Los portaelectrodos vienen en distintos tamaños y capacidades, esto para hacer el trabajo lo más fácil posible en cuanto a su manipulación y que pueda soportar la corriente que lo atravesara sin sufrir calentamiento en sus quijadas.

Figura 22. **Portaelectrodo**



Fuente: *Soldado manual con electrodos revestidos (SMAW)*.

<http://solysol.com.es/data/documents/soldadura=20electrodo=20rec.doc.pdf>. Consulta: 10 de noviembre de 2017.

2.2.8. **Pinza de masa**

La pinza de masa es un dispositivo que hace la conexión entre la pieza de trabajo y el cable de masa de la fuente de potencia, este elemento debe de ser lo suficientemente fuerte para sujetar la pieza y debe de ser de fácil y rápida conexión para el soldador. Para el trabajo donde la corriente no es de gran magnitud se emplea una pinza tensada con resorte y para trabajos donde la corriente demandada es muy elevada se emplea una abrazadera de tornillo.

Figura 23. **Pinza de masa tensada con resorte**



Fuente: *Soldadura al arco eléctrico*. http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/17.pdf.

Consulta: 20 de septiembre de 2017.

2.2.9. Cables para soldadura

Estos cables sirven para conectar la fuente de potencia a la pinza de masa y al portaelectrodo, estos cables deben ser flexibles para una fácil manipulación de estos por el soldador. Este cable consta de varios hilos de cobre o aluminio que se encuentran trenzados dentro de un material aislante que puede ser hule sintético o plástico, que cuente con una elevada resistencia eléctrica y térmica a fin de evitar cualquier daño a la persona que lo utilizara.

El diámetro de los cables de soldadura depende del amperaje a utilizar, la longitud de circuito de soldadura y del ciclo de trabajo de la máquina, esto para conductores de cobre. Cuando se emplean cables de aluminio, el tamaño de los cables deberá ser dos veces mayor al calibre empleado para cables de cobre. Al tener circuitos de soldadura lo suficientemente largos es necesario utilizar conductores de un diámetro mayor debido a la caída de voltaje en los cables, y así evitar una pérdida de potencia en los conductores.

Figura 24. Diámetro recomendado para cables de cobre para soldadura

Tamaños recomendados para cable de soldadura de cobre						
Fuente de potencia		Tamaño de cable AWG para el tramo combinado de cables de electrodo y tierra				
Tamaño en amperes	Ciclo de trabajo, %	0 a 15 m (0 a 50 pies)	15 a 30 m (50 a 100 pies)	30 a 46 m (100 a 150 pies)	46 a 61 m (150 a 200 pies)	61 a 76 m (200 a 250 pies)
100	20	6	4	3	2	1
180	20-30	4	4	3	2	1
200	60	2	2	2	1	1/0
200	50	3	3	2	1	1/0
250	30	3	3	2	1	1/0
300	60	1/0	1/0	1/0	2/0	3/0
400	60	2/0	2/0	2/0	3/0	4/0
500	60	2/0	2/0	3/0	3/0	4/0
600	60	2/0	2/0	3/0	4/0	*

* Usar dos cables 3/0 en paralelo.

Fuente: *Libros de ingeniería mecánica.*

<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>. Consulta: 20 de agosto de 2017.

2.3. Estructura cristalina

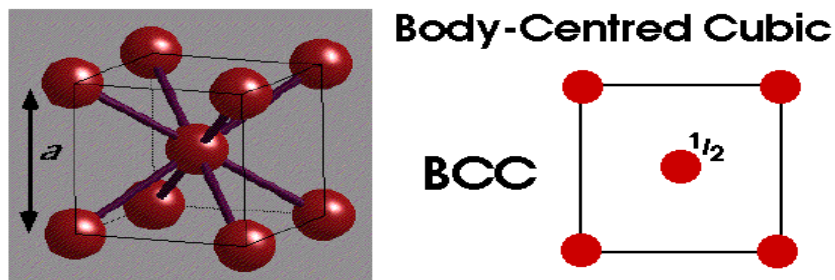
Un metal está compuesto como cualquier otro elemento de átomos y estos a su vez están ordenados de distintas formas; este ordenamiento es importante para determinar la microestructura de este material y de las propiedades que posee; para los metales el arreglo de los átomos tiene una distribución relativamente uniforme, esto es llamado ordenamiento general; este acomodo es repetitivo dentro de la estructura de un metal formando un patrón, el cual es llamado red espacial.

Las estructuras cristalinas de la mayoría de los metales se cristalizan bajo los sistemas cúbicos y hexagonal; por esta razón, se hará un pequeño repaso para conocer el comportamiento en el proceso de soldadura.

2.3.1. Sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC)

Este tipo de estructura tiene un átomo en el centro del cuerpo de allí deriva su nombre, bajo este tipo de estructura cristalizan metales como el tungsteno, cromo, vanadio, molibdeno, sodio, hierro delta (δ) y hierro alfa (α).

Figura 25. Sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC)

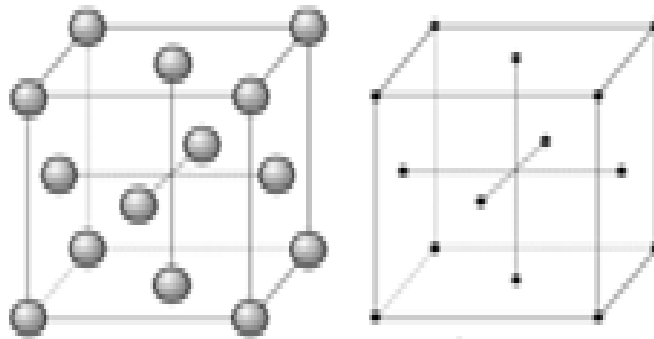


Fuente: PÉREZ RODRÍGUEZ, Carlos Humberto. *Texto alternativo_CM_Parte_1_DE_2*. p. 53.

2.3.2. Sistema cúbico centrada en las caras (FCC)

En este sistema existe un mayor número de átomos en comparación con la estructura BCC; sin embargo, no existen átomos en el centro de las caras del cubo. Bajo este tipo de sistema solidifican el hierro gamma (γ), cobre, plomo, oro, plata, platino y níquel.

Figura 26. Sistema cúbico centrado en la cara (FCC)



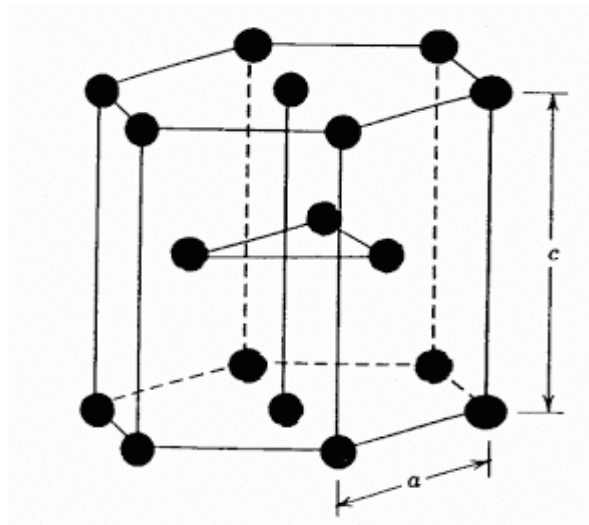
Fuente: *e-educativa*. [http://e-](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1091/html/3_composicin_de_la_materia_estructuras_cristalinas.html)

[educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1091/html/3_composicin_de_la_materia_estructuras_cristalinas.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1091/html/3_composicin_de_la_materia_estructuras_cristalinas.html). Consulta: 11 de octubre de 2017.

2.3.3. Sistema hexagonal compacto (HCP)

Esta estructura es una forma derivada de la red hexagonal; cuenta con dos planos hexagonales en los cuales existen átomos en el centro y en la esquina de ambos planos; los metales como el zinc, titanio, magnesio y cobalto cristalizan bajo esta estructura.

Figura 27. **Sistema hexagonal compacto (HCP)**



Fuente: *miniphysics*. <https://www.miniphysics.com/hexagonal-close-packed-structure.html>.

Consulta: 17 de junio de 2018.

2.4. Metalografía

La metalografía es la ciencia que estudia las características en la estructura cristalina a nivel microscópico de un metal o una aleación. Esta disciplina determina el tamaño, la forma del grano y la distribución de fases presentes en una aleación.

Ya que el proceso de soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido es realizado al unir dos metales en su mayoría metales ferrosos es necesario conocer el comportamiento que tienen estos metales en el proceso de soldadura.

Existen materiales que tienen la capacidad de cambiar de estructura cristalina en estado sólido; esta propiedad es llamada poliformismo y si esta

característica en los materiales puede ser reversible, es llamado alotropía; este cambio en la red espacial de los metales está en función del cambio de temperatura que sufren en determinados procesos, tal como el de la soldadura eléctrica. El hierro es un metal alotrópico ya que cambia de estructura cristalina al ser llevado a la temperatura de cristalización o recristalización.

La cristalización es el cambio del estado líquido al sólido, y este cambio ocurre en dos etapas: la formación de núcleos y el crecimiento del cristal.

Cuando un metal como el hierro pasa de un estado líquido al sólido, al principio de esa transición, se empiezan a formar pequeños núcleos sólidos dentro del material líquido; esto ocurre a temperaturas menores a la de cristalización y un tiempo de enfriamiento muy lento. Los núcleos que se pueden formar en un material dependen del tipo de material y las condiciones del enfriamiento; ya cuando existen pequeños núcleos, el resto del líquido se adhiere a los núcleos ya formados, hasta que el metal líquido se termine; a esta conformación de núcleos de metal sólido a partir de metal líquido se le llaman dendritas. Al terminar el proceso de solidificación, la microestructura del metal formado tendrá un gran número de cristales adyacentes unos con otros, a estos cristales se les llama granos.

Muchas propiedades de un metal o de una aleación dependen del tamaño del grano que se forma durante el enfriamiento, el tamaño del grano es función de la rapidez de formación de núcleos y del crecimiento del grano; si al momento del enfriamiento se forman muchos núcleos, el material será de grano fino, y será de grano grueso si en la cristalización se forman pocos núcleos.

La rapidez de enfriamiento es el factor más importante para la formación de núcleos o nucleación, es por esto por lo que el enfriamiento en un metal o

aleación debe ser muy lento o constante a modo de permitir la formación de un gran número de núcleos; en materiales como el acero, al agregar pequeñas impurezas como el aluminio y titanio, propician a tener una mejor formación de núcleos. Durante la solidificación de un metal o aleación se sabe que los átomos se pueden alinear ordenadamente; sin embargo, existen átomos que no se ordenen adecuadamente, a esta disposición se le conoce como defecto puntual, los más importantes para el proceso de soldadura son los defectos intersticiales y el defecto sustitucional. El primero de ellos ocurre cuando un átomo se aloja en medio de dos átomos en un lugar donde no le correspondería estar; para el segundo de estos defectos puntuales, existe un cambio de un átomo de una clase por otro; este último es empleado para realizar aleaciones en metales; ambos defectos pueden ser incrustados intencionalmente para mejorar las propiedades de un metal o aleación.

Para conocer el comportamiento que se espera tener en una aleación de hierro carbono, en función de la temperatura, presión y la composición, se emplea el diagrama de hierro carburo de hierro. Esta es una representación gráfica del comportamiento que tendrá el hierro en función de carbono agregado y la temperatura de fusión. En este diagrama se estudian las aleaciones de metales en equilibrio, la palabra equilibrio se refiere al calentamiento o al enfriamiento lento de la aleación, esto da el tiempo necesario para que se pueda producir un cambio de fase.

En la soldadura existen grandes diferencias con el proceso de fusión de metales, ya que en estos últimos la cantidad de metal fundido y el tiempo de enfriamiento son mayores a los que se dan durante la soldadura, en el proceso de soldadura el tiempo de solidificación del cordón se da en cuestión de segundos y la cantidad de metal depositado es muy poco. Al formarse las diversas estructuras cristalinas durante la solidificación se crea la llamada

estructura primaria o de solidificación, esta estructura comprende las reacciones metal-gas, reacciones metal-escoria y reacciones que se pudieran producir durante la solidificación de dicho proceso, estas reacciones determinarán la estructura cristalina de la soldadura, en este tipo de estructura se emplea el diagrama hierro-carbono.

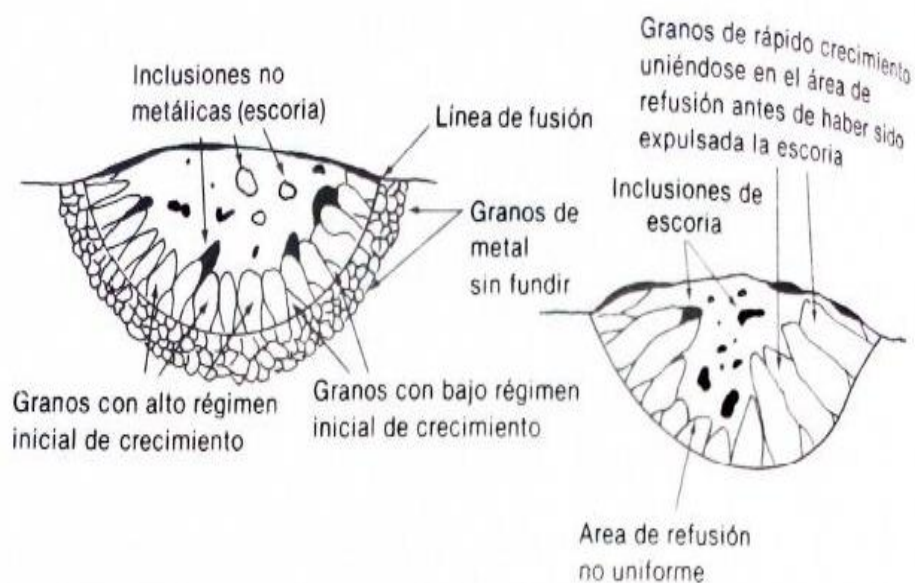
Posteriormente, cuando el metal se encuentra en estado sólido, se alcanza la estructura secundaria o final, este tipo de estructura está relacionada con el enfriamiento de la pieza soldada hasta la temperatura ambiente, en el caso de los aceros existe una gran importancia para la estructura secundaria, debido a que de esta dependen las propiedades mecánicas que se deseen obtener, según el tratamiento térmico aplicado al material; las velocidades de enfriamiento ocasionan que las transformaciones de las fases no se den en equilibrio; esta razón impide el uso de diagramas de equilibrio, por lo tanto son empleados los diagramas de temperatura-transformación-tiempo (TTT).

Durante el proceso de soldadura, al momento de depositar el metal derretido en la pieza base se dan una serie de fenómenos como la fusión, solidificación, las reacciones que se dan entre el metal-gas y metal-escoria y la reacción que existe en zonas alrededor del cordón de soldadura (ZAT).

Al momento de la fusión de los metales presentes en la soldadura, se crea una pequeña pileta de material fundido, la cual está compuesta por el material de aporte y el material base. Este material fundido se mantiene en estado líquido durante un breve tiempo en el cual el calor de la soldadura está cerca de esta pileta. Debido al rápido enfriamiento de la pileta de soldadura, no existe el tiempo suficiente para que se lleven a cabo las interacciones químicas entre el metal fundido-escoria y metal-gas. La solidificación está conformada por la formación de núcleos, también conocida como nucleación y por el crecimiento

de los cristales formados. La aparición de los primeros granos se da en la línea de fusión y la rapidez de cada uno de los cristales ya formados es distinta debido al aumento de tamaño y al incremento de presión de unos contra otros, lo que lleva a que existan granos que se adecuen al crecimiento y formación de los ya existentes.

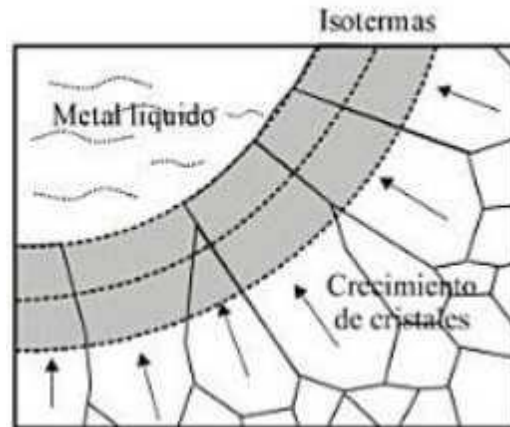
Figura 28. **Inclusión de escoria en cordones de soldadura**



Fuente: HORWITZ, Henry. *Soldadura aplicaciones y práctica*. p. 808.

La orientación de los granos ya formados es la misma que tiene el metal base parcialmente fundido, este fenómeno es conocido como crecimiento epitaxial; esta propiedad hace que el metal de la soldadura y el metal base sean compatibles y puedan tener una unión homogénea.

Figura 29. **Crecimiento epitaxial de los cristales al solidificar**



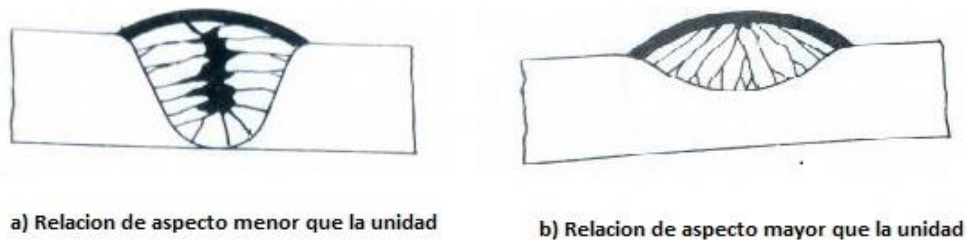
Fuente: *Metalurgia de la soldadura*. <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/05%20Metalurgia%20de%20la%20soldadura.pdf>. Consulta: 4 de abril de 2018.

La dirección de crecimiento de cada uno de los granos formados es distinta y sobrevivirán los que tengan una orientación epitaxial o muy cercana a ella, el crecimiento epitaxial aparecerá en cada pase de una soldadura de múltiples pasadas. El crecimiento del grano también ayuda a expulsar inclusiones no metálicas en el cordón de soldadura; en soldaduras de múltiples pasadas puede existir una solidificación no uniforme de la pileta de material fundido, esto trae consigo un retardo en el crecimiento del grano y por lo tanto existe una mayor probabilidad de que existan incrustaciones de escoria en el cordón de soldadura.

La estructura final y la solidificación de la soldadura dependen del tamaño del cordón de soldadura, específicamente de la relación ancho-profundidad; a esta relación se le llama relación de aspecto de ranura, una relación de aspecto menor a la unidad en soldadura se da cuando la profundidad o penetración es mayor a la anchura y en esta se tiene la característica la formación de

incrustaciones como escoria o gas dentro del cordón. En la relación de aspecto mayor a la unidad, el ancho es mayor a la profundidad y cualquier impureza dentro de la soldadura será eliminada.

Figura 30. **Relación de aspecto de ranura de soldadura**



Fuente: HORWITZ, Henry. *Soldadura aplicaciones y práctica*. p. 808.

Una vez solidificado el material de aporte depositado, alrededor de este, existe un área del material unido que está expuesta a cambios en su estructura cristalina; esta área es llamada zona afectada térmicamente (ZAT) o también llamada zona afectada por el calor (ZAC). La unión soldada, si se efectúa correctamente, puede ser tan fuerte como el material soldado o inclusive puede llegar a tener una mayor resistencia que este, debido a que el área alrededor de la soldadura sufre cambios en cuanto a las propiedades mecánicas del acero; es necesario realizar una pequeña descripción de lo que sucede en la zona afectada térmicamente.

La ZAT es un área en la cual se dan diversas alteraciones en la estructura del material base, estos cambios o alteraciones sufridas dependen de la temperatura y de la velocidad de enfriamiento del metal soldado; existen diversas zonas que se ven afectadas por el incremento de temperatura, algunas sufren mayores cambios que otras debido a la cercanía que tienen con el material fundido. El área cercana a la línea de fusión presentará la temperatura

más elevada que cualquier otro lugar; debido a esto, se formarán granos gruesos en el material, lo que puede dar lugar a que se presente la austenita en la totalidad de esta zona.

En áreas más alejadas de la línea de fusión el sobrecalentamiento disminuye, el valor de temperatura en este lugar no es suficiente para provocar un cambio en el tamaño del grano y será más pequeño que el cercano a la zona próxima a la línea de fusión; en algunas ocasiones, en esta área se puede generar la estructura martensítica debido al enfriamiento rápido de soldaduras que contengan un alto contenido de carbono; la estructura martensítica es muy susceptible al agrietamiento.

Dentro de la ZAT existe un área que es llamada campo de normalización, en este lugar el grano es más fino en comparación con las dos áreas anteriores; debido a que la temperatura no es muy elevada y el tiempo de calentamiento no es muy largo, no existe un crecimiento en los granos austeníticos de esta zona. El campo de normalización va seguido de una zona de recristalización incompleta; en este lugar se pueden encontrar granos de perlita muy finos, seguidamente, a esta área se encuentra la zona de recristalización.

El área afectada por el calor sufre alteraciones micro estructurales en la forma y tamaño del grano presente en la ZAT, que se deben al incremento de temperatura producto de la unión de metales por fusión; estos efectos varían según el contenido de carbono del metal base y de elementos de aleación de un acero; estos últimos para mejorar sus propiedades mecánicas, en aceros aleados con titanio se hace presente el nitruro de titanio que evita que los granos sufran un engrosamiento, que evitan que existan áreas propensas a fracturas o que tengan una menor resistencia mecánica debido a tensiones residuales.

Pruebas realizadas a uniones soldadas demuestran que el área más vulnerable a fallas en servicio debido a esfuerzos mecánicos es la ZAT, debido a que en este lugar están presentes esfuerzos internos, microestructuras susceptibles a fallas, en esta zona la tenacidad es baja, lo que hace la resistencia del material base sea menor a la del metal de aporte; para evitar tensiones residuales en la soldadura se puede emplear el precalentamiento y el postcalentamiento; el primero consiste en elevar la temperatura del metal base en el lugar donde se desea soldar hasta una temperatura mayor al del ambiente que rodeara el proceso; el precalentamiento se emplea en aceros con un contenido mayor al 0,25 % de carbono y su propósito es hacer que el enfriamiento sea más lento y tenga una mayor uniformidad.

El postcalentamiento es un tratamiento térmico que puede ser el recocido, normalizado, templado y revenido; estos tratamientos se emplean para eliminar las tensiones residuales producto de la expansión y contracción del metal soldado, lo que da como resultado esfuerzos de tracción y compresión en la pieza soldada y reduce la tenacidad de la pieza que provocan que pueda fallar al estar en servicio.

2.5. Metalurgia

La metalurgia es la ciencia que se ocupa de la obtención y el procesamiento de los metales, para posteriormente adaptarlos y así satisfacer las necesidades humanas. La metalurgia se puede dividir en:

- Extractiva
- Mecánica
- Física

En este documento solamente se tratará con la metalurgia física, ya que el enfoque de las otras dos ramas tiene muy poca relación con el tema de investigación tratado.

La metalurgia física se encarga del estudio de las características mecánicas y físicas de los metales y aleaciones, según el comportamiento que puedan tener frente a tres variables importantes:

- La composición química del metal o aleación
- El tratamiento mecánico
- El tratamiento térmico

Para el caso de la soldadura, de las tres variables mencionadas antes, solamente los tratamientos térmicos influirán considerablemente en las propiedades mecánicas de la unión soldada, razón por la cual solamente esta variable se estudiará como parte de la metalurgia física.

Durante el proceso de soldadura se alcanza valores muy altos de temperatura para realizar la unión de las piezas, este aporte térmico crea zonas en las cuales el calor aumenta rápidamente y en otras la disipación de este es de manera acelerada. Estos cambios repentinos de temperatura provocarán cambios microestructurales, tensiones residuales y deformaciones que se presentarán cuando la junta este en servicio.

Cada uno de estos efectos indeseables se pueden minimizar o eliminar completamente aplicando el tratamiento térmico adecuado. Antes de conocer los tratamientos térmicos, es necesario describir como ocurren los efectos negativos en la soldadura.

2.5.1. Tensiones residuales

Las tensiones residuales son aquellas que se originan cuando se le aplica una fuerza externa a un metal, y se hacen presentes o permanecen aún después de eliminar la fuerza aplicada.

El origen de las tensiones residuales se puede deber al proceso de fabricación de los metales (laminado, trefilado, entre otros) y a las condiciones de trabajo al estar en servicio. Estas dos condiciones darán como resultado deformaciones no uniformes en el material.

Las deformaciones pueden ser plásticas (trabajo en frío de los metales) y térmicas (soldadura); en las primeras, el material es sometido a deformaciones plásticas no uniformes en diferentes puntos, dando lugar a tensiones residuales; este tipo de tensiones también aparecen debido a las deformaciones térmicas. En la soldadura, las deformaciones térmicas se producen debido al aporte térmico que se da durante la unión de los metales, esto se debe a que se crean zonas que experimentan un incremento de la temperatura ya que se encuentran muy cerca de la unión y otras que presentan un enfriamiento acelerado debido a que la distancia con respecto al charco de fusión es mayor.

Con estos cambios bruscos de temperatura, los puntos con mayor aporte térmico sufren de dilatación y las partes con un enfriamiento continuo presentan contracción. Estos cambios térmicos producen fuerzas internas de tracción y compresión dentro de la pieza soldada y cuando la junta se enfría totalmente se presentan las tensiones residuales.

2.5.2. Cambios microestructurales

Cuando se realiza la unión de metales por medio de la soldadura, se crean dos zonas muy diferenciadas dentro de la pieza soldada; una de ellas es la zona del metal fundido y la otra es la zona afectada térmicamente también llamada ZAT o ZAC.

Cada una de estas zonas ya no tendrá la estructura inicial del metal base y, por lo tanto, se deben considerar estas dos áreas como un efecto directo de la soldadura. Estos cambios en la microestructura del metal se pueden revertir por medio de un precalentamiento y un post calentamiento del metal base.

2.5.3. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos se utilizan para minimizar los efectos negativos de la soldadura como las tensiones residuales, y para proveerle las propiedades mecánicas adecuadas a la unión cuando esta se encuentra en servicio.

Los tratamientos térmicos de la soldadura son:

- El precalentamiento: es un proceso que consiste en realizar el calentamiento en la totalidad de la pieza, o en la zona donde se realizará la unión, en esta técnica la temperatura se eleva hasta un nivel superior a la del entorno. Este procedimiento se utiliza principalmente en aleaciones ferrosas que contienen más 0,25 % de carbono antes de soldarse, y su propósito es producir un enfriamiento más lento y uniforme de la pieza; esto evitará la formación de estructuras cristalinas frágiles y ayudará a disminuir en menor manera las tensiones residuales. La temperatura de precalentamiento varía según el tamaño y la forma de la pieza.

- El postcalentamiento: consiste en evitar que la temperatura de la pieza soldada disminuya por debajo de 300 ° C a 250 ° C, esta temperatura debe de mantenerse durante un tiempo aproximado de dos horas. La finalidad de este tratamiento térmico es difusión del hidrógeno.
- Tratamiento térmico postsoldadura: tiene por objetivo eliminar las tensiones residuales y mejorar la tenacidad de la pieza, se realiza después de llevar a cabo la soldadura, al igual que el postcalentamiento, ayuda a la difusión del hidrógeno.

2.5.3.1. Precalentamiento

El proceso en el que se realiza un calentamiento antes de la soldadura es llamado deshidrogenado, tiene como objetivo remover el hidrógeno que puede estar presente en metal que será soldado. Este elemento cuando penetra en el cordón de soldadura causa porosidades, grietas y pérdida de ductilidad. Cuando se producen grietas en zonas de alta dureza como la zona afectada térmicamente (ZAT) o en la propia junta producto del hidrógeno, se le denomina fisuración inducida por hidrógeno (HIC).

En los aceros ferríticos la fragilización por hidrógeno ocurre a bajas temperaturas, alrededor de la temperatura ambiente, este problema puede evitarse manteniendo la unión soldada a alta temperatura, lo que provocará que el hidrógeno se difunda fuera de metal soldado. Otro problema relacionado con el hidrógeno se da en altas temperaturas, y se denomina ataque por hidrógeno; consiste en una reacción química entre el hidrógeno atómico y el carbono de los carburos, lo que da lugar a la formación de burbujas de metano, que tienen como consecuencias la pérdida de resistencia mecánica, producto de la descarburación del acero y la generación de poros con metano.

Las temperaturas óptimas para el deshidrogenado están entre los 200 ° C a 250 ° C, para temperaturas mayores a 250 ° C, la velocidad de difusión del hidrógeno aumentará incrementando la rapidez de remoción de este elemento en la soldadura. Sin embargo, se debe tener cuidado al incrementar la temperatura, ya que como se dijo anteriormente a temperaturas muy altas se puede tener una reacción entre el hidrógeno atómico y los carburos de hierro, fenómeno que resultaría igual de perjudicial.

2.5.3.2. Postcalentamiento

El proceso de postcalentamiento consiste en evitar el enfriamiento de la unión soldada por debajo de los 250 ° C a 300 ° C; esta temperatura se deberá mantener aproximadamente durante dos horas; el postcalentamiento puede abarcar las técnicas de tratamiento de relevado de esfuerzos, tratamiento térmico de recocido, de normalizado, de templado, de temple martensítico y de revenido. En este documento solamente se tratará con el tratamiento de relevado de esfuerzos.

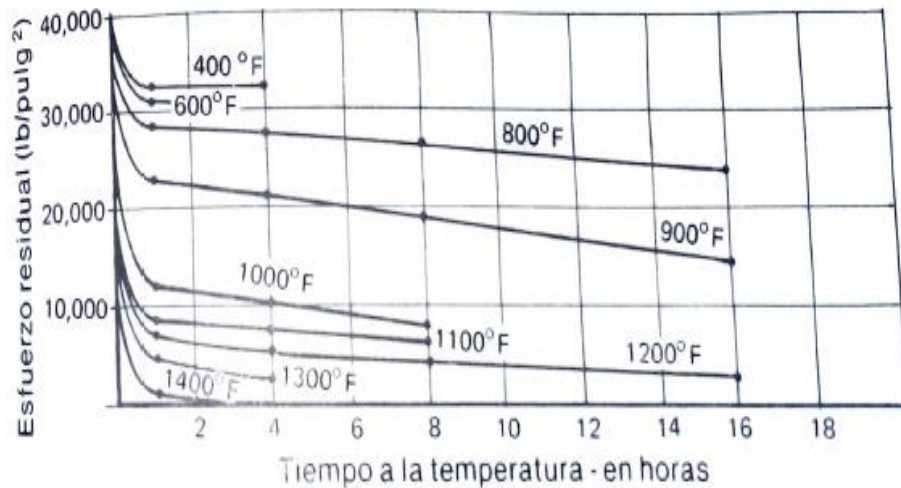
La Sociedad Americana de Soldadura define al tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, también llamado de alivio de esfuerzos, como el calentamiento y enfriamiento uniforme de una pieza en el cual no se llega a la temperatura de recristalización. La temperatura de alivio de tensiones para piezas de acero esta entre los 550 ° C y 650 ° C.

Aunque regularmente en un tratamiento de este tipo, solamente se espera el alivio de tensiones residuales sin modificaciones en la estructura del acero, se pueden producir los siguientes efectos:

2.5.3.2.1. Recuperación

Es el primer efecto que se presenta al elevar la temperatura en el tratamiento de relevado de esfuerzos, el calentamiento de la pieza debe de ser uniforme para evitar la ocurrencia de esfuerzos térmicos. Al elevar la temperatura a aproximadamente 200 ° C, los esfuerzos de contracción tienden a disminuir levemente; con esta temperatura no existirá un cambio apreciable en la estructura cristalina. Como regla general se tiene que a mayor temperatura de recuperación se tendrá un aumento en la disminución de los esfuerzos internos del material. El tiempo es un factor importante para la liberación de esfuerzos, para una temperatura determinada la máxima liberación de esfuerzos en un material sucede durante la primera hora, disminuyendo gradualmente al paso del tiempo.

Figura 31. **Influencia del tiempo y la temperatura en el relevado de esfuerzos en el acero**



Fuente: HORWITZ, Henry. *Soldadura aplicaciones y práctica*. p. 808.

2.5.3.2.2. Relajamiento

Este efecto ocurre aproximadamente a los 538 ° C, a esta temperatura los esfuerzos de contracción se eliminan rápida y completamente del material. Sin embargo, producen algunos cambios en la estructura de los granos.

2.5.3.2.3. Revenido o regulación de temple por recocido

Consiste en elevar la temperatura de una pieza de acero previamente enfriada, a niveles inferiores de la temperatura de recristalización y dejarla enfriar a temperatura ambiente (enfriamiento en aire).

La ZAT es el área de la soldadura que se enfría más rápidamente, por esta razón es una zona con una dureza muy elevada; si esta zona estuvo sometida a una temperatura de recristalización, al momento de comenzar el enfriamiento se formará austenita, cuando la temperatura haya descendido aún más, la estructura cambiará a martensita. Al tener esta fase, se cree que el carbono presente en esta estructura existe en forma de pequeños átomos de carbono o cristales de carburo de hierro; esta sería la razón de la dureza que presenta la martensita.

Cuando se realiza el revenido, la martensita experimenta tres cambios.

- La martensita cambia a ferrita.
- La austenita que no ha cambiado a martensita producto del enfriamiento rápido se transformará en ferrita y carburo.

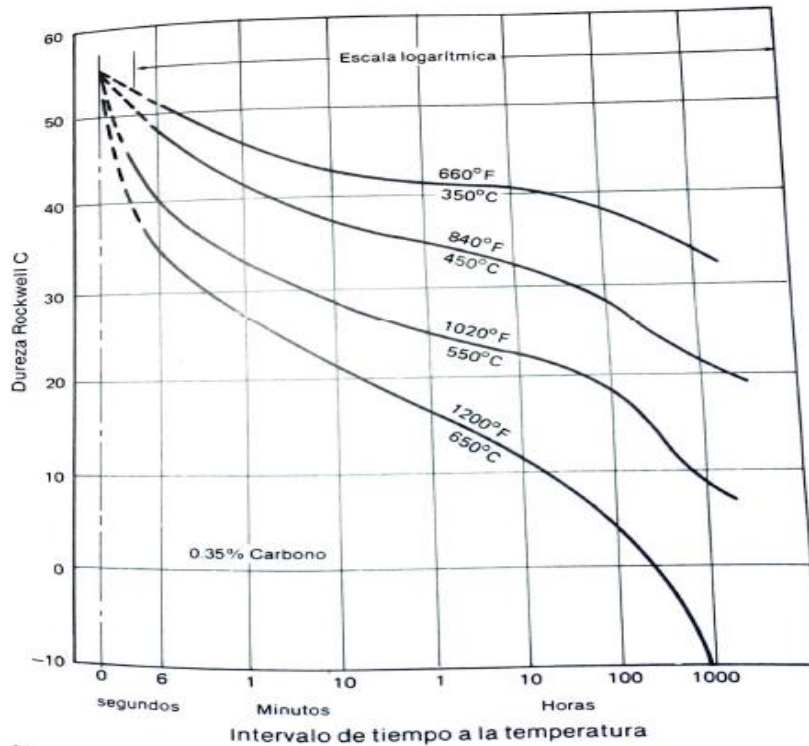
- Los cristales de carburo aumentaran de tamaño al incrementar la temperatura del revenido.

Las temperaturas a la que ocurren los cambios de estructura 1 y 2 en aceros con un contenido del 0,7 % de carbono no son muy conocidas, teniendo solamente una estimación de ellas; el cambio de martensita a ferrita ocurre aproximadamente a 150 ° C, y para el cambio de austenita a ferrita, la temperatura es de 232 ° C.

La dureza de un acero depende de que exista una dispersión fina y homogénea del carburo alrededor de la martensita, y ya que al elevar la temperatura del revenido se tiene un incremento del tamaño de los cristales de carburo, estos no se dispersarán homogéneamente, teniendo como efecto una reducción en la dureza de la ZAT.

La temperatura y el tiempo son dos factores que afectan la dureza del acero. El primero influirá de forma directa, mientras que el segundo factor es de poca importancia. Sin embargo, se debe conocer que, se tiene una máxima reducción de dureza, de esfuerzos de tracción y un aumento en la ductilidad durante los primeros minutos de aplicar el revenido.

Figura 32. **Influencia de la temperatura y el tiempo en la dureza de un acero SAE 1035**



Fuente: HORWITZ, Henry. *Soldadura aplicaciones y práctica*. p. 808.

2.5.3.3. Tratamiento térmico post soldadura

Consiste en realizar el calentamiento de la junta a una determinada temperatura, posteriormente al haberse realizado la unión de las piezas.

2.5.3.3.1. Distensionado

El distensionado tiene como objetivo eliminar las tensiones residuales en una pieza soldada, este proceso se realiza entre 595 ° C y 675 ° C para aceros

ferríticos de baja aleación, y en aceros de alta aleación puede alcanzar los 1000 ° C; sin embargo, en la mayoría de los casos no supera los 760 ° C.

El enfriamiento de este proceso debe ser uniforme, de lo contrario se podrían generar nuevas tensiones que podrían llegar a ser mayores que las originales. Las tensiones residuales son un problema que debe evitarse en un metal, la presencia de este fenómeno podría producir corrosión cerca de la soldadura y a temperaturas altas contribuiría a la formación de grietas inducidas por hidrógeno. Para evitar estos efectos negativos se hace necesario aplicar un tratamiento térmico postsoldadura de distensionado.

3. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

La persona que realizará las tareas de reparación bajo el agua debe contar con el equipo necesario, capaz de brindarle la seguridad de realizar su trabajo sin poner en riesgo su vida o la de las demás personas a su alrededor.

El equipo de protección personal utilizado para soldadura y corte subacuático está formado por protección de cabeza y rostro, máscara de buceo que puede ser de medio rostro o rostro completo, casco de buceo y por un traje de buceo.

3.1. Máscara de buceo medio rostro

Máscara que protege solo los ojos y la nariz; este tipo de protección puede estar diseñada solamente con un lente o cristal, lo cual da una mayor visibilidad; sin embargo, ya que solamente protege la mitad del rostro; el agua penetra la máscara mientras se bucea. El lente o cristal puede estar fabricada de vidrio templado y el faldón de un material como la silicona que ayuda a que se adhiera mejor al rostro. Este tipo de máscara es empleada donde no existe un peligro de contaminación del agua o cuando se realicen inspecciones a poca profundidad.

Figura 33. **Máscara de buceo de medio rostro**



Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*

<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

3.2. **Máscara de buceo de rostro completo**

Presenta una mayor protección que la máscara de medio rostro ya que impide el ingreso de agua; protege al buzo contra una posible contaminación del agua o evita riesgos físicos. Esta máscara cuenta con un sistema de suministro de aire constante y alguna de ellas cuentan con un sistema de comunicación con la superficie.

Figura 34. **Máscara de buceo de rostro completo**



Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*

<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

3.3. Casco de buceo

Este casco evita que el buzo sufra golpes o cortes en la cabeza, ya que es una protección total que impide que la persona que lo utilice tenga contacto con el medio ambiente; está provisto, al igual que la máscara de buceo de rostro completo, de un sistema de suministro de aire constante; también, consta de un sistema de comunicación con la superficie y para el caso de ser utilizado en soldadura subacuática pueden serle instalado un visor para llevar a cabo el proceso de soldadura y corte. Este elemento de protección se fabrica con fibra de vidrio, fibra de carbono, resina de polyester y capa de gel de polyester; también, cuenta con un cuello que puede estar hecho de neopreno o polyester que impide las filtraciones de agua.

Figura 35. Casco de buceo completo



Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*
<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

3.4. Traje de buceo

Su principal característica es que proporciona el aislamiento térmico necesario para llevar a cabo las tareas necesarias de buceo en un medio expuesto a temperaturas bajas; también, proporciona el aislamiento adecuado

frente al agua. El tipo de traje a utilizar dependerá de la profundidad y de la tarea a realizar.

Figura 36. **Clasificación de los trajes de buceo de acuerdo al aislamiento al medio**

Temperatura del agua	Vestimenta
27°C y más	Traje corto (piernas y mangas cortas)
24°C a 27°C	Traje húmedo de 3 mm de espesor
21°C a 24°C	Traje húmedo de 3 a 5 mm de espesor. Guantes y botines son opcionales.
7°C a 21°C	Traje húmedo o semi-seco desde 7 mm de espesor, guantes y botines necesarios de acuerdo a T°.
-1°C a 7°C	Traje seco, guantes y botines

Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*

<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

3.4.1. Traje seco

Estos tipos de trajes son diseñados para aislar al buzo de un medio con agua fría o contaminada; lo mantiene completamente seco durante el tiempo que dure sumergido; este traje no cuenta con aislamiento térmico, lo cual hace necesario que el buzo utilice ropa que le brinde esta protección. Generalmente, el material para fabricarlos es el neopreno de alta densidad; no obstante, se pueden fabricar de goma vulcanizada, de membrana o tr laminado; este último material es muy ligero y de secado rápido. El neopreno es un material con aislamiento térmico, esto hace que la ropa interior del buzo sea delgada, en este tipo de material se pueden encontrar trajes con espesores de 7, 9, 12, 17 o

24 milímetros; sin embargo, a profundidad la aislación térmica disminuye, se comprimen y pierden flotabilidad.

Los trajes fabricados con tr laminado se fabrican con tres capas de distintos materiales, cada material le da resistencia y flexibilidad al traje; estos trajes no dan protección térmica a los buzos, por lo tanto, es necesario utilizar ropa interior gruesa al realizar operaciones de buceo. Los trajes de goma vulcanizada son de una sola pieza, sin costuras, lo que los hace los más herméticos al realizar actividades de buceo, son utilizados para realizar trabajos en aguas tóxicas o contaminadas.

Figura 37. **Traje seco para buzo**



Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*
<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

3.4.2. Traje húmedo

Se fabrica con materiales porosos y flexibles, uno es el neopreno. Una cualidad de este traje es que permite el ingreso de una pequeña cantidad de agua, la cual es retenida en los poros del material, formando una pequeña película entre el traje y el cuerpo del buzo; esta capa de agua alcanza la

temperatura de la persona dentro del traje e impide que el calor se escape hacia los alrededores. Estos trajes pueden ser de una o dos piezas, el espesor varía desde los 3 hasta los 14 milímetros y entre más grueso sea el traje mayor protección térmica tendrá el buzo; sin embargo, se puede perder destreza si el espesor es mayor de lo que se necesita en una determinada tarea.

Figura 38. **Traje húmedo para actividades de buceo**



Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*
<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

3.4.3. Traje semiseco

Es una combinación del traje húmedo y seco, el agua puede filtrarse en brazos y piernas, en esta situación se comporta como traje húmedo; la característica de traje seco se da en el torso de la persona. Esta vestimenta presenta un mayor aislamiento que el traje húmedo; sin embargo, no cuenta con un buen aislamiento térmico lo que le impide ser utilizado en aguas con bajas temperaturas.

Figura 39. Traje semiseco



Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*
<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

3.5. Guantes

Los guantes fabricados de neopreno son empleados para trabajos en los que no existe grandes riesgos de golpes o cortes y donde la temperatura de trabajo no es menor a 15 ° C; tal y como es el caso con los trajes de buceo al ser de gran espesor se puede perder sensibilidad y la habilidad de operación de objetos al realizar alguna tarea determinada. Existen guantes que además de dar protección térmica, también, proporcionan aislamiento frente a descargas eléctricas como es en el caso de tareas de soldadura; estos guantes pueden ser fabricados de caucho, látex o goma vulcanizada.

Figura 40. **Guantes de neopreno para buzos**



Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*
<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

3.6. **Botines o calcetas de buceo**

Pueden ser fabricados de neopreno y al igual que los guantes protegen contra las bajas temperaturas, cortes y golpes; se fabrican en espesores desde los 2 milímetros; pueden o no tener suela, si se necesita apoyarlos en el fondo marino.

Figura 41. **Botines de neopreno para buzos**



Fuente: *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.*
<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>.

Consulta: 12 de abril de 2018.

4. SOLDADURA HÚMEDA

4.1. Generalidades

La soldadura húmeda subacuática es un proceso de unión de metales muy similar a la soldadura manual de arco con electrodo revestido; la diferencia entre ambos procesos radica en que la soldadura húmeda se realiza en contacto directo con el agua. La profundidad a la que se realizara la soldadura húmeda es un factor muy importante para determinar la resistencia de las piezas unidas.

Figura 42. Soldadura húmeda subacuática



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Para llevar a cabo la soldadura húmeda, se necesita de electrodos especiales con un revestimiento resistente al agua, durante la fusión de los materiales; al fundirse el electrodo, propicia la formación de gases que reaccionan químicamente con el material base y el medio acuático que produce una disgregación de este último elemento presente en la junta. La reacción entre estos elementos crea un ambiente gaseoso que mantiene el arco eléctrico estable y protege la soldadura de la contaminación del medio ambiente que la rodea, tal y como sucedía con el revestimiento de los electrodos para soldadura eléctrica.

Según la especificación de la AWS D3.6M 2017, las soldaduras bajo el agua (soldadura húmeda y soldadura seca) se clasifican de acuerdo a las propiedades mecánicas que presenta la unión y el tipo de servicio que prestara. Según esta clasificación se tienen soldaduras clase A, B y O.

4.1.1. Soldadura clase A

Tipo de soldadura bajo agua para aplicaciones estructurales en el cual la unión soldada soportara grandes esfuerzos de tensión, similares a los soportados por la soldadura eléctrica en la superficie; en esta clase se tienen las soldaduras secas hasta profundidades de 150 m para soldadura húmeda hasta los 15 metros de profundidad para aceros inoxidable y aceros austeníticos.

4.1.2. Soldadura clase B

En esta clase de soldadura los esfuerzos y la ductilidad en la unión serán menores a los presentes en la soldadura clase A y la junta presentará pequeños defectos que pueden ser tolerados, como porosidades o discontinuidades; la

soldadura clase B generalmente es aplicada en soldadura húmeda para aceros estructurales hasta 50 m de profundidad y para aceros inoxidable austeníticos hasta profundidades de 25 m.

4.1.3. Soldadura clase O

Clase de soldadura que cumple con las exigencias propias de cada trabajo, en este proceso el cliente debe especificar que norma utilizar para llevar a cabo este proceso.

La soldadura subacuática húmeda presenta ciertas ventajas como la flexibilidad y el bajo costo en comparación con la soldadura subacuática seca; en la soldadura húmeda se pueden emplear los procesos SMAW, FCAW; en este documento solamente se tratará con la soldadura manual con electrodo revestido (SMAW); aunque la clasificación de la norma AWS D3.6M para soldaduras bajo agua tiene que la profundidad a la que se puede realizar uniones con soldadura húmeda clase B es hasta los 50 metros; se han hecho pruebas con este proceso a 100 metros de profundidad, con resultados poco favorables debido a la inestabilidad del arco eléctrico producto de la profundidad. A profundidades mayores los problemas se deben a las dificultades físicas que presentan los buzos.

Si la profundidad es mayor a los 100 metros es necesario contar con la seguridad adecuada; esta es aún mayor a la empleada a poca profundidad. En la soldadura subacuática se emplean máquinas de corriente directa que cuenten con un bajo voltaje a circuito abierto; la utilización de fuentes de corriente directa se debe principalmente a la seguridad del buzo y a la facilidad de mantener el arco eléctrico; al emplear fuentes de corriente directa es necesario definir la polaridad de la máquina: se utiliza polaridad directa para

evitar que ocurra electrolisis y que se pueda causar un deterioro en algún elemento metálico en el porta electrodo o poner en riesgo la vida del soldador. La fuente de poder debe estar ubicada en la superficie y debe de contar con un interruptor de seguridad, para que en caso de falla se pueda desconectar el suministro de energía de la fuente de poder.

El problema que presenta la soldadura subacuática húmeda se debe a que, al estar en contacto directo con el agua, el enfriamiento es instantáneo; este cambio brusco de temperatura provocará la formación de estructuras cristalinas como la martensita y bainita; este tipo de fases cuentan con una elevada dureza, siendo muy quebradizas cuando se encuentren en servicio y son muy susceptibles al agrietamiento en frio por hidrógeno.

El calor producido durante la soldadura húmeda suele estar entre 1,0 kJ y 2,0 kJ/mm, este calor tiene un tiempo de disipación de entre 2 y 4 segundos; el enfriamiento en la junta se debe principalmente al mecanismo de pérdida de calor por conducción, esto por el movimiento del agua alrededor de la pieza soldada; al inicio de la fusión del electrodo se crean burbujas ascendentes en las cercanías de la junta, lo que agita el agua y hace que la transferencia de calor aumente; posteriormente, cuando existe estabilidad en el arco se forma una película de burbujas que impide la transferencia de calor; la conducción y la radiación son los principales mecanismos de pérdida de calor en la soldadura húmeda.

Existen métodos para reducir la absorción de calor por parte del medio acuático, esto hará que el enfriamiento de la junta no sea de manera instantánea, mejorando las propiedades mecánicas de la unión. El espesor de la pieza a soldar es un parámetro que está involucrado en el tiempo de disipación del calor de la unión para chapas gruesas el tiempo de enfriamiento

aumenta; la entrada de calor y el tipo de unión a realizar son otros parámetros que definirán la velocidad de enfriamiento. El uso de aislantes térmicos también es un método utilizado para aumentar el tiempo de disipación de calor.

Los materiales que son adecuados para llevar a cabo la soldadura húmeda son los aceros estructurales con un porcentaje menor al 0,1 % C y los aceros con un CE (carbón equivalente) menor a 0,4 % C. Los aceros con un CE mayor a 0,4 % C presentan una alta sensibilidad al agrietamiento en frío inducido por hidrógeno. Sin embargo, estos materiales pueden ser unidos por soldadura húmeda siempre y cuando se empleen las técnicas correctas y electrodo adecuado. El CE es un indicador para aceros al carbono y de baja aleación de como los elementos aleados con el acero propiciarán la formación de estructuras cristalinas susceptibles al agrietamiento por hidrógeno en la ZAT; es decir, en función del CE es posible esperar un tipo de fase cristalina que se presentará en la ZAT en función de la velocidad de enfriamiento y, por ende, determinará las propiedades mecánicas de la junta.

Para conocer el carbón equivalente se emplea dos ecuaciones, una se utiliza cuando se conocen todos los elementos presentes en la aleación (Ecu. 1) y la otra cuando solamente se conoce el contenido de carbón y manganeso (Ecu. 2).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + 0,05 \quad \text{Ecuación 2}$$

Como se mencionó anteriormente la profundidad tiene un efecto muy grande sobre la soldadura húmeda, a mayor profundidad mayor presión;

cuando se tiene una presión alta en la soldadura existe mayor probabilidad de ocurrencia de corto circuitos, pérdida en la eficiencia de la fusión del electrodo, disminución del diámetro del arco eléctrico y existe un aumento del hidrógeno presente en la soldadura; debido a la profundidad también se pierden elementos de aleación como el manganeso y el silicio; ambos elementos son desoxidantes y se pierden cada vez más a mayor profundidad. Existe un aumento de carbono metálico en la soldadura al aumentar la profundidad, esto debido a la reacción del monóxido de carbono con electrodos que tengan revestimiento de carbonato de calcio; las soldaduras realizadas a grandes profundidades tienen densidades más bajas debido a las porosidades internas presentes en el cordón. Los poros cambian de formas esféricas a formas más alargadas a profundidades de entre 20 y 30 m; el poro esférico es una concentración de hidrógeno, mientras que la forma más alargada en los poros se puede deber a la acumulación de gases en el cordón o al empleo de electrodos básicos húmedos.

El arco eléctrico también es otra magnitud de la que depende la calidad de la soldadura, para un arco inestable se tienen defectos de porosidad, aunque esta inestabilidad se puede controlar incrementando el voltaje; con este incremento es posible que existan fluctuaciones de tensión que provoca igualmente la existencia de porosidades y que la escoria quede atrapada en el charco de soldadura. El empleo de electrodos de diámetro pequeño le puede dar estabilidad al arco eléctrico.

Las juntas soldadas bajo el agua tienden a tener una menor calidad y propiedades mecánicas que las uniones realizadas sobre el agua. Los problemas más comunes presentes en este proceso son los siguientes.

- Porosidad en la soldadura

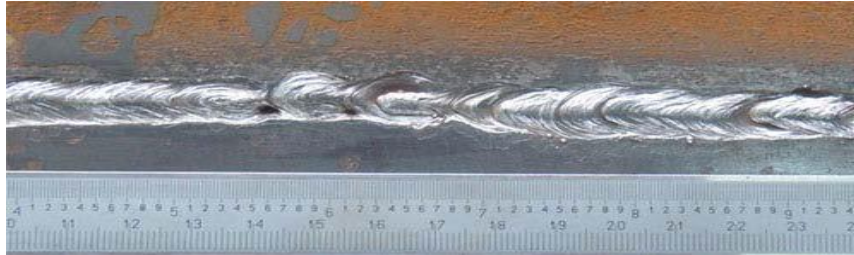
- Grietas calientes y frías
- Incrustación de escoria
- Cambios químicos del cordón de soldadura

Cada uno de estos fenómenos pueden deberse a factores como el contacto directo de la junta con el agua, el hidrógeno, el aumento de presión y en ocasiones la poca visibilidad del buzo soldador.

La principal causa de la formación de poros en la soldadura se debe a la acumulación de gases presentes en la unión, en especial el hidrógeno. Otros factores que propician estos defectos son la profundidad, la polaridad, la salinidad del agua y la energía del arco eléctrico. En el caso de la soldadura húmeda y en especial del proceso SMAW la cantidad de hidrógeno de fusión presente en la junta dependerá de factores como la salinidad del mar, la polaridad de la corriente y de la intensidad de la corriente; es un proceso que tienen un mejor rendimiento en agua salada y cuanto mayor salinidad tenga el lugar donde se lleve a cabo la reparación, se produce una mayor estabilidad en el arco eléctrico.

El nivel de sal en el agua ayuda a aumentar las cualidades electrolíticas de este proceso, lo cual se ve reflejado en un arco eléctrico con mayor temperatura al trabajar y uniones más eficientes. Ya que la cantidad de hidrógeno de fusión afecta directamente a la unión soldada en cuanto a la porosidad que esta puede presentar, se hace necesario reducir de alguna manera este elemento dentro del medio ambiente que rodea la soldadura. La porosidad puede reducirse al emplear electrodos con un revestimiento con un aproximado del 12 % de carbonato de calcio (CaCO_3).

Figura 43. **Soldadura húmeda SMAW en acero con socavación visible y poros de gas**



Fuente: *Problems of underwater welding of higher-strength low alloy steels.*

http://www.secpomorze.com/userfiles/image/news/25_Fydrych_Rogalski_Labanowski-Problems_of_Underwater_Welding_of_Higher-Strength_Low_Alloy_Steels.pdf. Consulta: 22 de enero de 2018

Las grietas frías presentes en las uniones se deben principalmente a la presencia de hidrógeno, para el caso de la soldadura húmeda no es posible aplicar precalentamiento a la pieza a unir, esto con la finalidad de reducir los niveles de hidrógeno presentes; al no poder utilizar el precalentamiento, se hace uso de electrodos con núcleo de níquel y molibdeno para prevenir el agrietamiento en frío; también, al momento de llevar a cabo la junta es posible realizar varias pasadas de soldadura, esto para reducir los niveles de hidrógeno de fusión, al llevar a cabo varias pasadas de soldadura es necesario dejar aproximadamente un minuto entre pases.

El calor emitido por cada pase de soldadura causa la difusión acelerada del hidrógeno, reduce las tensiones residuales y aumenta la plasticidad de la pieza en la ZAT; disminuye, por lo tanto, la dureza y mejorando las propiedades mecánicas de la junta.

Figura 44. **Microestructura de la junta, soldadura húmeda SMAW hecha con acero S420G2 + M: fisura extensa visible en el límite entre la soldadura y la ZAT**

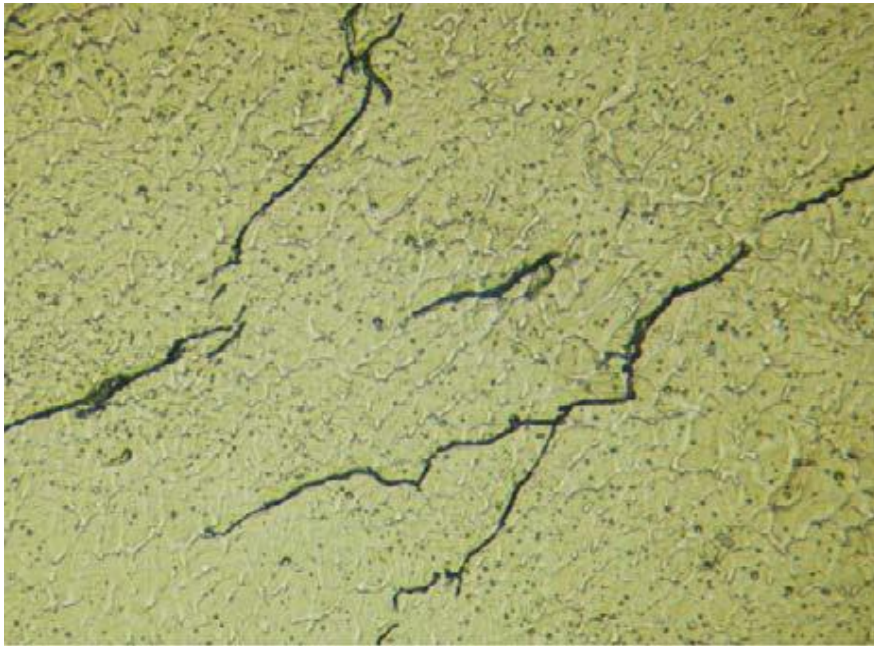


Fuente: *Problems of underwater welding of higher-strength low alloy steels.*

http://www.secpomorze.com/userfiles/image/news/25_Fydrych_Rogalski_Labanowski-Problems_of_Underwater_Welding_of_Higher-Strength_Low_Alloy_Steels.pdf. Consulta: 22 de enero de 2018

También, es posible emplear electrodos que cuenten con una estructura austenítica para minimizar el agrietamiento por hidrógeno; sin embargo, este último método puede producir grietas en caliente.

Figura 45. **Microestructura de la junta, soldadura húmeda SMAW hecha en acero S420G2 + M usando un electrodo austenítico húmedo: numerosas grietas ramificadas visibles**



Fuente: *Problems of underwater welding of higher-strength low alloy steels.*

http://www.secpomorze.com/userfiles/image/news/25_Fydrych_Rogalski_Labanowski-Problems_of_Underwater_Welding_of_Higher-Strength_Low_Alloy_Steels.pdf. Consulta: 22 de enero de 2018

Al comparar las uniones soldadas bajo el agua y la soldadura hecha en la superficie, se tiene, que para llevar a cabo la soldadura húmeda se necesita mayor corriente para tener el mismo voltaje en ambos procesos; el tamaño del cordón es bastante parecido para ambas técnicas; sin embargo, en la soldadura húmeda el cordón es más angosto y presenta mayores esfuerzos que la segunda técnica, esto significa que el efecto crítico del agua comienza cuando el charco de soldadura empieza a formarse y solidificarse.

4.1.4. Solidificación y transformación microestructural

La forma y el tamaño de las estructuras de solidificación afectan directamente las propiedades mecánicas de la junta soldada; la obtención de granos finos da como resultado buenas propiedades mecánicas y, por lo tanto, calidad en la unión. Para obtener granos finos es necesario controlar algunos parámetros en el proceso de soldadura como voltaje, corriente, velocidad de soldadura y tiempo de enfriamiento.

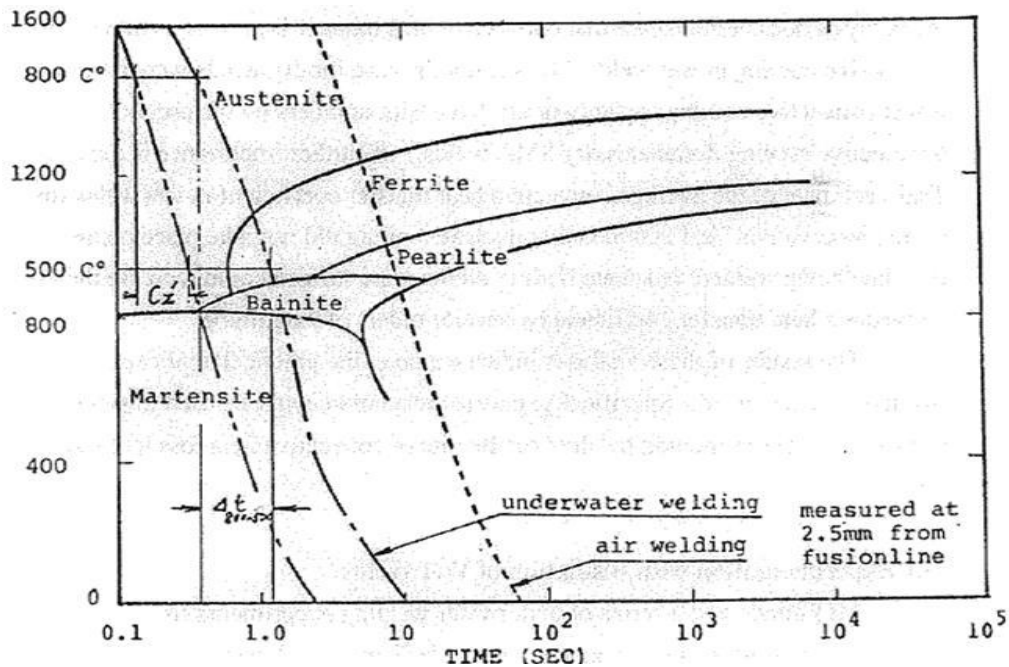
La fusión del electrodo en la soldadura húmeda es constante y la forma del charco tiene una geometría de lágrima; la forma de lágrima del charco se debe a las pérdidas de calor que se dan atrás del avance del electrodo; la geometría de la gota afecta la forma del crecimiento del grano durante la solidificación, esto da como resultado la formación de granos columnares gruesos en la línea central. Este tipo de grano es susceptible de segregación y agrietamiento en frío; la alta velocidad de enfriamiento en la soldadura húmeda da como resultado una gran cantidad de hidrógeno que estará presente durante la solidificación y se difundirá en el metal base, en especial en la ZAT.

En los aceros estructurales que tengan una microestructura como la martensita y bainita existe una mayor probabilidad al agrietamiento por hidrógeno. La formación de estas estructuras cristalinas en la ZAT depende de la composición química del metal base y del electrodo, de la entrada de calor, velocidad de enfriamiento, la temperatura del agua y la presión del agua.

En la soldadura húmeda se desea la formación de la ferrita acicular, este tipo de fase cristalina proporciona una alta resistencia a la fractura de escisión y mejora la tenacidad de la junta; esta microestructura puede obtenerse al agregar elementos de aleación como el boro y titanio, siempre y cuando se

tenga el contenido de oxígeno y manganeso adecuado en los metales involucrados.

Figura 46. **Diagrama de enfriamiento continuo (CCT) que muestra una región de bainita con curvas de enfriamiento superpuesta; muestra la temperatura a la que comenzará cada microestructura**



Fuente: Problems of underwater welding of higher-strength low alloy steels.

http://www.secpomorze.com/userfiles/image/news/25_Fydrych_Rogalski_Labanowski-Problems_of_Underwater_Welding_of_Higher-Strength_Low_Alloy_Steels.pdf. Consulta: 22 de enero de 2018

4.2. Equipo

Para llevar a cabo las técnicas de soldadura y corte bajo agua, existen elementos comunes a ambos procesos: fuente de energía, interruptores de

corriente, conductores, pinzas de masa. El uso de pinzas o torchas debe ser solamente para realizar operaciones bajo el agua; estos elementos deben ser capaces de soportar la máxima corriente requerida por el electrodo. Existen algunas torchas que se pueden utilizar para realizar trabajos de corte y soldadura, esto es posible cambiando boquillas y mandriles a conveniencia de la operación que se necesite realizar.

4.2.1. Generadores de corriente eléctrica

Los generadores o fuentes de energía utilizados en el proceso de corte y soldadura subacuática son dispositivos capaces de generar entre 300 y 600 amperios de corriente continua, esto dependiendo de la cantidad de energía que se necesita en una operación determinada; sin embargo, si es necesaria mayor potencia durante alguna reparación se pueden utilizar dos o más máquinas que estarán conectadas en paralelo para entregar la potencia requerida durante la operación a realizar; el tipo de corriente alterna no es muy aconsejable de usar, debido a que esta produce una variación en el arco voltaico al momento de llevar a cabo la soldadura; caso contrario de la corriente directa que produce un arco voltaico más estable durante la operación.

Existen diversas máquinas capaces de producir la corriente que se necesita en la soldadura subacuática: rectificadores y motosoldadores de diversas empresas: Miller, Lincoln Electric, entre otros. Estos dispositivos pueden ser utilizados en cualquier operación de soldadura, solo se hace necesario conocer el manual el cual será entregado por cada fabricante. Cada uno de los generadores debe ser conectado a masa por medio del bastidor.

Figura 47. **Marcas de rectificadores y generadores de corriente continua**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Existen hoy en día sistemas que sirven para controlar el proceso de soldadura; entre estos sistemas se encuentra uno llamado piranha: el panel compuesto por un interruptor de 400 amperios, un voltímetro y un amperímetro que hace más fácil llevar a cabo la técnica de soldar bajo el agua.

Figura 48. **Sistema de control de soldadura Piranha**



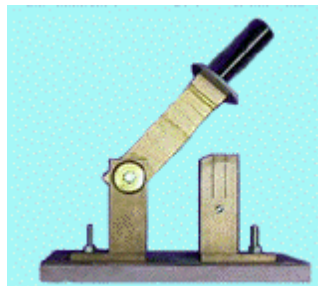
Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

4.2.2. Interruptores de seguridad

También son llamados interruptores de cuchillas; solamente permiten el paso de la corriente cuando se está llevando a cabo la operación de corte o soldadura por el buzo soldador, o en el momento de que el electrodo está en posición y listo para llevarse a cabo la soldadura; esto permite que el cambio de un electrodo nuevo por un usado sea más fácil y sin correr ningún peligro, es posible utilizar interruptores de seguridad automáticos; sin embargo, sin importar el tipo de interruptor utilizado, este elemento estará a cargo del tender, el cual es el encargado de controlar, manejar y operar este dispositivo mientras el buzo se encuentra sumergido en el agua.

Figura 49. Interruptores de cuchillas



Fuente: *Corte y soldadura subacuática*.

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Al operar el interruptor es necesario seguir varias reglas de seguridad:

- No se deberá manipular el interruptor a menos que esto sea especificado por el buzo soldador; cuando ocurra esta acción se deberá confirmar por medio de un sistema de comunicación.

- El circuito deberá estar abierto todo el tiempo, dado como resultado que no exista corriente, a menos que el buzo este haciendo una operación de reparación.
- No se deberá de operar el interruptor en atmosferas inflamables.
- El interruptor siempre estará al alcance del tender para que este lo pueda manipular todo el tiempo.

4.2.3. Cables eléctricos

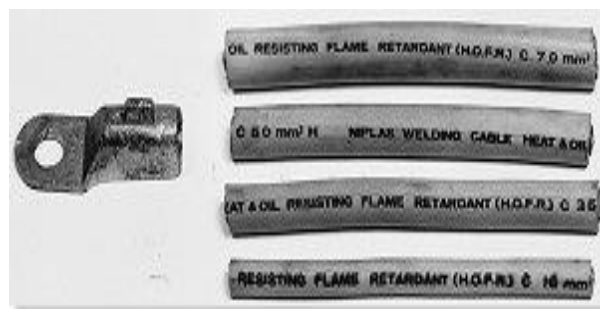
Los cables utilizados en cualquier tipo de operación bajo el agua deberán estar completamente aislados y deberán soportar la máxima corriente requerida; estos cables pueden ser de cobre o aluminio, cada uno de estos depende de los requerimientos de la operación al trabajar. Al momento de escoger un determinado cable se deberá tener en cuenta la extensión del circuito ya que al momento de escoger un cable de mayor área transversal se pueden producir pérdidas considerables al momento de llevar a cabo el proceso de soldadura; se recomienda un cable de diámetro 2/0, cuando la distancia entre el lugar de trabajo y la fuente de energía es considerable, aproximadamente mayor 100 metros, este tipo de cable produce pequeñas pérdidas de energía debido a que su resistencia es menor que otro tipo de cable.

Un cable 3/0 es empleado ocasionalmente cuando las reparaciones son a profundidades extremas. Cuando la distancia entre el generador y la zona de trabajo es mayor a 133 metros se pueden utilizar dos o más cables calibre 1/0 o 2/0 en paralelo para reducir la resistencia propia de los conductores.

Los cables también deben ser fácilmente manejables para el soldador y este factor también influye en el diámetro a escoger de un determinado conductor. Los cables deben estar complementados con conectores tipo macho y hembra. Al conectar un cable adicional con sus respectivos complementos se debe tener en cuenta que esto produce una caída adicional de voltaje y afecta el nivel de tensión entregada durante la soldadura; este inconveniente se puede arreglar aumentando el voltaje o la corriente a la salida del generador para que así el proceso de soldar no se vea afectado.

Cada uno de estos cables deberá ser inspeccionado antes de cada operación bajo el agua, ya que si se presentan deterioros en ellos se podrían presentar escapes de corrientes, que tendría como repercusión que la vida de los cables se disminuyera debido a la electrolisis; para evitar estos deterioros se hace necesario que todos los cables sean envueltos en cintas finas de goma, este recubrimiento sirve como impermeabilizante y aislante en las conexiones subacuáticas.

Figura 50. **Tipos de cables y conectores utilizados en soldadura submarina**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Los diámetros de cables recomendados para realizar operaciones de soldaduras son:

Figura 51. **Calibres de cables recomendados según su longitud**

<u>Amperes</u>	<u>Largo en pies para el circuito entero</u>						
	<u>100'</u>	<u>150'</u>	<u>200'</u>	<u>250'</u>	<u>300'</u>	<u>350'</u>	<u>400'</u>
<u>100</u>	4	4	2	2	1	1/0	1/0
<u>150</u>	4	2	1	1/0	2/0	3/0	3/0
<u>200</u>	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0	4/0

Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

4.2.4. **Pinza portaelectrodos**

Los portaelectrodos deben ser capaces de soportar la corriente que necesita el electrodo para fundirse y estar provistos de un aislamiento que evite los choques eléctricos a los soldadores; antes de cada operación se hace necesario realizar una inspección para revisar estos equipos y corroborar que no exista partes desgastadas o con daños que puedan poner en peligro la vida del buzo, al existir piezas dañadas es necesario cambiarles inmediatamente para evitar accidentes.

Figura 52. Modelos de pinzas portaelectrodos



Pinza Broco Inc. BR-20



Pinza MOS

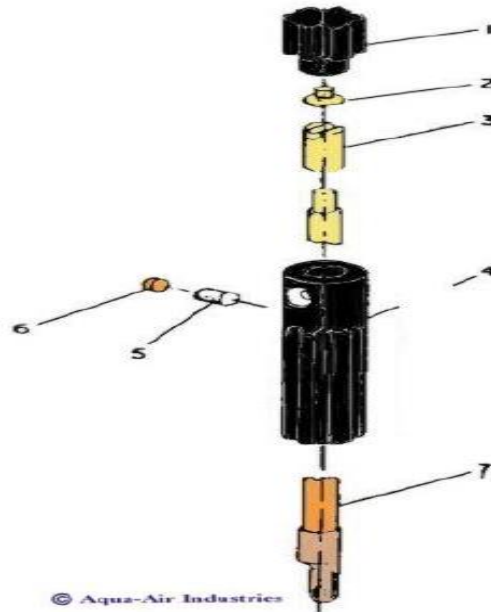


Pinza Aqua Thermic

Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Figura 53. **Nomenclatura de una pinza portaelectrodos para soldadura submarina**



- | | |
|-----------------------|--------------------------------|
| 1. cabeza | 5. rosca de sujeción electrodo |
| 2. sombrero | 6. enchufe |
| 3. cuerpo alimentador | 7. empalme cable |
| 4. cuerpo de sujeción | |

Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Al terminar una operación de corte o soldadura bajo el agua, es necesario realizar el mantenimiento de las torchas o portaelectrodos; esto debe realizarse por medio del lavado de todos sus elementos con agua dulce y posteriormente deberán ser secados para proveerles un buen rendimiento.

4.3. Tipos de electrodos

Los tres tipos de electrodos empleados en el proceso de soldadura húmeda pueden ser ferríticos, austeníticos y a base de níquel; cada una de estas clases de electrodo se utilizará dependiendo del material involucrado en la junta. Los electrodos vienen en cajas selladas lo que impide que estén expuestos a la humedad y que esto provoque una deficiencia al momento de llevar a cabo la soldadura; se fabrican en diferentes diámetros como de 1/8", 5/32" y 3/16"; también son acompañados de un manual el cual provee la información necesaria para darles un correcto uso.

Figura 54. Tipos de electrodos para soldadura húmeda



Electrodos Broco Inc. Soft-Touch



Electrodos Oxilance Sure-Weld



Electrodos Barracuda2



Electrodos Hydroweld

Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

El empleo de los electrodos ferríticos se lleva a cabo al realizar juntas de materiales que cuentan con carbono equivalente menor a 0,4 % y profundidades de 100 metros bajo el agua; los electrodos austeníticos y a base de níquel al no ser sensibles al agrietamiento por hidrógeno se emplean para llevar a cabo uniones de aceros con altos contenidos de carbono equivalente.

4.3.1. Revestimiento fundente

El revestimiento es el elemento que cubre al núcleo de acero del electrodo y está compuesto de diversos elementos minerales, elementos orgánicos, metales, entre otros.

Entre las funciones que tiene el revestimiento están:

- Permite que el encendido del electrodo se lleve con mayor facilidad y provee mayor estabilidad al arco eléctrico.
- Provee una atmosfera segura para el material derretido, ya que evita que se contamine con los elementos contenidos en el medio ambiente.
- Ayuda a la formación de una película de gases que impiden el enfriamiento brusco de la junta.

4.3.2. Revestimiento impermeable

Es el encargado de que el electrodo tenga la resistencia adecuada al estar en contacto con el agua; las varillas de electrodo sin esta protección, en el momento de la fusión del metal de aporte el agua será absorbida por el revestimiento fundente dañando la integridad del material de aporte.

El hidrógeno presente en el agua reacciona con el material de aporte produciendo soldaduras quebradizas; pueden observarse estos efectos un tiempo después de llevarse a cabo la junta; el agua también produce que la unión soldada se enfríe rápidamente lo cual provocaba que la soldadura se tornara muy rígida y frágil; todo esto cambió gracias al revestimiento impermeable.

Cuando se lleva a cabo la soldadura húmeda existe una interacción entre el agua y el revestimiento impermeable, en este proceso el agua es absorbida por el propio fundente; sin embargo, existe la posibilidad de que una pequeña cantidad de agua logre pasar hacia la unión soldada convirtiéndose en vapor, que afecta las propiedades de la soldadura; este hecho hace imprescindible que el grosor del revestimiento impermeable sea el adecuado al llevar a cabo una operación de este tipo.

Los electrodos utilizados actualmente son provistos de un revestimiento que mejora la fusión del electrodo con el metal base y minimiza los efectos del agua en el área soldada, también facilita la remoción de la escoria producida y sirve como un aislante térmico.

4.3.3. Almacenamiento de los electrodos

El almacenamiento de los electrodos debe ser con el total cuidado de no dañar el revestimiento del electrodo, ya que, si sucediera esto, el agua penetraría en el fundente alterando sus propiedades y produciendo cambios en su comportamiento durante la junta.

Deben mantenerse en su respectiva caja hasta el momento de su uso, también debe de evitarse que estén sumergidos durante un largo tiempo.

4.3.4. Manipulación y transporte de electrodos

Los electrodos al momento de utilizarse deberán ser extraídos en ese instante de su caja contenedora y llevarse al agua en la cantidad necesaria por el uso buzo soldador. Todo electrodo que haya sido introducido al agua y no sea utilizado será descartado para un posterior uso.

Todo electrodo que haya sido sumergido por un tiempo mayor a 60 minutos será desechado, ya que de no hacerlo se correrá el riesgo de defectos y un bajo desempeño en las propiedades de la soldadura.

4.4. Procedimiento para soldar

Toda unión llevada a cabo debe realizarse de acuerdo a especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS, en inglés); las WPS deben presentarse al cliente antes de llevar a cabo la junta, estando estas especificaciones ya aprobadas por una determinada norma, para este caso por la especificación D3.6M de la AWS. Las WPS debe ser calificadas bajo las mismas condiciones reales o simuladas del lugar donde se llevará a cabo la soldadura real.

La calificación no solo se da hacia la junta; también, se le realizan pruebas hacia la persona que realizara la unión, esto para calificarla de acuerdo a la norma D3.6M. El soldador que tenga las aptitudes para llevar la soldadura clase A, también estará calificado para llevar a cabo uniones clase B.

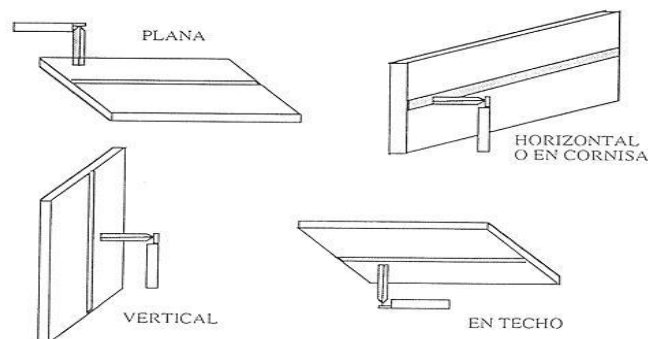
Para el metal base, el carbón equivalente no deberá ser mayor al contenido que se encuentre presente el metal de aporte. Las distintas posiciones para realizar una soldadura son una variable esencial dentro de las

especificaciones del proceso, las pruebas de soldadura deberán realizarse en las siguientes posiciones.

4.4.1. Soldadura en chapas a tope con bisel

- Posición PA (1G): las chapas se colocan en un plano horizontal, soldadura plana.
- Posición PC (2G): las chapas se colocan verticalmente, soldadura horizontal o en cornisa.
- Posición PF (3G arriba) o PG (3G abajo): chapa vertical, soldadura vertical ascendente o vertical descendente.
- Posición PE (4G): chapa horizontal, soldadura sobre cabeza, también llamada en techo.

Figura 55. Posiciones de soldadura a tope

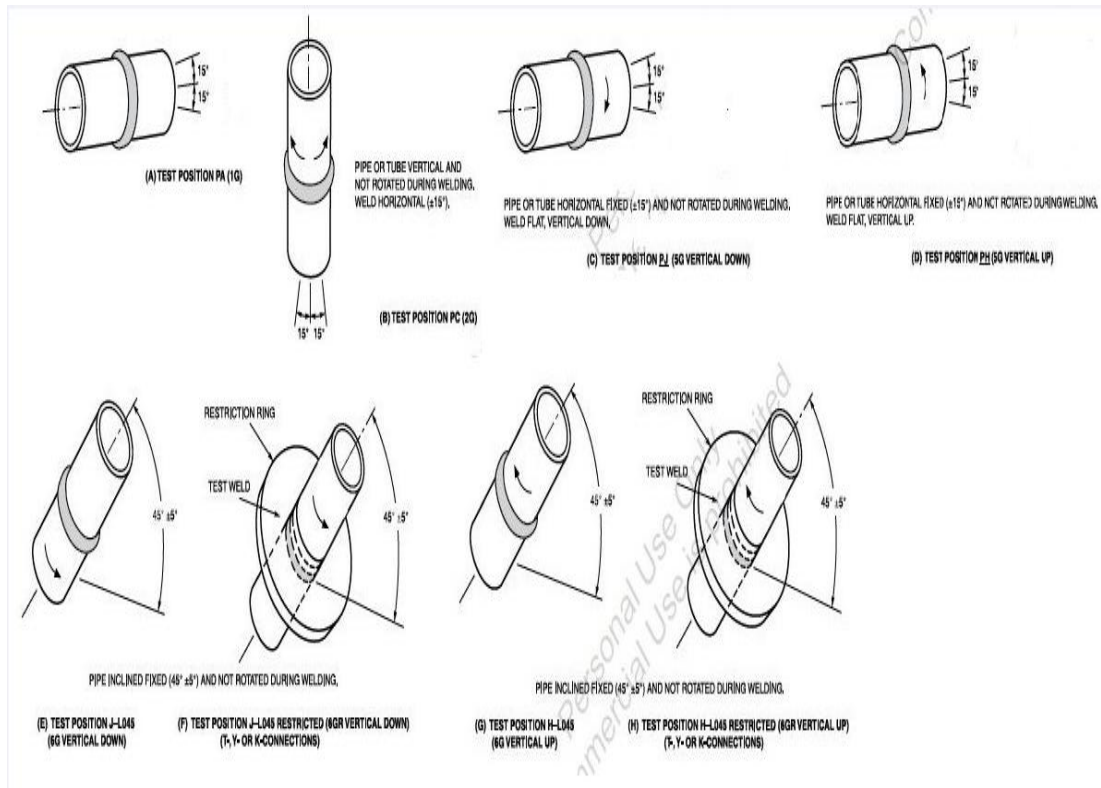


Fuente: *Ingemecánica*. <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn40.html>. Consulta: 4 de febrero de 2018.

4.4.2. Soldadura para tubería con bisel

- Posición PA (1G): tubería horizontal con rotación de esta, el material de aporte se deposita en la parte superior del tubo.
- Posición PC (2G): tubería vertical sin rotación durante el soldeo, también denominada de cornisa.
- Posición PJ (5G abajo) o PH (5G arriba): tubería horizontal fija y la ranura en posición vertical, soldadura ascendente o descendente, la tubería no se debe girar durante la soldadura.
- Posición H-, J-L045 (6G abajo) o H-L045 (6G arriba). tubería inclinada fija: tubería fija inclinada 45° con la horizontal, soldadura ascendente o descendente, la tubería no se deberá girar durante la soldadura.
- Posición H-, J-L045 restringido (6GR): prueba de penetración que sirve para calificar al soldador para realizar juntas tipo Y, K y T en tubería. La tubería debe estar inclinada 45° con la horizontal y no se debe girar durante la soldadura.

Figura 56. Posiciones de soldadura en tubería



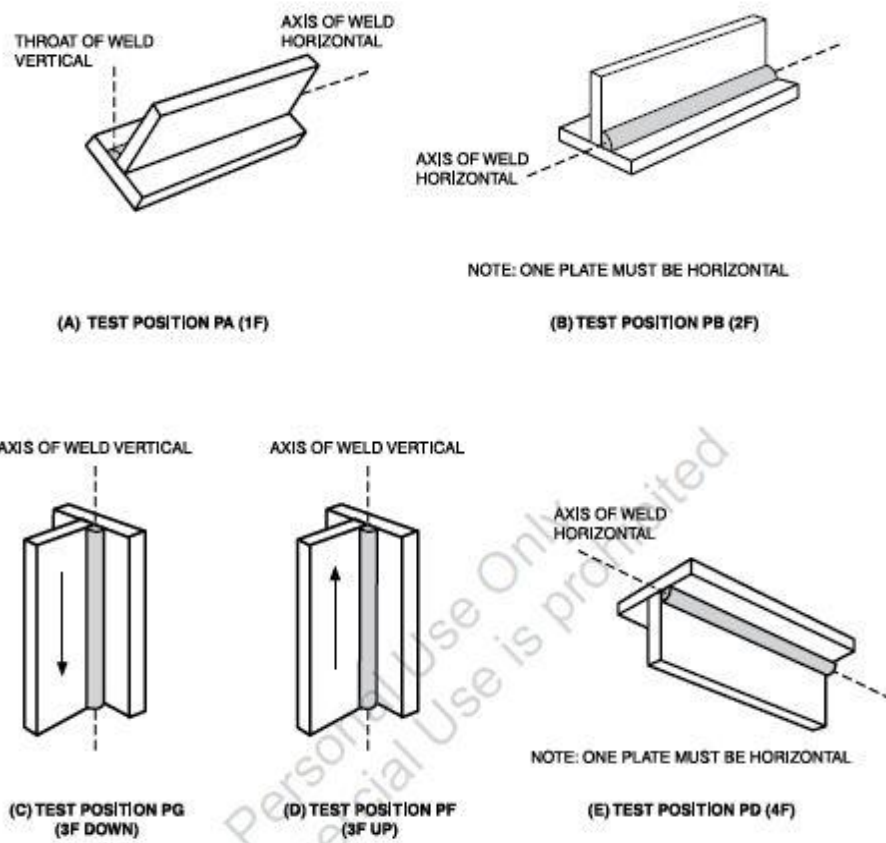
Fuente: American Welding Society (AWS). *Underwater Welding Code 6th Edition*. p. 148.

4.4.3. Soldadura en filete

- Posición PA (1F) plana: las placas se colocan de tal manera que el eje de la junta se encuentre de forma horizontal y la garganta este aproximadamente vertical.
- Posición PB (2F) horizontal: las placas se colocan de tal forma que la soldadura se deposite en el lado superior de una placa horizontal y contra una placa vertical.

- Posición PG (3G abajo) o PF (3F arriba) vertical: las placas se colocan de tal manera que el eje de la junta se encuentre aproximadamente vertical.
- Posición PD (4F) sobrecabeza: las placas se colocan de tal manera que la soldadura se deposita en la parte inferior de una placa horizontal y contra una placa vertical.

Figura 57. Posiciones para soldadura de filete

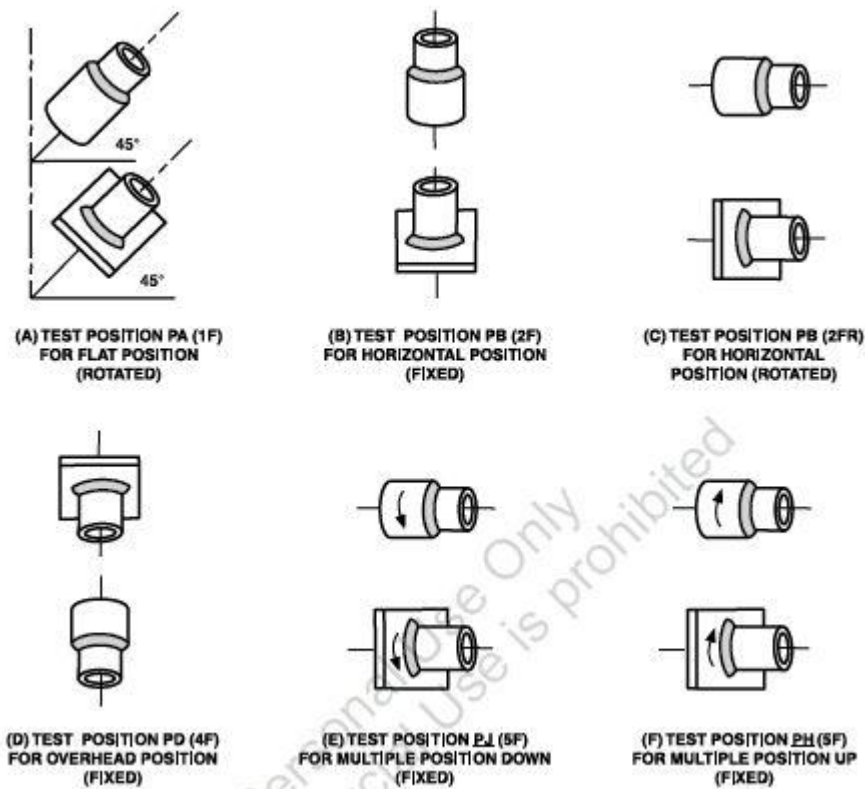


Fuente: American Welding Society (AWS). *Underwater Welding Code 6th Edition*. p. 148.

4.4.4. Soldadura de filete en tubo

- Posición PA (1F) plana: la unión se colocará con el eje de la tubería inclinado a 45° con respecto a la horizontal y se encontrará girando durante la soldadura, el metal fundido se depositará desde el punto más alto de la junta.
- Posición PB (2F) horizontal: la pieza debe colocarse con el eje de la tubería vertical para que la soldadura sea depositada sobre el lado superior de una superficie horizontal y contra una superficie vertical, la tubería no se debe girar durante la soldadura.
- Posición PB (2FR) horizontal girando: el eje de la tubería debe colocarse de forma horizontal y debe estar girando durante la soldadura, la soldadura se depositará en el punto más alto de la rotación de la tubería.
- Posición PD (4F) sobrecabeza: la junta se debe colocar con el eje de la tubería de forma vertical, el eje de la soldadura debe ser horizontal y la tubería no se debe girar durante la soldadura.
- Posición PJ (5F hacia abajo) o PH (5F hacia arriba) posiciones múltiples: el eje de la tubería debe colocarse de forma de forma horizontal y el eje de la soldadura en un plano vertical, la soldadura no se debe girar durante la soldadura.

Figura 58. Posiciones para la soldadura en filete de tubo



Fuente: American Welding Society (AWS). *Underwater Welding Code 6th Edition*. p. 148.

Ya conocidas las distintas posiciones en las que se puede llevar a cabo el proceso de soldadura húmeda y teniendo ya definida la polaridad correcta para el proceso, se debe empezar a realizar un raspado de la punta del electrodo para remover la capa impermeable y así garantizar que exista contacto entre el electrodo y la pieza a soldar para que se produzca el arco eléctrico.

Al haber retirado el impermeabilizante de la punta del electrodo y tenerlo sobre la pieza a soldar, se le pide al tender conectar la corriente; en ese

instante se formará el arco eléctrico y si esto no ocurriera el soldador deberá presionar levemente la punta del electrodo sobre la pieza a unir.

Cuando el electrodo se quede pegado al material base se le pedirá al tender que corte la corriente; una vez cortado el suministro de energía se retira el electrodo de la pieza de trabajo; se coloca nuevamente el electrodo dentro del portaelectrodo y se pide que se conecte la corriente; se debe hacer un movimiento de raspado del electrodo sobre la pieza, esto para fundir el alambre descubierto y para proporcionar nuevamente el encendido correcto del electrodo.

Para el cambio de los electrodos, al consumirse todo un electrodo se pide que se corte el suministro de corriente para colocar uno nuevo; posteriormente, cuando ya se encuentre colocado en el portaelectrodo se reestablece la corriente eléctrica.

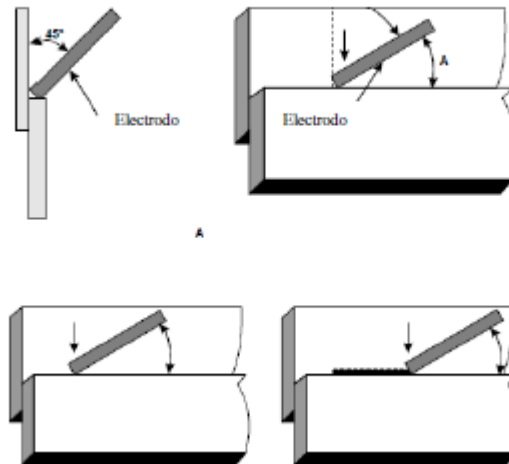
Las técnicas más utilizadas en soldadura subacuática de filete son de autoconsumo o de arrastre y de manipulación o de tejido.

4.4.4.1. Técnica de autoconsumo o de arrastre

La técnica de autoconsumo consiste en depositar una serie de cordones sobre la unión; estos cordones tendrán la forma de la junta tipo filete y los catetos de estos cordones deberán de tener la misma longitud que el diámetro del electrodo.

La soldadura en filete es una gran ayuda para los trabajos submarinos ya que provee una guía para que el soldador tenga una referencia al momento de depositar el metal derretido sobre la unión.

Figura 59. **Técnica de autoconsumo para soldadura unión tipo filete**



Fuente: *Estudio del estado del arte sobre el proceso de soldadura manual por arco aplicado en ambientes marinos.*

<https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/66/1/Monograf%C3%ADa%20FIDENCIOJGM%2009-2010-0071.pdf>. Consulta: 6 de febrero de 2018.

4.4.4.2. Procedimiento para la soldadura de arrastre

- Limpieza de la junta: se debe de eliminar cualquier elemento de la superficie de las piezas a soldar, dejando la pieza lo más limpia posible para llevar a cabo la soldadura.
- Alineación de la junta: en esta parte es de suma importancia que no exista un hueco en la raíz de la soldadura de filete, sino es posible eliminar este defecto por completo, debe ser minimizado.

- Preparación de la junta: los bordes de las placas a unir deben ser limpiados de cualquier suciedad presente y deben de ser cuadrados planos.
- Asegurarse que el interruptor de seguridad se encuentre desconectado o abierto.
- Ajustar la corriente de trabajo para el diámetro del electrodo a utilizar.

Figura 60. **Rangos de corriente para soldadura bajo el agua dependiendo del diámetro del electrodo**

Diámetro	Tipo Electrodo	Posiciones de soldadura / Amperaje			
		Bajo Mano	Horizontal	Vertical	Sobre Cabeza
1/8"	Acero	160-170	150-170	140-165	140-160
5/32"	Acero	180-210	170-210	170-210	170-190
3/16"	Acero	250-280	240-280	240-280	235-275
1/8"	Acero Inoxidable	135-150	130-150	125-145	125-145
5/32"	Acero Inoxidable	150-200	140-200	140-190	140-180

Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

- El electrodo debe tener un ángulo aproximado de 30° con la línea de soldadura; sin embargo, este valor puede variar en un rango entre 15° y 40° dependiendo de las preferencias del buzo soldador.
- Al estar el buzo preparado para iniciar el proceso de reparación o construcción se le notifica al tender que cierre el interruptor de alimentación de corriente; en el caso de que el arco no se produjera, el

soldador deberá de raspar o golpear ligeramente la punta del electrodo contra la pieza a soldar hasta que se forme el arco eléctrico. Al momento de empezarse el proceso de soldadura, el soldador deberá ejercer la suficiente presión sobre el electrodo para que este se consuma y se produzca la unión de las piezas. El ángulo del electrodo con respecto de la línea de soldadura se debe mantener durante todo el proceso; no debe existir ningún movimiento del electrodo; es decir el buzo soldador solamente debe realizar un movimiento de arrastre del electrodo, de aquí el nombre dado a este tipo de proceso; la ventaja de este proceso se da en lugares con poca visibilidad ya que solamente se tiene que llevar en línea recta el electrodo sin producirle ningún movimiento como sucedería en la soldadura sobre la superficie.

- Al momento de consumirse por completo el electrodo, se le notifica al tender que abra el interruptor de alimentación para que el soldador pueda cambiar el electrodo; el soldador deberá estar en posición para iniciar el proceso nuevamente y esperando que el tender cierre el interruptor y fluya nuevamente la corriente.
- Antes de empezar nuevamente a soldar, se deberá limpiar el extremo del último cordón depositado, el nuevo cordón de soldadura deber empezarse sobre el extremo limpio del último tramo de soldadura. Si la reparación o construcción requiere múltiples pases de soldadura, se deberá limpiar completamente los cordones depositados para aplicar una posterior soldadura.
- En general, el soldador siempre debe tratar de encontrar la posición correcta para soldar, esto ayudará a que las burbujas generadas durante el proceso de soldadura interfieran lo menos posible con su visibilidad.

La técnica de autoconsumo es empleada por soldadores con poca pericia; produce uniones que no son tan resistentes al compararlas con las soldaduras utilizando la técnica de manipulación. Sin embargo, produce resultados aceptables.

4.4.4.3. Técnica de manipulación o de tejido

Este método es menos empleado que la técnica de arrastre, para este proceso el buzo soldador debe contar con una gran pericia para realizar las soldaduras.

El arco eléctrico debe mantenerse de forma constante como sucede en la superficie, la menor presión posible debe existir sobre el electrodo durante la soldadura y la separación entre la punta del electrodo y el material base debe ser igual a la mitad del diámetro del electrodo empleado.

Esta técnica puede ser empleada cuando se necesita aplicar cordones de soldadura cortos; en este proceso se deben realizar pruebas sobre una placa de metal bajo el agua para conocer el tipo de electrodo y el amperaje adecuado para realizar las reparaciones; así mismo, la velocidad de avance y el ángulo correcto del electrodo deben definirse durante las pruebas; para esta técnica, el amperaje para determinado diámetro de electrodo será el mismo que para el método de arrastre.

Para la reparación de pequeñas fisuras se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Localizar ambos extremos de la grieta o fisura.

- Perforar pequeños agujeros en los extremos de la grieta para evitar que siga creciendo.
- Preparar una chapa que tenga el suficiente tamaño para cubrir totalmente la grieta y fijarla al resto de la estructura.
- Soldar alrededor de la placa hasta que no exista filtración de agua en la estructura reparada.

La posición vertical descendente y sobre cabeza son utilizadas para llevar a cabo la técnica de manipulación. Para la posición vertical se utiliza la misma técnica de auto consumo en uniones de filete, en el caso de la posición sobre cabeza se puede utilizar el método de arrastre; sin embargo, el rango de amperios que se puede utilizar es muy reducido para obtener soldaduras aceptables y de calidad. Los soldadores experimentados pueden utilizar ángulos de 35° a 55° del electrodo con respecto a la placa a soldar; esta orientación del electrodo producirá soldaduras sin socavación, cosa que no ocurre con la técnica de arrastre. Si el buzo no tiene la habilidad necesaria para llevar a cabo esta técnica, se recomienda que utilice el método de autoconsumo.

Para ambas técnicas de soldadura subacuática en uniones tipo filete, el ángulo formado entre el electrodo y la placa a soldar es muy importante. Cuando el electrodo se encuentra de forma casi perpendicular a la placa (ángulos mayores) existe una mayor penetración que cuando el ángulo es menor. Para ángulos pequeños la forma de las burbujas creadas se ve afectada y se crea una barrera que protege al charco de soldadura del medio que lo rodea.

5. SOLDADURA SECA

5.1. Generalidades

Como soldadura seca se conoce a la unión de piezas dentro de un ambiente que se encuentra libre de agua y humedad. Entre las técnicas utilizadas para llevar a cabo este tipo de junta se encuentra el proceso SMAW, la soldadura de arco con núcleo FCAW, la soldadura GMAW y el proceso TIG; cada uno de estos procesos es utilizado dependiendo de la profundidad y del tipo de material a soldar; sin embargo, la soldadura SMAW es la más utilizada.

La soldadura seca puede llevarse a cabo en varios entornos, dependiendo de la profundidad del agua se podrá utilizar un determinado tipo de estructura subacuática; dependiendo de la estructura, la soldadura seca pueda realizarse de varias formas.

- Soldadura en atmosfera seca
- Soldadura en hábitat seco
- Soldadura en cámara seca
- Soldadura de punto seco
- Soldadura automatizada

5.1.1. Soldadura en atmósfera seca

La soldadura submarina seca con dique se caracteriza por el hecho de que el soldador y la pieza a soldar se encuentran en una atmosfera seca, sin la presencia de agua. Para evitar que el agua penetre en el lugar de trabajo se

utiliza una estructura con forma de caja construida de aluminio, de manera que las actividades que realice el soldador serán a presión atmosférica; elimina el problema de buceo y la influencia del aumento de presión en los parámetros de soldadura.

El dique es fijado a la estructura donde se llevan a cabo las reparaciones; antes de realizar esta operación se adhiere un sello de espuma polimérica al borde de contacto entre el dique y la estructura para evitar el avance del agua. Después de haber fijado el dique, el agua es bombeada por un sistema de válvulas; al existir un ambiente seco en la estructura a trabajar el buzo soldador baja a través de una tubería hacia el dique; el problema más común al trabajar en un ambiente tan pequeño es la presencia de vapores y gases que pueden ser explosivos; para evitar estos problemas es necesario utilizar un sistema adecuado de ventilación y extracción de humos.

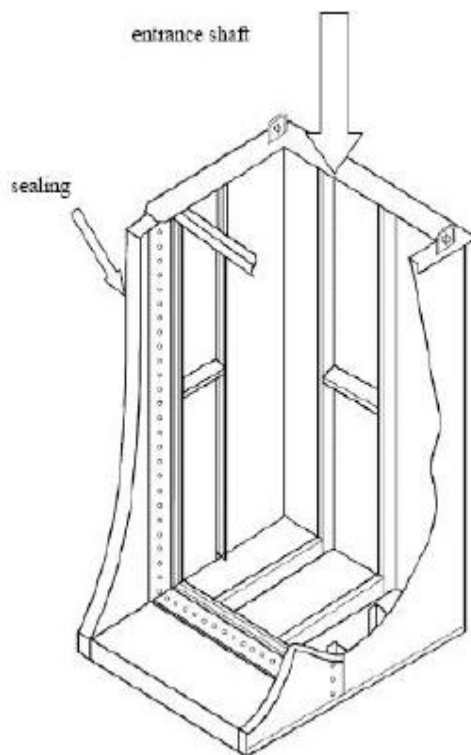
La principal ventaja de la soldadura seca al compararla con la soldadura húmeda se da en cuanto a la mejora de las propiedades mecánicas de las uniones, flexibilidad de los movimientos del buzo soldador, mejor presentación de los cordones de soldadura, aumento de la productividad y se pueden elegir diversas técnicas para llevar a cabo los procesos de corte y soldadura. Las desventajas que se presentan al utilizar un dique seco se dan en cuanto a su construcción, instalación y el sellado; esto repercute en un incremento de los gastos para el inversor que aumentan el valor del proceso de soldadura seca en comparación con la técnica de soldadura húmeda.

El proceso SMAW es muy utilizado en la soldadura subacuática seca con dique, pudiéndose emplear también los procesos GMAW y FCAW, la razón de que la soldadura SMAW sea la más utilizada se debe a que en este procedimiento no existe un problema con el alimentador de alambre y no existe

contaminación del lugar de trabajo producto de los gases de protección como ocurre con la soldadura FCAW y GMAW.

Para llevar a cabo las operaciones de corte, el plasma de aire es el método de corte más recomendable, ya que se evita el suministro de gases inflamables o peligrosos hacia el dique.

Figura 61. **Vista de un dique utilizado para la reparación del casco de un barco, con el acceso de entrada desde la parte superior**



Fuente: *Underwater welding and cutting.*

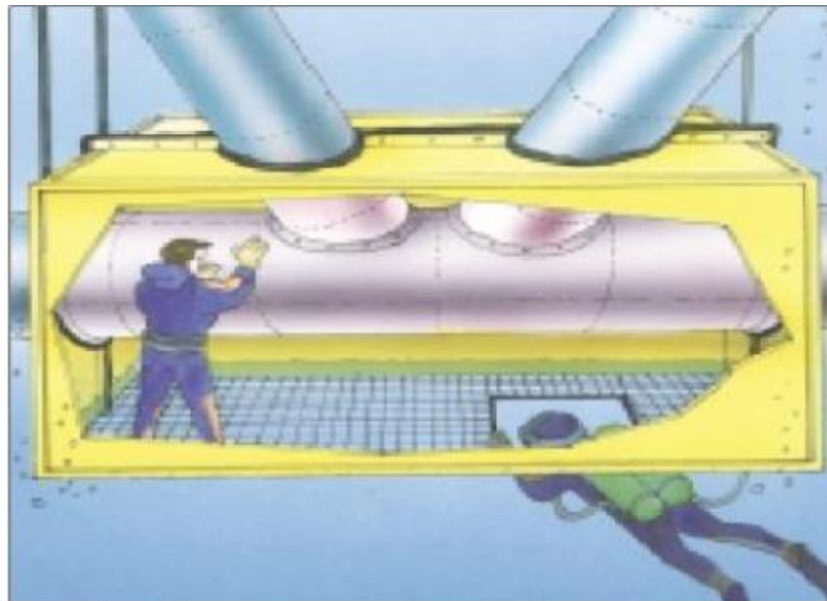
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465217921-0

underwaterweldingandcuttinggaraikouh_rev2.pdf. Consulta: 8 de marzo de 2018.

5.1.2. Soldadura en hábitat seco

La soldadura se realiza en un ambiente a presión constante en una cámara grande, en este lugar el agua es desplazada por una mezcla de gas helio y oxígeno; el soldador puede respirar sin ningún problema esta mezcla teniendo unas condiciones similares como en la superficie. En este tipo de hábitat, el soldador no tiene necesidad de utilizar un equipo de buceo ya que se encuentran en un lugar completamente seco. Sin embargo, se necesita de mucho más tiempo de preparación para tener las condiciones del hábitat listas para soldar.

Figura 62. **Hábitat seco utilizado para la reparación de la plataforma marina K-nodeon**



Fuente: *Underwater welding and cutting.*

https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465217921-0

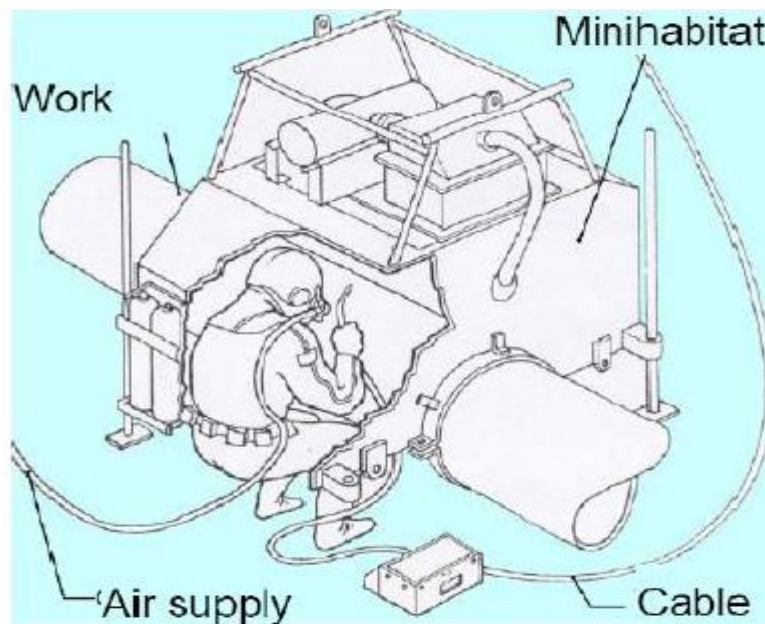
underwaterweldingandcuttinggaraikouh_rev2.pdf. Consulta: 8 de marzo de 2018.

5.1.3. Soldadura en cámara seca

Soldadura que se realiza en una cámara seca de fondo abierto a presión ambiente, en la cual al menos el torso del buzo soldador está dentro del hábitat; sin embargo, esta persona debe contar con un traje de buceo completo.

El soldador está parcialmente sumergido en agua, pero la soldadura se realiza en una atmosfera seca. La cámara es más pequeña y menos compleja que en el caso de la soldadura en hábitat seco y también es menos costosa debido al menor tamaño del hábitat.

Figura 63. **Soldadura en minihábitat donde el buzo soldador está parcialmente sumergido en el agua**



Fuente: *Underwater welding and cutting.*

https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465217921-0

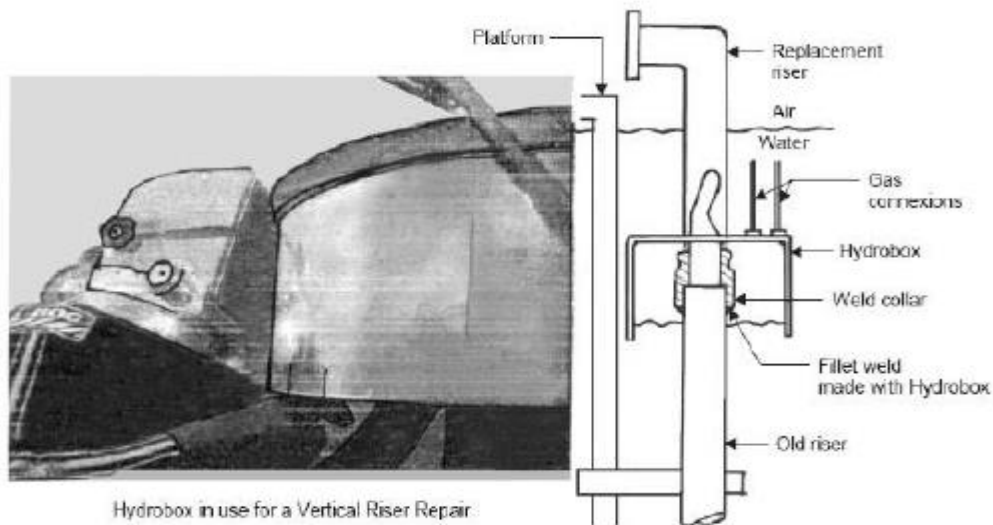
underwaterweldingandcuttinggaraiouh_rev2.pdf. Consulta: 8 de marzo de 2018.

5.1.4. Soldadura de punto seco

Soldadura que se realiza a presión ambiente, en un recinto pequeño, transparente y lleno de gas, donde el buzo soldador se encuentra en el agua, fuera de la cámara. El proceso de soldadura se realiza en una atmosfera seca en la cual el soldador se encuentra fuera del área de soldadura y físicamente dividido por una barrera transparente.

La cámara es mucho más pequeña que para el caso de soldadura en hábitat seco y para cámara seca, pero existen problemas de visibilidad debido a los humos producidos durante la soldadura.

Figura 64. **Sistema de soldadura de punto seco utilizado en reparaciones subacuáticas**



Fuente: *Underwater welding and cutting.*

https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465217921-0

underwaterweldingandcuttinggaraikouh_rev2.pdf. Consulta: 8 de marzo de 2018.

5.1.5. Soldadura automatizada

en este tipo de soldadura se utilizan dispositivos que son controlados de manera remota, se acoplan a la pieza a ser soldar, desalojan el agua de la junta y aplican la soldadura si la participación de un buzo soldador. Este procedimiento se utiliza para profundidades mayores a los 400 metros donde una persona puede perder coordinación de movimientos y puede tener una reducción considerable en su desempeño debido a fatiga acelerada.

Las técnicas más utilizadas en el proceso de soldadura en hábitat seco son la soldadura TIG y el proceso SMAW.

El espesor de los aceros utilizados para reparaciones en mar abierto normalmente esta entre 12 mm a 35 mm en soldadura a tope, esta unión debe de llevar bisel de acuerdo al espesor de las placas a soldar. Cuando las placas a soldar son de gran espesor es necesario realizar varias pasadas de soldadura a la pieza, se recomienda que las primeras dos pasadas sean con el proceso TIG y los posteriores cordones sean con la soldadura SMAW.

5.1.6. Proceso de soldadura TIG

Tal y como fue dicho anteriormente, esta técnica es utilizada para realizar las primeras pasadas de cordones de soldadura; estos primeros pases son conocidos como cordones raíz o soldadura raíz; este es el tipo de soldadura usado por robots totalmente mecanizados en el cual ninguna persona interviene durante este procedimiento.

En este proceso el arco eléctrico es mantenido entre un electrodo no consumible en general fabricado de tungsteno y la pieza a soldar; este

electrodo es el encargado de derretir una varilla de alambre el cual es el material que se funde y produce la unión de las piezas a trabajar; la fusión de estos metales es protegida por un chorro de gases inertes que no interacciona en el proceso de soldadura, estos gases son normalmente de una mezcla de argón-helio o solamente argón.

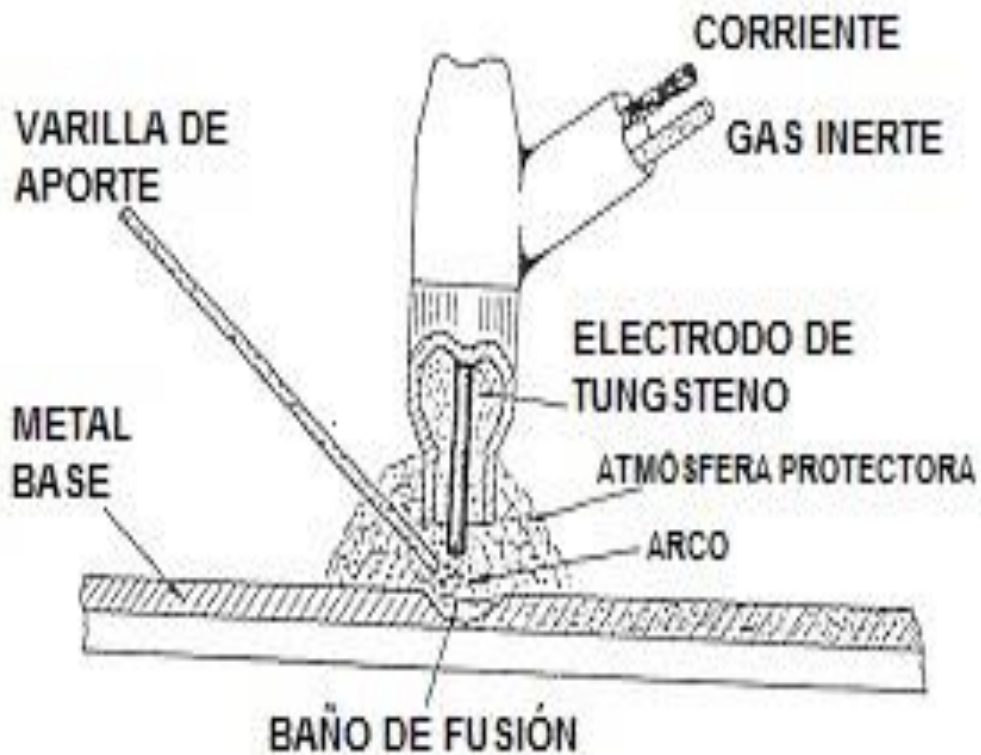
Con este proceso se puede soldar una gran variedad de metales no ferrosos como el aluminio, magnesio y materiales que son sensibles a oxidarse como el circonio y titanio. Con esta técnica se pueden obtener soldaduras de alta calidad que en su mayoría no presentan defectos y presentan un buen acabado superficial; su utilidad se aplica en la industria petrolera, química, generación de energía, en la industria aeroespacial y nuclear.

Se han realizado algunas operaciones experimentales con el proceso manual TIG a profundidades de 450 m, pero si el proceso es completamente mecanizado se pueden obtener profundidades de trabajo aún mayores que las que se obtienen mediante operación manual.

En la soldadura TIG para mantener un arco eléctrico estable se debe incrementar el nivel de tensión en función del aumento de presión; a mayores profundidades de trabajo la presión se incrementa y afecta la profundidad de la penetración de la soldadura, que hace que está sea más profunda y angosta; también, afecta la forma del arco eléctrico de la soldadura, convirtiéndolo de una forma de campana a parecerse a una columna estrecha; estos cambios provocan que el proceso de soldadura sea difícil de llevar a cabo a grandes profundidades.

Los gases utilizados en el proceso TIG no sufren de cambios significativos al incrementarse la profundidad de trabajo.

Figura 65. **Proceso tungsteno inerte gas (TIG)**



Fuente: *Ingemecánica*. <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn52.html>. Consulta: 9 de abril de 2018.

5.1.7. **Proceso de soldadura SMAW**

Este proceso es utilizado en profundidades moderadas en el cual se utiliza un electrodo de bajo hidrógeno como material de aporte que se funde para fusionar los bordes de las placas a unir. Durante la soldadura el revestimiento se funde con el núcleo del electrodo para formar una atmosfera formada por distintos gases que protegen el metal fundido de los gases que se encuentran

en el medio ambiente que rodea el proceso. El revestimiento le provee una estabilidad al arco eléctrico y hace más fácil el proceso de soldadura.

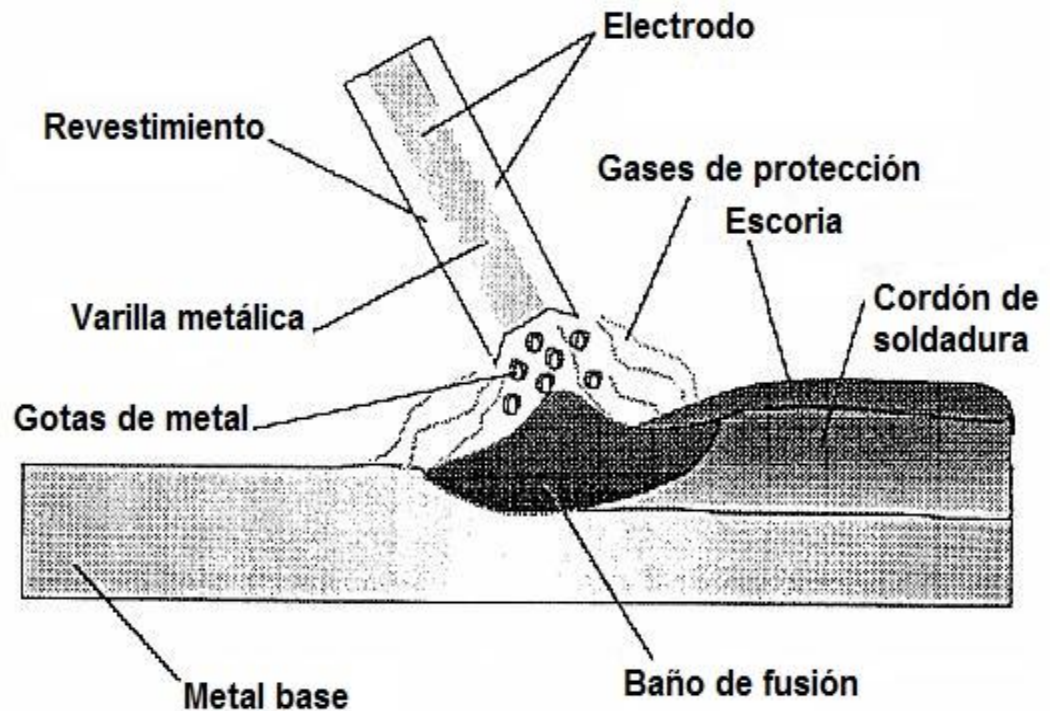
El proceso SMAW para soldadura seca se puede realizar a profundidades de 200 m sin ningún inconveniente; a profundidades mayores el proceso se hace más difícil de llevar a cabo; en algunas ocasiones se ha podido realizar algunas soldaduras de forma exitosa a profundidades mayores a los 200 m.

Las condiciones de la soldadura se van poniendo cada vez menos favorables debido al incremento de profundidad, esto debe ser tomado en cuenta ya que el voltaje que produce el arco eléctrico debe aumentarse a profundidades mayores lo cual también trae consigo menos estabilidad a la hora de soldar. Los electrodos son consumidos más rápidamente debido al aumento de presión, esto se puede observar a profundidades mayores de 35 metros.

La profundidad también afecta el contenido de carbono y de oxígeno presente en la soldadura, a grandes profundidades se tiene un incremento en estos dos elementos, ambos influyen en la resistencia de las piezas soldadas. Las juntas absorben mayores cantidades de hidrógeno a grandes profundidades; este elemento se forma de la quema del revestimiento del electrodo durante la fusión.

Los gases como el nitrógeno y oxígeno que se utilizan en el hábitat seco afectan la dureza de la pieza soldada; esto se da dependiendo de la profundidad a la que se trabaje; para evitar estos efectos se utilizan a menudo gases como helio y el oxígeno dentro del hábitat.

Figura 66. **Proceso arco manual metálico (MMA)**



Fuente: *Ingemecánica*. <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn45.html>. Consulta: 14 de abril de 2018.

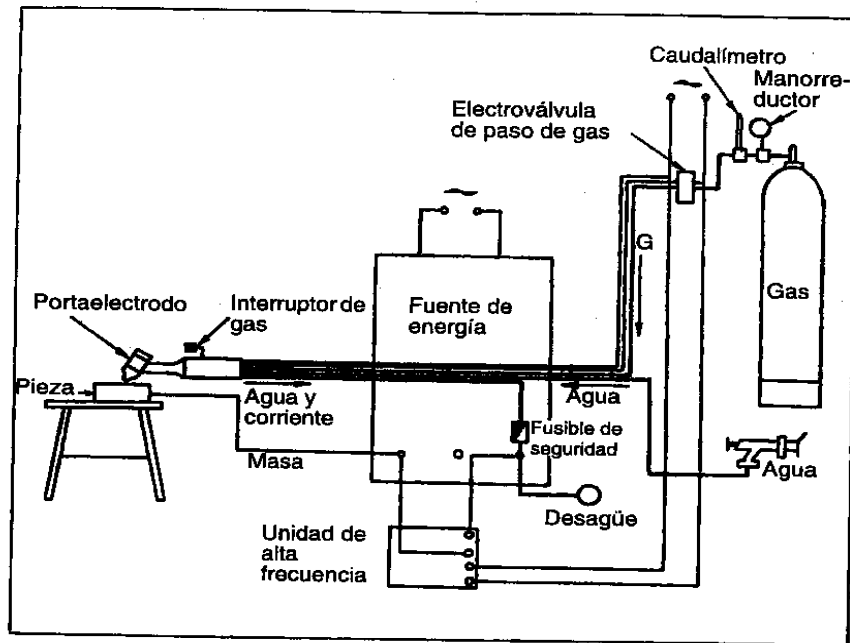
5.2. **Equipo**

Conjunto de elementos utilizados para llevar a cabo el proceso de soldadura TIG.

5.2.1. **Equipo TIG**

El equipo básico del cual se compone el proceso de soldadura TIG consiste en una fuente de energía, un portaelectrodo, cables, botellas de gas y mangueras para transportar el gas.

Figura 67. **Equipo utilizado en el proceso TIG**



Fuente: *Soldadura bajo atmosfera inerte y electrodo de tungsteno (TIG)*.
<https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura=20TIG.doc.pdf>. Consulta: 10 de noviembre de 2017.

5.2.1.1. Fuentes de energía

La soldadura TIG puede efectuarse con máquinas de corriente alterna y corriente continua, el tipo de fuente dependerá del material que se necesite soldar.

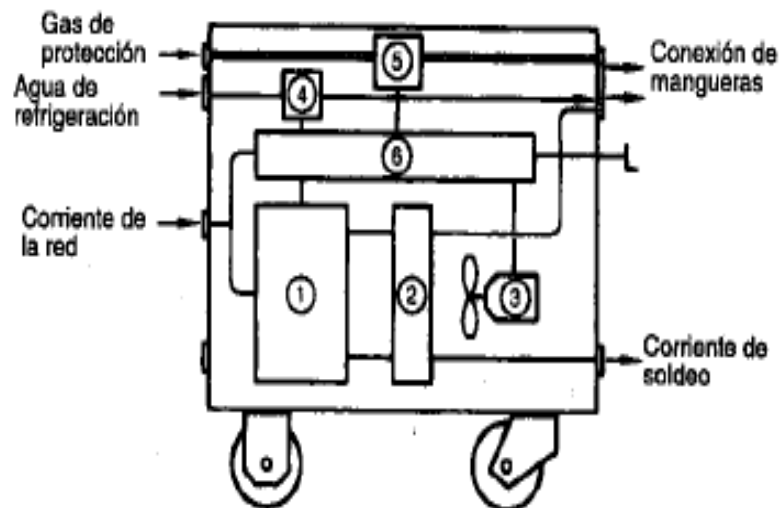
La fuente de energía debe mantener el valor de la intensidad constante para que al momento de soldar no existan variaciones de magnitud producto de los cambios en la longitud que pueda sufrir el arco eléctrico; este tipo de máquinas deben contar con un rango de valores de intensidad mínima y

máxima para realizar el proceso en materiales dependiendo su espesor y el tipo de metal a soldar.

5.2.1.1.1. Fuente en corriente continua

Cuando se tienen máquinas de corriente continua, la polaridad directa es la más recomendada debido a que soporta altos niveles de corriente y presenta buena penetración. Para la polaridad inversa se tiene poca penetración y los niveles de intensidad que se utilizan son bajos para que el electrodo no sufra un sobrecalentamiento y resulte imposible realizar la soldadura.

Figura 68. Fuente de corriente continua



1. Transformador: reduce los niveles de tensión e intensidad de la red a niveles adecuados para soldar.
2. Rectificador: convierte la corriente alterna en corriente continua.

Continuación de la figura 68.

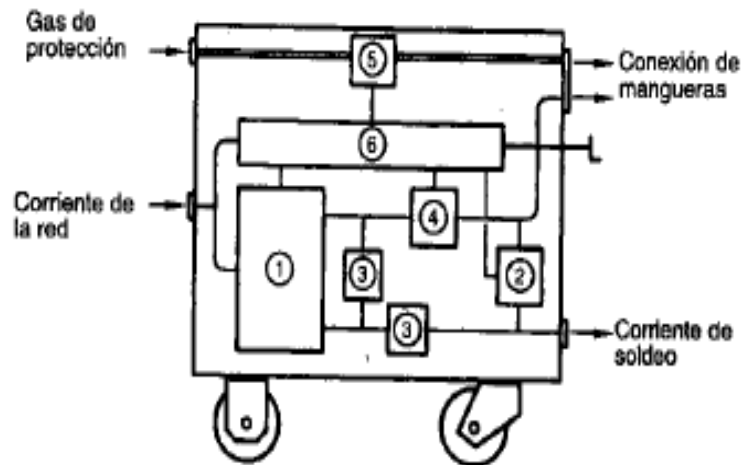
3. Ventilador: utilizado para enfriar el transformador y el rectificador.
4. Controlador de agua de refrigeración: controla la presión del agua de refrigeración.
5. Válvula magnética del gas de soldeo: abre y cierra el paso del gas de protección.
6. Módulo de control: está a cargo del encendido y apagado de la corriente de soldeo, regula la corriente de soldeo, controla el gas de protección con tiempo ajustable antes y después del soldeo.

Fuente: *Soldadura bajo atmosfera inerte y electrodo de tungsteno (TIG)*.
<https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura=20TIG.doc.pdf>. Consulta: 10 de noviembre de 2017.

5.2.1.1.2. Fuente en corriente alterna

Este tipo de fuente es utilizado para llevar a cabo uniones de metales de bajo espesor y para soldar aleaciones de aluminio y magnesio. El empleo de este tipo de fuentes produce inestabilidad en el arco eléctrico que produce que el arco se apague cada vez que la señal senoidal de voltaje toma un valor cero, este problema puede estabilizarse colocando generadores de impulso de alta frecuencia, filtros capacitivos o el empleo de fuentes que produzcan una onda cuadrada.

Figura 69. **Componentes de una máquina de corriente alterna**



1. Transformador: reduce los niveles de tensión y corriente a valores adecuados para el soldeo.
2. Generador de impulsos de alta frecuencia: genera impulsos de alta frecuencia y eleva la intensidad para reiniciar el arco eléctrico.
3. Protector: protección para el transformador contra los impulsos de alta tensión que podrían destruirlo.
4. Filtro capacitivo: compensa la diferencia entre las dos mitades de cada onda que pueden provocarse durante el soldeo.
5. Válvula magnética del gas de soldeo: abre y cierra el paso del gas de protección.

Continuación de la figura 69.

6. Módulo de control: está a cargo del encendido y apagado de la corriente de soldeo, regula la corriente de soldeo, controla el gas de protección con tiempo ajustable antes y después del soldeo.

Fuente: *Soldadura bajo atmosfera inerte y electrodo de tungsteno (TIG)*.
<https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura=20TIG.doc.pdf>. Consulta: 10 de noviembre de 2017.

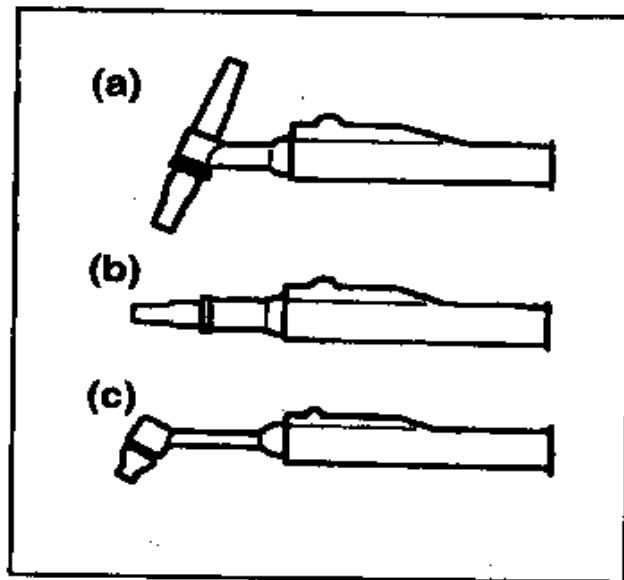
5.2.1.2. Portaelectrodos

Conocidos también con el nombre de sopletes; son los encargados de conducir la corriente y los gases que sirven de protección para la zona soldada. Estos elementos pueden ser enfriados mediante refrigeración natural y refrigeración forzada; la primera se refiere a que el aire circula por el soplete y la segunda cuando se da una circulación de agua en este mismo elemento.

Cada uno de estos métodos de refrigeración se utilizan en una determinada aplicación, por ejemplo los de refrigeración natural son utilizados cuando se necesita soldar espesores de materiales pequeños y no es necesaria una gran cantidad de corriente; caso contrario, ocurre con los portaelectrodos de refrigeración forzada, utilizados cuando es necesario soldar espesores grandes y es demandada una cantidad considerable de corriente que va desde los 150 a 200 amperios.

Cuando la corriente de soldeo alcanza valores arriba de 300 amperios la boquilla del soplete debe ser enfriada por agua para evitar un sobrecalentamiento de la pieza.

Figura 70. **Configuraciones del portaelectrodos TIG: (a) configuración normal, (b) configuración recta, (c) configuración corta**



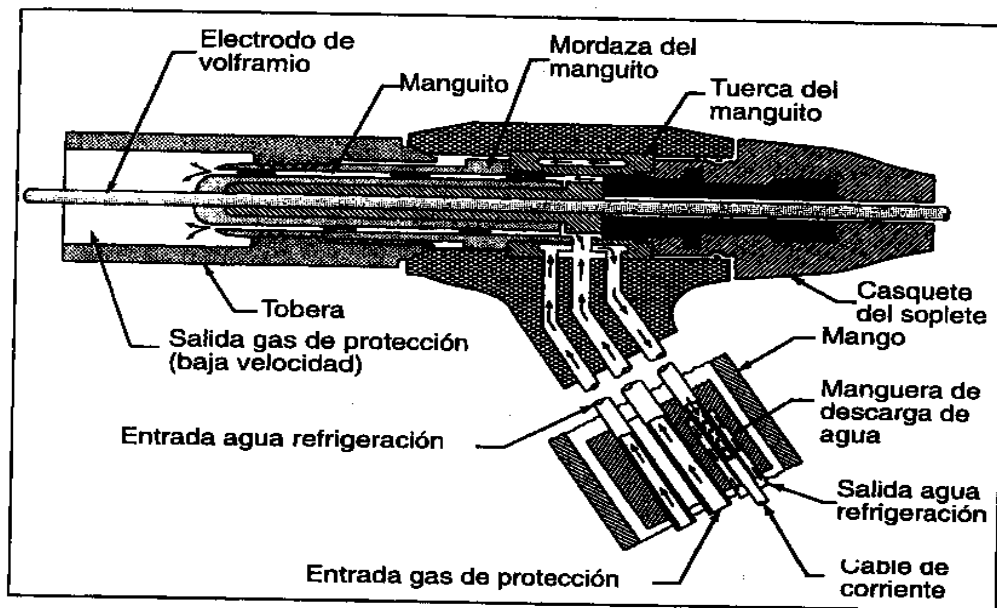
Fuente: *Soldadura bajo atmosfera inerte y electrodo de tungsteno (TIG)*.

<https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura=20TIG.doc.pdf>. Consulta: 10 de noviembre de 2017.

Dentro del portaelectrodo existe un elemento que tiene la misión de dirigir y distribuir el gas sobre la zona donde se realizará la soldadura; este elemento es llamado tobera. Cada portaelectrodo viene equipado con un juego de toberas de diferentes diámetros para distintas aplicaciones.

Al momento de soldar se debe inspeccionar que el electrodo utilizado se encuentre perfectamente centrado en la tobera; esto ayudará a que el chorro de gas proveniente del soplete proteja en su totalidad el charco de metal fundido.

Figura 71. **Portaelectrodos con refrigeración forzada para el proceso TIG**



Fuente: *Soldadura bajo atmosfera inerte y electrodo de tungsteno (TIG)*.

<https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura=20TIG.doc.pdf>. Consulta: 10 de noviembre de 2017.

5.3. Tipos de gases utilizados

Para el proceso de soldadura TIG, es utilizado un tipo de gas inerte, el cual no interactúa con el proceso de soldadura; este gas crea una atmosfera protectora que sirve para evitar que otros elementos alrededor de la soldadura interactúen con está provocándole oxidación, lo cual repercutiría en una soldadura deficiente.

En la soldadura TIG existen distintos tipos de gases protectores para evitar la oxidación de la pieza soldada, uno de estos es el helio; este elemento

produce mayor calor al momento de soldar lo cual provoca una penetración más profunda; también, produce que se pueda incrementar la velocidad de avance en la soldadura en comparación con una atmosfera de argón.

Los gases utilizados en el proceso de soldadura TIG son:

Helio, argón e hidrógeno, cada uno de estos elementos es utilizado en aplicaciones de aleaciones ligeras, metales activos y chapas con un espesor muy pequeño.

- Argón: proporciona una buena estabilidad del arco eléctrico y facilita el encendido del electrodo, también tiene una baja conductividad térmica lo que hace que la zona afectada térmicamente sea pequeña, el calor se concentra en el área a soldar lo que produce una alta penetración en el centro del cordón.
- Helio: las soldaduras realizadas con este gas presentan poca penetración y cordones más anchos esto produce que sea necesario aumentar el nivel de tensión durante el proceso para llevar a cabo las soldaduras y existe un mayor consumo de gas comparado con el argón.
- Mezcla argón-helio: esta mezcla es utilizada para soldar aluminio, cobre y algunos aceros inoxidable que no son compatibles con el argón, con la adición del helio la soldadura es más rápida que solamente con el argón.
- Mezcla argón-hidrógeno: con esta mezcla aumenta el grado de penetración de la soldadura, es utilizada para soldadura automática o manual de aceros inoxidable, aleaciones de níquel y cobre-níquel.

5.4. Tipos de electrodos

Los electrodos utilizados en el proceso de soldadura TIG son electrodos no consumibles; es decir, tienen un elevado punto de fusión con respecto a las varillas que se funden sobre el material base para fusionarlas. La función que tienen estos tipos de electrodos es crear y mantener el arco eléctrico estable sin aportar el material del que estén hechas las varillas de aporte que se fundan durante el proceso de soldadura.

Para evitar el desgaste de los electrodos es muy importante que se fabriquen de un material que posean una temperatura de fusión elevada. En corriente directa, el electrodo se debe conectar al polo negativo de la fuente de poder; con esta disposición en los cables, el calor generado en el electrodo será menor que si se conectara en el polo positivo de la máquina de soldar.

En el proceso de soldadura TIG se emplean en general tres tipos de electrodos no consumibles, que se clasifican de acuerdo a su composición en:

- Electrodo de wolframio puro
- Electrodo de wolframio aleado con torio
- Electrodo de wolframio aleado con zirconio

Los primeros electrodos utilizados en el proceso TIG fueron de wolframio puro, más tarde se conoció que si se le añadía a este elemento pequeñas cantidades de óxido de torio u óxido de circonio se produciría un aumento del flujo de electrones. La adición de estos elementos ayudó a que el encendido y reencendido de los electrodos fuera más fácil y proporcionó una mayor estabilidad del arco eléctrico.

Estos elementos también incrementaron el nivel de corriente que puede utilizarse ya que elevaron el punto de fusión de la varilla y evitaron que esta sufriera desgaste.

5.4.1. Electrodo de wolframio puro

Tiene un punto de fusión de 3400 ° C aproximadamente y se hace necesario que el extremo del electrodo tenga un acabado redondeado.

Es utilizado en corriente alterna para soldar elementos como el aluminio y sus aleaciones, en corriente continua se produce inestabilidad en el arco eléctrico, desventaja que no ocurre en corriente alterna.

5.4.2. Wolframio aleado con torio

Tiene un punto de fusión alrededor de los 4000 ° C, el extremo de este tipo de electrodo debe ser afilado. Este tipo de electrodo es utilizado en corriente continua y puede soldar aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidables, cobre, titanio, entre otros.

Cuando se utiliza este tipo de electrodos en corriente alterna la punta del electrodo tiende a deformarse. El torio le da estabilidad al arco eléctrico, incrementa el flujo de electrones, facilita el encendido del electrodo y proporciona una mayor resistencia a la contaminación; las desventajas de este elemento es el alto precio de un 10 % a 15 % mayor que el torio puro y la emisión de radiactividad; esta última característica del torio lo hace reemplazable con óxido de cerio o lantano, ambos elementos proporcionan las mismas ventajas y aplicaciones con la particularidad de no ser radiactivos.

5.4.3. Volframio aleado con zirconio

El punto de fusión de esta aleación está alrededor de los 3 800 ° C, posee características intermedias entre el electrodo de volframio puro y el aleado con torio, puede ser usado en corriente alterna y corriente continua.

Su uso es mayor en corriente alterna por la mayor estabilidad del arco eléctrico, el encendido del electrodo se da con mayor facilidad, permite mayores niveles de corriente que el electrodo aleado con torio y la punta no se deforma. Son utilizados para soldar materiales como el aluminio y el magnesio.

La forma de la punta de los electrodos utilizados en el proceso TIG es fundamental para mantener estable el arco eléctrico, una punta que no sea la correcta producirá inestabilidad en la fusión de la junta.

5.5. Procedimiento para soldar

Consiste en una serie de pasos para poder realizar de forma correcta la unión de los metales. Estos van desde la preparación de la pieza; hasta la forma correcta de realizar el encendido del electrodo.

5.5.1. Preparación de la unión

El éxito de una soldadura con el proceso TIG depende de la preparación de la pieza, esto implica la preparación de los bordes, la limpieza del área a soldar; eliminando óxidos, escorias, aceites, grasas, pintura o cualquier otro elemento que pudiera afectar la calidad de la unión. La limpieza del material de aporte también debe ser una prioridad para obtener buenos resultados en la

soldadura; razón por la cual se recomienda que estos elementos se conserven dentro de sus respectivos embalajes.

La mejor forma de preparar los bordes de las piezas se consigue con máquinas herramientas como el torno o la fresadora. Sin embargo, si no se contara con estas máquinas, es posible utilizar el oxicorte o plasma, al utilizar estos últimos procesos en las piezas a soldar; se deberá retirar cualquier escoria que resulte de estas técnicas mediante esmerilado.

5.5.2. Cebado del arco

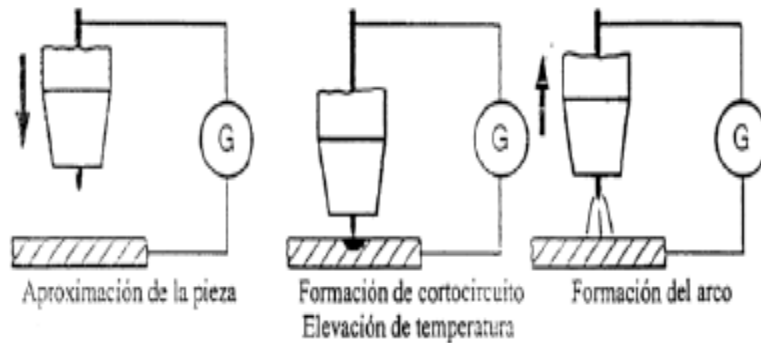
En la soldadura TIG se utilizan dos técnicas para el encendido del electrodo conocidas como:

- Cebado por raspado
- Cebado por alta frecuencia

5.5.2.1. Cebado por raspado

Es el método más sencillo para el encendido del electrodo, consiste en raspar la punta del electrodo suavemente sobre el material base. Sin embargo, al utilizar esta técnica se corre riesgo de inclusiones de wolframio en el metal base y daños en la punta del electrodo. El primero de estos efectos puede evitarse al utilizar una placa de cobre para el encendido del electrodo, llamada pieza de arranque.

Figura 72. **Cebado por raspado. G = fuente de alimentación**



Fuente: 3. *Proceso TIG.*

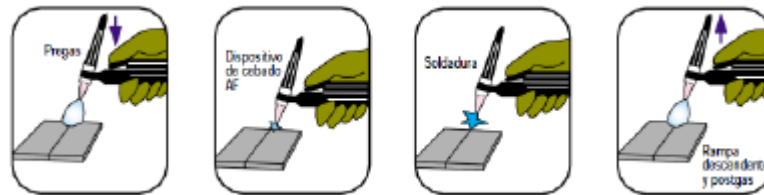
https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual2/pluginfile.php/14624/mod_folder/content/0/3.%20PROCESO%20TIG.pdf?forcedownload=1. Consulta: 7 de junio de 2018.

5.5.2.2. **Cebado por alta frecuencia**

Esta técnica utiliza una corriente de alta frecuencia y elevada tensión para evitar los inconvenientes del encendido por raspado. Se utiliza en corriente alterna con mayor frecuencia que en corriente directa.

Al emplear el cebado por alta frecuencia no es necesario el contacto entre el material base y el electrodo, para iniciar el cebado, se debe encender la fuente de poder y colocar horizontalmente la punta del electrodo a una distancia aproximada de 50 mm de la pieza. Posteriormente se debe acercar el extremo del electrodo a unos 2 o 3 mm del metal base. Con esta distancia la fuente de corriente de alta frecuencia vencerá la resistencia del aire y se iniciará el arco eléctrico.

Figura 73. **Cebado por alta frecuencia**



Fuente: 3. *Proceso TIG.*

https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual2/pluginfile.php/14624/mod_folder/content/0/3.%20PROCESO%20TIG.pdf?forcedownload=1. Consulta: 7 de junio de 2018.

Para extinguir el arco eléctrico, solamente se debe retirar el electrodo rápidamente hasta la posición inicial de 50 mm; este movimiento evitará deterioros al final del cordón de soldadura. Algunos equipos tienen instalado un mecanismo de pedal que permite reducir gradualmente la intensidad de las corrientes de alta frecuencia.

Unos de los inconvenientes más notorios del cebado por corrientes de alta frecuencia es la distorsión que se produce en las comunicaciones.

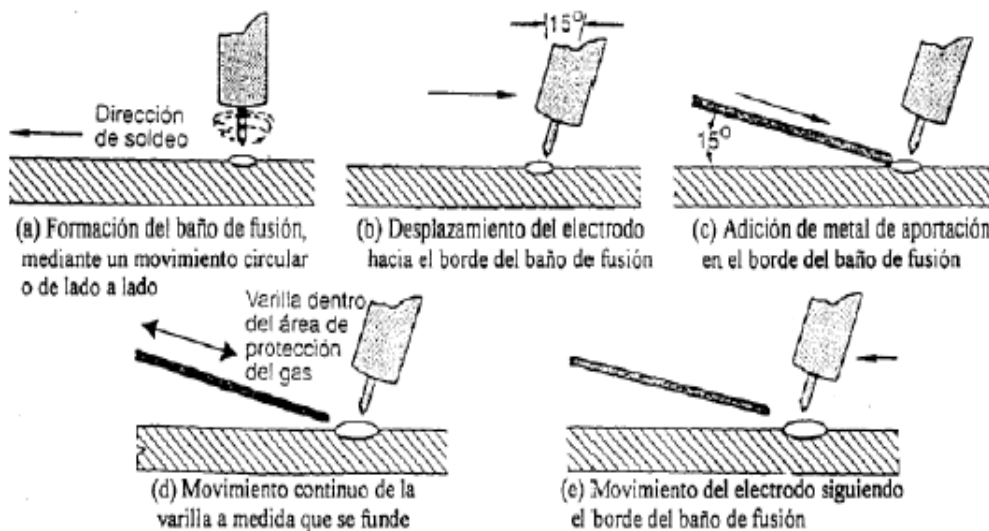
5.5.3. Técnica de soldeo manual

Al haberse ya realizado el cebado del electrodo, se debe realizar un movimiento circular del mismo hasta que exista el charco de metal fundido, pasando posteriormente a un movimiento rectilíneo del portaelectrodo.

- La inclinación del portaelectrodo debe ser aproximadamente de 75° con respecto a la dirección de avance.

- El electrodo debe de formar un ángulo de 15° con respecto al sentido de avance de la soldadura.
- A la varilla de aporte se le debe de dar un movimiento de vaivén para poder introducirla lentamente dentro del metal fundido
- Al momento de finalizar el cordón de soldadura, no se debe de retirar instantáneamente el soplete, este debe de permanecer protegiendo el baño de fusión hasta que el metal depositado solidifique.

Figura 74. **Técnica de soldeo manual**



Fuente: 3. *Proceso TIG*.

https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual2/pluginfile.php/14624/mod_folder/content/0/3.%20PROCESO%20TIG.pdf?forcedownload=1. Consulta: 7 de junio de 2018.

6. CORTES DE METALES BAJO AGUA

6.1. Generalidades

El corte de metales bajo agua consiste en una técnica que se vale de algunos elementos principales como electrodos y gases para realizar los trabajos de reparación de una pieza. Este proceso se realiza en contacto directo con el agua y el material a trabajar influye en la elección del método de corte más adecuado. Para llevar a cabo el corte de metales bajo agua existen varios métodos, entre los más utilizados se pueden mencionar:

6.1.1. Corte por arco-oxígeno

Es el método más utilizado en la actualidad para cortar metales que presentan una rápida oxidación al estar en contacto directo con el oxígeno. El proceso consiste en aplicar calor en la línea de corte por medio de un arco eléctrico que se genera entre la pieza y la punta del electrodo cortante; en el lugar que se desea cortar se eleva la temperatura del metal y a través de los electrodos con núcleo tubular es enviado un chorro de oxígeno puro a alta velocidad, el cual realiza el corte de la pieza.

Este procedimiento solamente es utilizado en metales que se oxidan con facilidad como en los aceros, su uso es deficiente al momento de realizar cortes en aceros inoxidables, metales resistentes a la corrosión y aleaciones de cobre.

El corte con oxígeno permite trabajar placas de mayor y menor espesor de 1/4"; para espesores grandes se recomienda hacer la suficiente presión para

mantener el contacto entre la pieza a cortar y el electrodo; también, debe existir presión para que la velocidad de avance de corte sea la correcta.

Para placas de pequeño espesor no es necesario aplicar presión sobre la torcha hacia la pieza para que exista contacto entre ambos elementos, solo se necesita que el soplete se mueva sobre la línea de corte. Otra técnica de corte para piezas de pequeño espesor es inclinar en un ángulo aproximado de 45° el soplete, con esta disposición se incrementa el espesor de la placa y ya es posible aplicar presión entre el electrodo y la pieza.

Para el corte de metales no ferrosos se emplea aire comprimido como sustituto del oxígeno; en este tipo de metales la técnica de corte por arrastre no tiene buenos resultados y para obtener cortes satisfactorios el operador debe colocar y retirar el soplete fuera del material fundido; esto se debe a que el charco de fusión se produce solamente alrededor del arco eléctrico.

Figura 75. **Corte con el proceso de arco-oxígeno**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

6.1.2. Corte arco-agua

Este tipo de corte utiliza un electrodo impermeable con revestimiento de cobre sobre una aleación de carbón – grafito. En este procedimiento se sustituye el oxígeno como elemento de corte por un chorro de agua a alta presión; el agua puede ser dulce o salada y debe de tener una presión aproximada de 90 PSI.

Con este proceso se puede trabajar cualquier estructura subacuática; se obtienen cortes limpios y listos para soldar y es aplicable a metales no mayores de 1” de espesor.

6.1.3. Corte por electrodos ultratérmicos

Este método utiliza un electrodo ultratérmico, en realidad el electrodo es un tubo hueco de ultra alta temperatura que en su interior está formado por siete hilos de acero; dentro de estos siete hilos fluye oxígeno que al estar en contacto con una chispa produce una llama que alcanza una temperatura de 5538 ° C; con este proceso no se hace necesario realizar una limpieza previa de las piezas a trabajar.

Al comparar esta técnica con los métodos de corte anteriores, se tiene una reducción en los tiempos y un mayor rendimiento de los electrodos. Sin embargo, existe un incremento en el consumo de oxígeno, con el corte por electrodos ultratérmicos se puede cortar cualquier tipo de metal. Se pueden realizar cortes en placas de 6” sin ningún problema; también, permite la perforación de concreto, granito y algunos metales como el fosforo-bronce. Por la versatilidad de esta técnica y por la variedad de materiales que puede cortar

o perforar se emplea en ocasiones en salvamentos para el rescate de personas atrapadas por servicios militares o de emergencias.

El corte de materiales se puede realizar con o sin corriente, ya que la fuente de energía se utiliza solamente para producir una chispa entre el electrodo y la pieza a trabajar, esta decisión será tomada por el buzo; el electrodo continuará ardiendo siempre y cuando existe flujo de oxígeno sin importar si existe o no corriente.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que al no utilizar la corriente eléctrica el consumo del electrodo será más lento, la velocidad de corte será menor y el tiempo de operaciones se incrementará. Para reducir el tiempo de reparaciones e incrementar la producción al trabajar sin corriente eléctrica, se recomienda limpiar la superficie de la pieza a cortar de cualquier flora, lodo, óxido, o de cualquier otro material que impida que la transferencia de calor sea óptima.

Figura 76. **Corte por electrodos ultratérmicos**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

6.1.4. Corte oxifundente o lanza Berfix

Este tipo de técnica puede utilizar sobre la superficie la superficie como también debajo de ella; una característica muy importante de esta técnica es el fácil armado del equipo; sin embargo, se requieren diversos materiales para su puesta en marcha.

Este sistema de corte puede alcanzar temperaturas superiores a los 2 500 ° C, esto se logra gracias a la combustión del oxígeno con varillas de hierro dulce; la temperatura de corte se puede incrementar por la inserción de un alambre de aluminio dentro del varillaje de hierro, con esto se pueden tener temperaturas de corte hasta los 5 000 ° C.

Con este procedimiento una sola varilla puede cortar entre 60 y 100 cm de una plancha de acero de 7 mm de espesor para los mismos materiales cortados con electrodos ultratérmicos; por la alta temperatura alcanzada se puede fundir roca, concreto y es muy utilizado en lugares donde no se cuente con energía eléctrica. Este sistema al igual que el corte ultratérmico se caracteriza por un alto consumo de oxígeno durante las operaciones de corte, razón por la cual solamente es empleado por personas con experiencia en esta técnica.

6.1.5. Corte por electrodos revestidos o por arco metálico

Tipo de corte que utiliza un electrodo revestido con un material llamado termocontraíble, este material es utilizado como un aislante eléctrico y permite que el electrodo pueda cortar metales bajo el agua; la ventaja de este proceso es que no necesita oxígeno para realizar las operaciones de corte; esto hace que se facilite el corte de materiales ferrosos y no ferrosos.

Esta técnica puede realizar cortes en aceros con espesores menores o iguales a 1/4" y en metales como el bronce y cobre sin importar el espesor de las chapas. Durante el corte se debe hacer presión verticalmente sobre la torcha y hacia delante arriba de la línea de corte trazada. Para trabajar metales de 1/4" a 3/8" se puede emplear la técnica de arrastre, en la cual el electrodo se desliza sobre la línea de corte y para el trabajo de metales con mayor espesor se le suele dar un movimiento corto y lento al electrodo, llamado movimiento de sierra.

6.2. Equipo utilizado

Son los elementos utilizados para poder realizar el corte por arco-oxígeno bajo el agua.

6.2.1. Equipo utilizado para corte por arco-oxígeno

Para la técnica de corte por arco-oxígeno bajo agua se utilizan elementos comunes a los utilizados en la superficie, entre estos elementos están: soplete, reguladores de oxígeno, entre otros.

6.2.1.1. Soplete

En general está compuesta por los siguientes elementos:

- Mango: permite la inserción de electrodos de corte, por los cuales viaja el oxígeno hasta llegar a la pieza a cortar.
- Válvula para controlar el flujo de oxígeno.

- Una toma de corriente para conectar cables de energía.
- Una válvula antirretroceso removible de malla metálica, llamada arresta llamas, es el elemento que impide que partículas de metal caliente puedan ingresar hacia la torcha.

Figura 77. **Procesos utilizados en el corte por arco-oxígeno**

Torcha Divex

Torcha Aqua Thermic



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

6.2.1.2. Reguladores de oxígeno

Los regulares de oxígeno están compuestos por dos cámaras reguladoras de presión, una de estas cámaras controla la presión dentro del cilindro mientras que la otra regula la presión de trabajo.

Cada una de estas cámaras cuenta con un manómetro que indica la presión existente dentro de ellas; para reducir o aumentar la presión se debe girar un tornillo de ajuste hasta la presión deseada.

Figura 78. **Regulador de oxígeno**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

6.2.2. Equipo utilizado para corte por arco-agua

El proceso de corte arco-agua emplea algunos elementos adicionales que los utilizados para el corte arco-oxígeno. A continuación, se detallan algunos de estos elementos.

6.2.2.1. Fuente de corriente

La fuente de poder para el proceso de corte por chorro de agua es una máquina de corriente continua; cuenta con las mismas características que las usadas en la soldadura eléctrica de superficie. Los amperios que puede entregar este tipo de fuente están en un rango de 350 a 500 A; se utiliza

polaridad inversa para realizar los cortes, caso contrario ocurría en el corte por arco-oxígeno en donde se utilizaba polaridad directa.

6.2.2.2. Soplete

Este soplete tal y como el utilizado para el proceso de corte arco-oxígeno es impermeable en su totalidad, este tipo de torchas tienen la característica de ser pequeñas y ligeras para evitar el esfuerzo físico al buzo durante el proceso de corte.

6.2.3. Equipo utilizado para corte por electrodos ultratérmicos

Este tipo de corte tal y como su nombre lo indica emplea electrodos para llevar a cabo el corte de materiales bajo agua. En este procedimiento se pueden encontrar algunos elementos que no son utilizados en los métodos de corte mencionados anteriormente.

6.2.3.1. Fuente de corriente

En este tipo de corte se puede utilizar una máquina de corriente continua con polaridad directa de 150 a 200 amperios o una batería de 12 voltios de las utilizadas en automóviles. Estas fuentes de energía solamente se utilizan para producir una chispa entre el material base y la punta de los electrodos; en el momento de que exista el arco eléctrico se hará fluir el oxígeno a través de los electrodos para que estos se enciendan y comiencen con el proceso de corte.

En los últimos años se ha estado diseñando un nuevo sistema para el encendido de electrodos ultratérmicos, en este sistema no se necesita de una fuente de poder de energía para producir la chispa entre la punta del electrodo y

la pieza a trabajar. Este nuevo proceso de encendido es llamado ignición por descarga química. Este nuevo sistema de ignición está formado por un cilindro de oxígeno, un regulador de presión, mangueras, un soplete de corte y cápsulas CDI.

Una cápsula CDI es una pequeña cabina que cuenta con varios químicos líquidos dentro de ella, estos líquidos se encuentran separados por pequeñas paredes de vidrios. Cuando se presiona la punta del electrodo sobre las cápsulas CDI las paredes se destruyen produciendo que los químicos se mezclen; esta mezcla da como resultado una reacción química violenta que producirá una chispa capaz de calentar la punta del electrodo; con la adición de oxígeno en la chispa producida se encenderá el electrodo y estará listo para realizar las operaciones de corte.

Figura 79. **Encendido de electrodos por cápsulas CDI**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

6.2.3.2. Soplete

Los sopletes utilizados deben ser pequeños y fáciles de manipular por el buzo; esto ayudará a que no se vea reducido su rendimiento físico durante las operaciones de corte. Este tipo de torchas pueden soportar la electrolisis y por lo regular tienen menor probabilidad de incrustaciones de arena que los sopletes de arco-oxígeno.

Los electrodos son sujetados por medio de un mandril roscado y la mayoría de los sopletes son desmontables, esto ayuda a que la limpieza y el mantenimiento de estos resulte más sencillo.

6.2.3.3. Mangueras

Pueden ser de color azul, verde o negro y deben ser resistentes a los cambios de temperatura; este elemento va desde los manómetros hasta el soplete y deben soportar elevadas presiones de trabajo.

6.2.3.4. Cables

Son utilizados calibres de cable tipo 1/0 para el soplete y la conexión a tierra, la manguera de oxígeno y el cable de alimentación del soplete deben estar unidos por una cinta de aislar para darle comodidad al buzo durante las operaciones de corte.

Se presenta una referencia de las longitudes de los cables a utilizar para el proceso de corte ultratérmico, el largo de los cables dependerá de la profundidad de las operaciones de corte y para los metales con grosores mayores a una pulgada se debe aumentar la presión del oxígeno.

Figura 80. **Longitud de cables, diámetro y corriente para corte por electrodo ultratérmico**

Profundidad (pies)	Oxígeno (psi con manguera 3/8")	Corriente (Amp) p/ diámetro del cable usado			
		Largo del Cable	1/0	2/0	3/0
100'	145 psi		152	150	150
150'	172 psi		155	152	150
200'	199 psi		157	154	152
250'	226 psi		159	156	154
300'	254 psi		161	158	156

Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

6.2.3.5. Interruptores de seguridad

El interruptor empleado es uno tipo cuchilla que puede tener una o dos cuchillas de un polo; estos interruptores pueden soportar corrientes de 400 amperios en corriente directa y no cuentan con un fusible.

6.2.4. Equipo utilizado para sistema de corte oxifundete o lanza Berfix

El equipo básico para este proceso consta de una botella de oxígeno, manguera de oxígeno, un manómetro y de un tubo flexible, también llamado varilla de corte.

El tubo flexible es resistente a materiales abrasivos y puede tener una longitud de 20 a 25 metros, la manguera de oxígeno cuenta con una válvula de corte rápido que tiene una rosca donde se inserta la varilla de corte. El equipo común con este proceso y el de electrodos ultratérmicos son las mangueras de

oxígeno; no existe la necesidad de reemplazarlas al realizar alguno de los dos procesos; las mismas presiones de oxígeno se pueden utilizar en ambas técnicas de corte.

6.2.5. Equipo utilizado para sistema de corte por electrodos revestidos

Para el corte por electrodos revestidos se emplea el mismo equipo que el utilizado para soldadura subacuática húmeda; son estos elementos una fuente de poder, cables, portaelectrodos, interruptor de seguridad, entre otros.

La diferencia que existe entre el corte y la soldadura húmeda es la magnitud de la corriente utilizada, el primero de estos procesos necesita de una mayor intensidad para llevar a cabo el corte de metales, cosa que no ocurre en la soldadura.

El amperaje de la fuente de poder debe ser acorde con el diámetro del electrodo a utilizar; se debe tener en cuenta las pérdidas de corriente que se dan por el largo y por el calibre del cable a utilizar.

6.3. Tipos de gases

A continuación, se presentan los gases empleados en los distintos procesos de corte bajo agua. Algunas de estas técnicas no utilizan un determinado gas para realizar el corte de materiales bajo agua. El oxígeno es el elemento más utilizado.

6.3.1. Corte por arco-oxígeno

Tal y como su nombre lo indica, este proceso emplea oxígeno como el elemento principal para realizar las operaciones de corte en metales ferrosos.

El oxígeno se almacena en cilindros de acero con una capacidad de 40 litros a 2 200 PSI, para el proceso de corte debe contar con una pureza de 99,5 % o mayor a esta. Una reducción en la pureza del oxígeno de un 1 % traerá como consecuencia una disminución en la velocidad y calidad del corte, que produce un incremento en la cantidad de escoria sobre la pieza. Cuando la pureza se reduce al 95 %, el oxígeno ya no es capaz de realizar la operación de corte que provoca en su defecto solamente la fusión de los metales.

En este proceso no solamente la pureza del gas afecta la calidad y funcionalidad del corte, estas dos características también se ven afectadas por la presión de trabajo del oxígeno.

Para tener un corte satisfactorio, el caudal de oxígeno debe ser el óptimo, cuando se tiene poco flujo de oxígeno, la operación de corte se demorará más tiempo del necesario y el buzo presentará fatiga durante la operación. Cuando el caudal a utilizar es mayor al necesitado, se producirá un incremento en el consumo de oxígeno y la fatiga también se hará presente en el buzo; este último inconveniente será causado gracias a la contrapresión que se producirá en la boca de la manguera, que provoca que esta persona utilice una mayor energía para sostener el electrodo.

Tabla I. **Presión de oxígeno para un determinado espesor de placa**

Espesor de placa		Oxígeno/Presión en el soplete	
Pulgada	Milímetros	Psi	kg/cm ²
¼	6,4	35 – 40	2,5 – 2,8
½	12,7	45 – 50	3,2 – 3,5
¾	19,0	50 – 55	3,5 – 3,9
1	25,4	55 – 60	3,9 – 4,2
> 1	> 25,4	> 65	> 4,6

Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

La tabla anterior presenta los valores de presión en el soplete, no toma en cuenta la caída de presión ocasionada por la longitud de la manguera, ni la compensación de presión debido a la profundidad. Por cada aumento de 100 pies en las mangueras se debe incrementar entre 5 a 10 psi la presión en el soplete.

Para conocer el valor de presión en la cual se toman en cuenta los factores mencionados anteriormente se tiene:

- Para el sistema inglés

$$P_{\text{adicional}} = h * 0,45$$

Donde:

$P_{\text{adicional}}$ = presión adicional [psi]

h = profundidad [pies]

$$P_{\text{total}} [\text{psi}] = P_{\text{adicional}} + P_{\text{tabla}}$$

- Para el sistema internacional

$$P_{\text{adicional}} = h * 0,105$$

Donde:

$P_{\text{adicional}}$ = presión adicional [kg/cm²]

h = profundidad [metros]

$$P_{\text{total}}[\text{kg/cm}^2] = P_{\text{adicional}} + P_{\text{tabla}}$$

6.3.2. Corte por electrodos ultratérmicos

En esta técnica se emplea oxígeno como el elemento principal de corte, tal y como sucede con el proceso descrito anteriormente y al igual que este; también se necesita la máxima pureza de este elemento, para esta operación debe ser del 99 %, superando al corte de arco-oxígeno.

Tabla II. **Presión de oxígeno dependiendo de la profundidad de trabajo**

Profundidad		Presión de Oxígeno	
Pies	Metros	Psi	Atmósfera
33	10	108	7,4
40	12	112	7,6
50	15	117	8,0
60	18	123	8,4
70	21	128	8,7
50	15	117	8,0
60	18	123	8,4
70	21	128	8,7
50	15	117	8,0
80	27	134	9,1
90	27	139	9,5
100	30	145	9,9

Continuación de la tabla II.

110	34	150	10,2
120	37	155	10,5
130	40	161	11,0
140	43	166	11,3
150	46	172	11,7
160	49	177	12,0
170	52	183	12,5
180	55	188	12,8
190	58	194	13,2
200	61	199	13,5
210	64	204	13,9
220	67	210	14,3
230	70	215	14,6
240	73	221	15,0
250	76	226	15,4
260	79	232	15,8

Fuente: *Corte y soldadura subacuática*.

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Cuando la profundidad de trabajo excede los 100 metros, por cada 3 metros de manguera se añade 0,069 bar para obtener 6,20 bar en la salida del soplete; esto compensa la pérdida de presión en la línea; además se añade 0,030 bar por cada 0,3 metros de profundidad.

6.3.3. Corte oxifundente o lanza Berfix

El gas empleado para el corte de metales es el oxígeno, prácticamente, se pueden utilizar las mismas mangueras y las mismas presiones de oxígeno que el utilizado en el corte por electrodos ultratermicos.

En este tipo de técnica la presión de corte está entre 100 a 114 psi para la manguera de alta presión; esto cambiará dependiendo de la profundidad de trabajo.

6.4. Tipos de electrodos para corte

Se presentan los electrodos empleados para los diversos métodos de corte de materiales bajo agua, se describe el tipo de revestimiento de cada uno de estos elementos y se presentan las diversas aplicaciones de cada uno de ellos.

6.4.1. Corte por arco-oxígeno

Este tipo de electrodos se pueden encontrar en un diámetro de 5/16" y con una longitud de 14"; se fabrican de acero tubular para el paso de oxígeno y pueden adquirirse en cajas que contienen de 30 a 100 electrodos. La corriente a emplear en los electrodos depende de su propio diámetro y del espesor de la placa a trabajar; el rango de corriente para este proceso va desde los 300 a los 600 amperios.

Al haber estado en contacto directo con el agua, puede ser utilizados nuevamente sin ningún problema; aprovechan en su totalidad electrodos sobrantes de operaciones anteriores.

Estas varillas aumentan la velocidad de los cortes, reduciendo el tiempo de sumersión del buzo. Están recubiertos por un material aislante impermeable, cuyo objetivo es la estabilidad del arco eléctrico y la prevención de daños mecánicos como la abrasión.

Figura 81. **Electrodos Sea cut para corte por arco-oxígeno**



Fuente: Somisa. <https://somisa.mx/productos/maquinas-y-equipo-de-corte/electrodo-subacuatico/>. Consulta: 8 de junio de 2018.

6.4.1.1. Revestimiento fundente

El revestimiento facilita el encendido del electrodo, proporciona estabilidad al arco eléctrico; esto último se da gracias a que al fundirse el revestimiento se propicia la formación de una atmosfera compuesta de gases, los cuales generan un ambiente estable durante el proceso de corte.

6.4.1.2. Revestimiento impermeable

Todo electrodo utilizado en trabajos subacuáticos debe de contar con un aislamiento contra el agua, esta capa de aislante evitará que la humedad se infiltre en la varilla, este recubrimiento es llamado revestimiento impermeable.

Al no contar un electrodo con esta capa impermeable, pequeñas cantidades de agua penetrarán en el revestimiento fundente de la varilla, y al momento de elevarse la temperatura del electrodo, el agua se convertirá en vapor a presión ocasionando la caída del revestimiento en su totalidad.

6.4.2. Corte por arco-agua

Los electrodos empleados en este proceso tienen un revestimiento de cobre y se puede encontrar en un diámetro de 5/16" x 9" de largo.

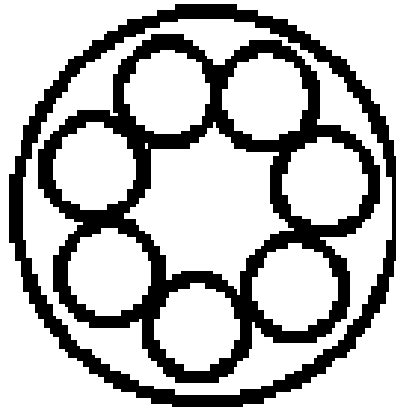
El cobre mejora la conductividad entre el electrodo y el soplete, el núcleo de la varilla es una aleación de carbón-grafito sobre la que se agrega una capa de cobre; también, se agrega un revestimiento impermeable que evita la penetración del agua.

La punta del electrodo que estará en contacto con la pieza a trabajar cuenta con un impermeabilizante especial, la función de este impermeable es deteriorarse cuando se golpea la punta de la varilla al momento del corte. El único lugar del electrodo que no cuenta con este aislante es el extremo que se insertará en la boquilla del soplete.

6.4.3. Corte por electrodos ultratérmicos

Este tipo de electrodos es fabricado con acero tubular, cuenta con un revestimiento de cobre en el exterior y en su interior se encuentra conformado por siete hilos huecos de acero, por estos hilos fluye el oxígeno utilizado para realizar los trabajos de corte de metal.

Figura 82. **Corte transversal de un electrodo ultratérmico**



Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Se puede encontrar en 18" de largo, pero también existen varillas más cortas, pueden tener un diámetro de 1/4" o 3/8", las primeras pueden realizar cortes en planchas de 1" de ancho y remover soldaduras livianas. Con el segundo diámetro de electrodo se puede retirar cordones de soldadura más gruesos y cortar placas con un ancho de 6".

Los electrodos de 1/4" de diámetro son utilizados para realizar cortes en placas con espesores entre 1/4" y 1/2", y se utilizan preferentemente cuando se necesitan cortes finos. Cuando se necesita mayor rapidez en los cortes y se tienen espesores mayores a 1/2" se utilizan las varillas de 3/8".

Figura 83. **Diámetros de electrodos utilizados en función del espesor de placas de acero**

Diámetro del Electrodo	Grosor de la Pieza	Distancia de Corte/Electrodo
1/4"	1/4"	20 – 25"
	1/2"	10 – 15"
3/8"	1/2"	12 – 20"
	1"	9 – 14"
	1 1/2"	8 – 12"

Fuente: *Corte y soldadura subacuática.*

http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf. Consulta: 3 de agosto de 2017.

Estas varillas pueden ser dobladas o retorcidas según la necesidad del buzo durante las reparaciones y no sufrirán algún deterioro en su estructura ni en su revestimiento.

Para el trabajo de metales no ferrosos, solamente se debe incrementar la temperatura de corte del electrodo y hundir suavemente la varilla en el metal fundido; esta técnica es llamada aserrar y se utiliza para expulsar el metal derretido fuera de la línea de corte.

Figura 84. **Electrodos exotérmicos Exodus International**



Fuente: *Marine visión*. http://www.marinevision.es/es/diving-pro/exodus/cutting_rods.html.

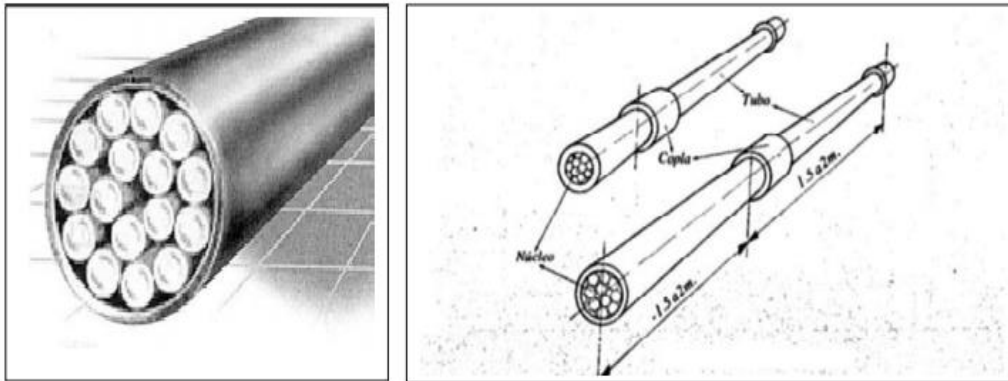
Consulta: 19 de junio de 2018.

6.4.4. Corte por lanza Berfix

Esta técnica no utiliza un electrodo como tal para realizar los cortes, en su lugar utiliza un tubo de acero al carbono por el cual circulara oxígeno y que tiene en su interior varillas de hierro aleadas con magnesio. Para la ignición de esta lanza, se calienta su extremo libre hasta la temperatura de combustión del acero que es alrededor de los 800 ° C; en este preciso momento se hace circular el oxígeno; este elemento junto al carbono del tubo y las varillas de hierro-magnesio producirán una reacción exotérmica que liberara el calor necesario para fundir cualquier tipo de metal, sea este ferroso o no ferroso.

La temperatura alcanzada en esta reacción es de aproximadamente 3 500 ° C, si se necesitara aumentar la temperatura de corte, se debería de insertar una varilla de aluminio dentro de las demás varillas de hierro-magnesio, esto elevara la temperatura a unos 5 000 ° C.

Figura 85. **Lanza térmica Indurflame**



Fuente: *Lanzas Indurflame*.

http://www.indura.cl/content/storage/cl/producto/ID3740_file_424_lanzas%20t%C3%A9rmicas.pdf. Consulta: 5 de julio de 2018.

6.4.5. Corte por electrodos revestidos

En este proceso se emplea el mismo tipo de electrodo que el utilizado para soldadura subacuática húmeda, la única diferencia se da en cuanto a los niveles de corriente utilizados en uno y otro procedimiento; mientras que se necesita una mayor intensidad para realizar el corte de metales, para la soldadura es menor el amperaje utilizado.

CONCLUSIONES

1. Para los procesos de corte y soldadura subacuáticos es utilizado equipo de protección personal para buzos soldadores, este equipo es común a ambos procesos y constan de: máscara de buceo, casco de buceo, que para los trabajos de corte y soldadura cuenta con un vidrio protector, traje de buceo, guantes y botas; estas últimas pueden tener o no suela, en caso de que se necesite caminar por el fondo marino.
2. La soldadura subacuática húmeda se realiza en contacto directo con el agua, en este proceso se utilizan electrodos impermeables. Esta técnica puede ser llevada a cabo utilizando la soldadura con electrodo revestido (SMAW) o la soldadura de alambre tubular relleno de fundente (FCAW). Sin embargo, la soldadura SMAW es la más utilizada debido a que no presenta problemas con la alimentación del carrete del alambre continuo, como es el caso de la soldadura FCAW.
3. La soldadura húmeda utiliza una fuente de poder de corriente continua polaridad directa; este tipo de máquinas le da una mayor estabilidad al arco eléctrico, con esta polaridad se evita que ocurra un deterioro de alguna pieza metálica del portaelectrodo producto de la electrólisis.
4. Uno de los mayores problemas de la soldadura húmeda es que el tiempo de enfriamiento de la pieza es muy corto, se sabe que, para tiempos cortos de enfriamiento de una pieza; la ZAT presenta una elevada dureza y es muy quebradiza, lo que hace que la pieza pueda fallar cuando se encuentre en servicio debido a tensiones residuales. El espesor de la

pieza a soldar es un parámetro relacionado con el tiempo de disipación de calor de la unión, para placas gruesas la velocidad de enfriamiento disminuye, la entrada de calor y el tipo de junta son parámetros que influyen en la velocidad de enfriamiento; también, es posible utilizar aislantes térmicos para aumentar el tiempo de disipación de calor, teniendo como resultado que la ZAT pierda dureza y mejore la plasticidad de esta zona.

5. La presión tiene un efecto muy importante sobre la soldadura húmeda. A grandes presiones se presentarán efectos como: disminución del diámetro del arco voltaico, presencia en mayor cantidad de hidrógeno en la soldadura, este último elemento propiciará la formación de poros en los cordones de soldadura; la porosidad se puede reducir al utilizar electrodos con revestimiento de carbonato de calcio. Otro efecto negativo de la presión es la deficiencia en la fusión del electrodo, esto se debe a la inestabilidad en el arco eléctrico, la inestabilidad puede ser corregida con el empleo de electrodos de diámetro pequeño.
6. La soldadura subacuática seca es un proceso de unión de metales en un ambiente seco rodeado de agua, esta técnica se puede realizar por medio de los procesos SMAW, FCAW, GMAW y el proceso TIG; sin embargo, la soldadura SMAW y TIG son las más utilizadas. Estos últimos procesos son realizados utilizando el mismo equipo y los mismos procedimientos de soldadura como si ambas técnicas se realizarán sobre la superficie.
7. La presión tiene efectos negativos sobre la soldadura seca, para el proceso TIG este factor afecta la profundidad de penetración de los cordones raíz, a grandes profundidades los cordones raíz tiene una

mayor penetración y son angostos; la forma del arco eléctrico también se ve afectado, pasando de una forma de campana a una de columna estrecha. Estos efectos provocan que el proceso de soldadura TIG sea difícil de llevar a cabo a grandes profundidades. Los efectos de la profundidad para la soldadura SMAW se ven reflejados en el voltaje y en el consumo de electrodos. El voltaje tiende a disminuir al aumentar la profundidad, lo que repercute en la estabilidad del arco eléctrico. A profundidades mayores a 35 metros los electrodos son consumidos rápidamente debido al aumento de presión.

8. El corte subacuático es una técnica que utiliza algunos elementos principales como electrodos y gases para realizar cortes en contacto directo con el agua. Con esta técnica se puede llevar a cabo el corte de metales ferrosos, no ferrosos y materiales no metálicos. Este proceso emplea mayores temperaturas de corte, esto se debe a que el calor producido es absorbido por el agua, esto hace necesario incrementar las temperaturas de corte de los materiales.

9. El corte por arco-oxígeno es utilizado para cortar metales ferrosos, esto debido a que estos materiales presentan una rápida oxidación al estar en contacto directo con el oxígeno. El corte por arco-agua, corte por electrodos ultratermicos, corte oxifundente y el corte por electrodos revestidos se utilizan para el corte de metales no ferrosos. Para cortar materiales no metálicos se utiliza el corte por electrodos ultratérmicos y corte oxifundente. Tal y como se describió anteriormente, el método de corte apropiado dependerá de las características y el tipo de material a trabajar, esto evitará gastos innecesarios y evitará poner en riesgo la vida de las personas que lleven a cabo estas operaciones.

RECOMENDACIONES

1. La información recopilada en este documento se basa en revistas, libros y artículos sobre pruebas realizadas en metales con soldadura subacuática. Sin embargo, al existir muchas variantes dentro de este proceso como el espesor de las piezas a soldar, el tipo de junta, el tipo de electrodo a utilizar, la salinidad del agua y la profundidad de trabajo. Con todas las variantes mencionadas anteriormente dentro de este proceso, es posible que los resultados obtenidos al realizar una soldadura con esta técnica no sean exactamente a los presentados en este documento.
2. Debido a los avances tecnológicos que se dan en distintas ramas de la ingeniería, no quedándose atrás estas innovaciones en el ramo de la soldadura, es posible que en este momento se estén desarrollando nuevas técnicas de corte y soldadura bajo el agua, no tendiendo solamente las presentadas en este documento. Por este motivo, se hace un llamado a realizar a una investigación previa, de los posibles nuevos métodos de corte y soldadura para evitar accidentes; ya que estos pueden diferir en su comportamiento y utilización de los presentados en esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR SCHAFFER, Julio Alberto. *Soldadura*. [en línea]. <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/17.pdf> [Consulta: 20 de septiembre de 2017].
2. American Welding Society. *Manual de soldadura. Tomo I*. [en línea]. <<https://librosdeingenieriamecanicaymas.blogspot.com/2017/09/manual-de-soldadura-tomo-i-ii-y-iii.html>> [Consulta: 20 de agosto de 2017].
3. DARIUSZ, Fydrych; GRZEGORZ, Rogalski; JERZY, Łabanowski. *Problems of underwater welding of higher-strength low alloy steels*. [en línea]. <http://www.secpomorze.com/userfiles/image/news/25_Fydrych_Rogalski_Labanowski-Problems_of_Underwater_Welding_of_Higher-Strength_Low_Alloy_Steels.pdf> [Consulta: 22 de enero de 2018].
4. ECHEVERRÍA, Mauricio Ibarra. *Zona afectada térmicamente*. [en línea]. <<http://www.revistas.usach.cl/ojs/index.php/remetallica/article/view/File/1771/1650>> [Consulta: 11 de marzo de 2018].
5. EYHERALDE, Miguel. *Metalurgia de la soldadura*. [en línea]. <<http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/05%20Metalurgia%20de%20la%20soldadura.pdf>> [Consulta: 4 de abril de 2018].

6. GARAŠIĆ, Ivica, KOŽUH, Zoran. *Underwater welding and cutting*. [en línea]. <https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465217921-0-underwaterweldingandcuttinggaraikouh_rev2.pdf> [Consulta: 8 de marzo de 2018].
7. GARAŠIĆ, Ivica, KRALJ, Slobodan, KOŽUH, Zoran, PACAK, Miroslav. *Analysis of underwater repair technology on the jack-Up platform spud can*. [en línea]. <<https://pdfs.semanticscholar.org/3a2c/d6f43406277b7ee8ff504b4dcd0da1aa43e7.pdf>> [Consulta: 20 de enero de 2018].
8. GARCÍA MENDOZA, Fidencio Jesús. *Estudio del estado del arte sobre el proceso de soldadura manual por arco aplicado en ambientes marinos*. [en línea]. <<https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/66/1/Monograf%C3%ADa%20FIDENCIOJGM%2009-2010-0071.pdf>> [Consulta: 6 de febrero de 2018].
9. HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, A., RUIZ MONDRAGON, J. Jorge. *Efecto de la profundidad sobre la soldabilidad de aceros ferríticos en ambientes simulados unidos por soldadura húmeda*. [en línea]. <<http://www.scielo.br/pdf/si/v21n2/0104-9224-si-21-2-126.pdf>> [Consulta: 3 de febrero de 2018].
10. HORWITZ, Henry. *Soldadura. Aplicaciones y práctica*. México: Alfaomega, 1990. p. 786.

11. INDURA. *Lanzas Indurflame.* [en línea].
<http://www.indura.cl/content/storage/cl/producto/ID3740_file_424_lanzas%20t%C3%A9rmicas.pdf> [Consulta: 5 de julio de 2018].
12. JORQUERA CRUZ, Mauricio. *Guía técnica de epp: elementos de protección personal utilizados en labores de buceo.* [en línea].
<<http://www.ispch.cl/sites/default/files/D038-PR-500-02-001%20Guia%20EPP%20Buceo.pdf>> [Consulta: 12 de abril de 2018].
13. LAUFGANG, Sergio G. *Curso de inspectores de soldadura – IAS tratamiento térmico de soldadura.* [en línea].
<<http://www.hidrocapital.com.ve/intranet-2/images/stories/files/biblioteca/pdf/inspecci%C3%B2n%20de%20soldadura.pdf>> [Consulta: 10 de junio de 2018].
14. Lincoln Electric. *Soldadura bajo atmósfera inerte y electrodo de tungsteno (TIG).* [en línea].
<<https://www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura=20TIG.doc.pdf>> [Consulta: 10 de noviembre de 2017].
15. Lincoln Electric. *Soldeo manual con electrodos revestidos (Smaw).* [en línea].
<<https://www.solysol.com.es/data/documents/soldadura=20electrodo=20rec.doc.pdf>> [Consulta: 20 de febrero de 2018].

16. LÓPEZ, Fernando Macías, RAMÍREZ VIDAURRI, Luciano Eliezer, ACEVEDO DÁVILA, Jorge Leobardo, HDZ-GARCÍA, Héctor M., MEDINA, Juan M. *Corte y soldadura subacuática, Underwater cutting and wet welding.* [en línea]. <http://www.malevomedina.com.ar/images/malevo/manual_soldaduras_humedas.pdf> [Consulta: 3 de agosto de 2017].
17. OMAJENE, Joshua E, MARTIKAINEN, Jukka, KAH, Paul, PIRINEN, Markku. *Fundamental difficulties associated with underwater wet welding.* [en línea]. <<https://core.ac.uk/download/pdf/26876170.pdf>> [Consulta: 10 de febrero de 2018].
18. OSPINO MARTINEZ, Antonio Favio. *Soldadura por arco eléctrico SMAW.* [en línea]. <<https://adnervillarroel.files.wordpress.com/2010/07/soldadura-por-arco-electrico.pdf>> [Consulta: 19 de marzo de 2018].
19. RODERO GARCIA, Gorka. *Tratamiento térmico vs. vibración.* [en línea]. <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/13684/TFM%20Gorka%20Garcia%20Rodero%20Sept_2014.pdf?sequence=1> [Consulta: 10 de abril de 2018].
20. Soldexa. *Manual de soldadura y catálogo de productos.* [en línea]. <http://www.damasoldsac.com/descargas/manual_de_soldadura.pdf> [Consulta: 15 de febrero de 2018].

21. SYDENEY, Avner. *Introducción a la metalurgia física*. 2ª ed. México: McGraw-Hill, 1988. p. 559.
22. TAMBORERO DEL PINO, Jose Mª. *Ntp 494: soldadura eléctrica al arco: normas de seguridad*. [en línea]. <[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Fichas T-ecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_494.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Fichas_Tecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_494.pdf)> [Consulta: 30 de septiembre de 2017].
23. Xunta de Galicia. 3. *Proceso TIG*. [en línea]. <https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual2/pluginfile.php/14624/mod_folder/content/0/3.%20PROCESO%20TIG.pdf?forcedownload=1> [Consulta: 7 de junio de 2018].

