

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE EL PROCESO DE  
SOLDADURA MANUAL POR ARCO APLICADO EN AMBIENTES  
MARINOS”**

**POR**

**FIDENCIO JESUS GARCÍA MENDOZA**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA**

**SEPTIEMBRE 2010**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE EL PROCESO DE  
SOLDADURA MANUAL POR ARCO APLICADO EN AMBIENTES  
MARINOS”**

**POR**

**FIDENCIO JESÚS GARCÍA MENDOZA**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA**

**SEPTIEMBRE 2010**

# **Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**

## **Gerencia de Desarrollo Humano**

### **División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE EL PROCESO DE SOLDADURA MANUAL POR ARCO APLICADO EN AMBIENTES MARINOS”**, realizada por el alumno **FIDENCIO JESÚS GARCÍA MENDOZA**, con número de matrícula **09ES - 097** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

---

**Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila**  
Tutor Académico

---

**M.C. Mario Francisco Trejo**  
**Aguirre**  
Tutor en Planta

---

**M.C. Germán León Lara**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**M.C. Claudia Aracely González Rodríguez**  
Coordinador de Posgrado

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **FIDENCIO JESÚS GARCÍA MENDOZA**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE EL PROCESO DE SOLDADURA MANUAL POR ARCO APLICADO EN AMBIENTES MARINOS**”, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los [días] del [mes] del [año].

---

**Dr. Luciano Eliezer  
Ramírez Vidaurri**  
Presidente

---

**MC. Isidro Guzmán Flores**  
Secretario

---

**Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila**  
Vocal

## **Dedicatorias y agradecimientos**

Un agradecimiento al Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila por la oportunidad de realizar este proyecto, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales por el apoyo recibido, así como a mis padres y hermanas por su ayuda y comprensión.

# ÍNDICE

SÍNTESIS	1
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 OBJETIVO GENERAL	4
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.6 ALCANCE	4
1.7 BENEFICIOS DEL PROYECTO	5
<b>CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE</b>	<b>6</b>
2.1 MARCO TEÓRICO	6
2.2 TIPOS DE SOLDADURA SUBACUÁTICA	7
2.2.1 SOLDADURA SECA	8
2.2.2 SOLDADURA HÚMEDA	9
2.3 COMPONENTES BÁSICOS	9
2.4 PROCESOS DE SOLDADURA SUBMARINA SECA	18
2.4.1 GAS TUNGSTEN ARC WELDING	18
2.4.2 SOLDADURA MANUAL POR ARCO	19
2.5 PROCESOS DE SOLDADURA SUBMARINA HÚMEDA	19
2.5.1 SOLDADURA MANUAL POR ARCO	19
2.5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ELECTRODOS	21
2.5.3 TÉCNICAS DE SOLDADURA SUBMARINA	22
2.5.3.1 TÉCNICA DE AUTOCONSUMO O DE ARRASTRE	22
2.5.3.2 TÉCNICA DE MANIPULACIÓN O DE TEJIDO	25
2.5.4 POSICIONES DE SOLDADURA	26
2.5.5 VELOCIDAD DE AVANCE	27
2.5.6 ARCO ELÉCTRICO EN SOLDADURA HÚMEDA	27
2.5.7 FACTORES QUE DIFICULTAN LA APLICACIÓN	29

DEL PROCESO MMA	
2.5.8 DEFECTOS EN SOLDADURA SUBMARINA	30
2.5.9 RESISTENCIA DE LOS DEPÓSITOS EN FILETE DE SOLDADURA SUBMARINA	36
2.5.10 SOLDADURA DE FILETE CON POSICIONAMIENTO BAJO	37
2.5.11 SOLDADURA EN PLACAS DELGADAS	38
2.5.12 REPARACIÓN DE GRIETAS	39
2.5.13 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	40
2.5.14 POSICIONAMIENTO DE LA UNIÓN	41
2.5.15 PREPARACION PARA LA SOLDADURA	41
2.5.16 CONSIDERACIONES ESPECIALES EN LA APLICACIÓN DEL PROCESO MMA	44
2.6 NORMAS, ORGANISMOS REGULATORIOS Y MANUALES PARA SOLDADURA HÚMEDA	46
2.6.1 NORMAS Y ESTÁNDARES	46
2.6.2 NORMAS APLICADAS EN SOLDADURA HÚMEDA	47
2.6.3 MANUAL DE CORTE Y SOLDADURA SUBMARINA DESARROLLADO POR LA ARMADA DE ESTADOS UNIDOS	49
2.6.4 SOCIEDADES REGULATORIAS EN APLICACIÓN DE NORMAS A PROCESOS Y SISTEMAS DE SEGURIDAD EN ÁMBITO MARÍTIMO	50
<b>CAPITULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA</b>	51
4.1 ANÁLISIS DE TRABAJO	51
<b>CAPITULO IV CASOS DE ESTUDIO</b>	53
3.1 CASO 1. SOLDADURA HÚMEDA CON ELECTRODO GRADO AWS-E6013 A TRES PROFUNDIDADES FUERA DE POSICIÓN	53
3.2 DESARROLLO DE ELECTRODOS TUBULARES REVESTIDOS PARA SOLDADURA SUBMARINA	56
<b>CAPITULO V CONCLUSIONES</b>	59
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	61

LISTADO DE TABLAS	65
LISTADO DE FIGURAS	66
RESUMENA AUTOBIOGRÁFICO	68



## SÍNTESIS

Debido a la creciente demanda en el campo de soldadura aplicada en ambientes marinos en la región del Golfo de México, del Istmo y a la falta de instituciones de educación superior y centros de investigación que formen especialistas con el perfil en el tema en cuestión y que atiendan las necesidades y áreas de oportunidad de los sectores involucrados. La presente monografía se enfoca en el desarrollo del estado del arte del proceso de soldadura manual por arco aplicado en ambientes marinos.

Para lo cual se recopiló y analizó información técnico-científica de dicho proceso, analizando los diferentes tipos de variables que intervienen en su aplicación.

Los resultados a la fecha señalan que los procesos de soldadura en medios acuosos se enfocan en su mayor parte y en donde las condiciones lo permitan en el uso de soldadura manual por arco aplicada principalmente en reparación y mantenimiento de estructuras bajo el agua, teniendo un gran impacto en el diseño de nuevos electrodos que proporcionen las características adecuadas en los depósitos de soldadura, por otro lado existe una significativa inversión en el desarrollo de nuevos procesos para este tipo de aplicaciones que eviten la diversidad de defectos presentes en la soldadura, los cuales son inherentes al propio medio donde se realiza el trabajo.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad la mayoría de las empresas que se dedican a la producción de componentes metálicos emplean para llevar a cabo la unión de dichos materiales procesos de soldadura convencionales así como los no convencionales (láser, fricción, haz de electrones por mencionar algunos).

Los procesos en cuestión son considerados desde la etapa de construcción, hasta aquellas referentes a la reparación y mantenimiento de instalaciones o equipos. En las regiones costeras y en particular en el Golfo de México se localiza la industria más importante de los sectores naval y petroquímico del país. A pesar de la importancia y las necesidades de los diferentes sectores involucrados y áreas de desarrollo, no existen instituciones de enseñanza superior con capacidad de ofertar dicha preparación y los trabajos de investigación son aislados y escasos.

Por lo anterior, a continuación se desarrolla el tema del proceso de soldadura submarina aplicado en mayor medida en este tipo de industrias.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La necesidad de profesionistas con conocimientos en el tema de soldadura en ambientes marinos en la región del Golfo de México e Istmo en específico va en aumento. Aunado a lo anterior se carece de instituciones de educación superior y centros de investigación orientados a la preparación de profesionistas con este perfil, se incluye además la falta de investigación en el tema, por lo que la presente propuesta se enfoca en el fortalecimiento de las capacidades humanas en dichas áreas mediante el desarrollo del estudio del arte de los procesos en ambientes marinos.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Históricamente la región del Golfo de México, ha sido un polo de desarrollo económico, al ser una región con grandes recursos naturales, que ha permitido la explotación de energéticos, industria pesquera y naval. Estos sectores demandan la construcción de obras, supervisión y mantenimiento, así como infraestructura que permita la explotación de estos recursos, tales actividades requieren de personal especializado y entrenado. Sin embargo, en la actualidad los profesionales egresados de las diversas instituciones del país o centros de investigación no cuentan con un perfil de egreso en el tema de soldadura subacuática, lo que limita el crecimiento del sector de manufactura de componentes metálicos, como los trabajos de reparación, mantenimiento e inspección, generando una mayor dependencia tecnológica del extranjero.

Por lo anterior, la presente monografía tiene la finalidad, por una parte de determinar la situación que guarda el tema en México y sus tendencias, y por otro, el desarrollo del tema del proceso convencional mayormente utilizado.

## **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar el estado del arte que guarda el proceso de soldadura manual por arco aplicado en ambientes húmedos, así como la situación que guarde en México y las tendencias mundiales.

## **1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

-Presentar las variables y parámetros involucrados en el proceso de soldadura manual por arco aplicado en ambientes marinos.

-Investigar los tipos de materiales base y de aporte utilizados.

-Mediante la búsqueda de artículos, desarrollar un análisis que permita determinar que instituciones de educación e investigación nacional e internacional están involucradas en el mejoramiento y desarrollo del proceso de soldadura manual por arco aplicado en ambientes marinos.

## **1.6 ALCANCE**

Desarrollar un documento detallado referente al proceso de soldadura manual por arco así como las necesidades y tendencias que guarda la aplicación de dicho proceso en ambientes húmedos.

## **1.7 BENEFICIOS DEL PROYECTO**

-Desarrollo de un documento detallado acerca del proceso de soldadura manual por arco aplicado en ambientes marinos.

-Diagnóstico del tema, que permitan definir necesidades y áreas de oportunidad.

-Formación de recurso humano de posgrado en el tema de soldadura aplicada en ambientes marinos.

# CAPÍTULO II

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Marco teórico

Partiendo de la definición de soldadura como un proceso de unión de dos piezas derivado de la coalescencia de las mismas, en el cual las piezas son soldadas fundiendo ambas con o sin aplicación de un material de aporte, el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido que al enfriarse se convierte en una unión fija [1].

Dentro de la soldadura existen varios términos esenciales que permiten entender dicha disciplina, como:

- Material de aporte. Metal añadido durante la aplicación de la soldadura proporcionando a las uniones características específicas.
- Metal base. Metal del cual está constituida la pieza sobre la cual se deposita el material de aporte.
- Cordón de soldadura. Metal resultante de la fusión del material de aporte y la parte fundida del metal base.

-Zona afectada por el calor. Región del metal base que si bien no ha llegado a fundirse sufre un diferencial térmico debido al proceso de soldadura que puede hacer cambiar la microestructura y las propiedades mecánicas originales [1].

En cuanto a la soldadura subacuática se refiere, Humphrey Davey fue el primero en demostrar en 1802 el hecho de que un arco eléctrico puede ser mantenido bajo el agua. Aunque no fue hasta principios de 1930 cuando fueron realizados los primeros experimentos notables conducidos por los profesores Hibshman y Jensen de la Universidad de Lehigh. Estos experimentos fueron realizados en pequeños contenedores de vidrio, con el soldador colocado a un lado, y solamente con sus manos sumergidas unas cuantas pulgadas bajo el agua. Estos experimentos rápidamente mostraron la necesidad de utilizar corriente continua para producir soldaduras aceptables.

Durante años a los procesos de corte y soldadura se les reconocieron mucha utilidad para determinadas aplicaciones debajo del agua. Su campo de acción incluye operaciones tales como reflotamiento de buques, reparaciones, construcciones, reparación de muelles y barcos deteriorados, así como también las construcciones iniciales de las estructuras mencionadas. Por lo tanto, la soldadura subacuática resulta ser una técnica indispensable en el mantenimiento de cualquier estructura metálica que se encuentre bajo el agua [1].

## **2.2 Tipos de soldadura subacuática**

La soldadura subacuática se puede dividir en dos tipos.

- Soldadura seca
- Soldadura húmeda

## 2.2.1 Soldadura seca

Con este término se conoce a la aplicación de soldadura que es realizada dentro de un ambiente que permite que la superficie donde se realice la unión soldada se encuentre libre de humedad. Este tipo de soldadura puede ser realizada de varias formas:

**-Soldadura en hábitat seco**, realizada en un ambiente en una cámara en la cual es evacuada el agua, lo que le permite al buzo especialista encontrarse en un ambiente totalmente seco, implicando que el buzo soldador pueda trabajar sin el traje de buceo puesto. Para desalojar el agua de la cámara es inyectado gas a presión dentro del hábitat, en la figura 2.1 se muestra la cámara antes de ser sumergida en el agua.



Figura 2.1. Habitat para soldadura submarina seca [2].

**-Soldadura de cámara seca**, en esta aplicación el espacio en el que se encuentra el área a ser soldada se encuentra seca, el especialista coloca la cabeza y hombros dentro de la cámara para realizar la soldadura, en este caso el buzo mantiene su equipo de buceo completo.

**-Soldadura de punto seco**, para este proceso se desaloja el agua por medio de gas, adecuando un pequeño espacio donde el especialista soldador introduce el brazo para realizar la operación de soldadura [3].

**-Soldadura automatizada**, es realizada con dispositivos controlados de forma remota, los cuales se acoplan a la pieza a ser soldada, desalojando el agua de la superficie a unir y aplicando el depósito de soldadura sin la participación directa del personal. Esto en el caso de profundidades mayores



a los 400 metros donde la coordinación y funcionalidad del buzo se ven severamente deterioradas así como una considerable reducción en el desempeño debido a una acelerada fatiga [4].

### 2.2.2 Soldadura húmeda

Este tipo de proceso de soldadura se realiza en ambiente acuático, ya sea marino o bien en algún otro cuerpo de agua, en el cual la presión del agua actúa sobre el cuerpo del buzo soldador, y no existe una barrera física entre el arco eléctrico y el agua, este tipo de soldadura es la de mayor uso en aplicaciones submarinas por ser la mas versátil, sin embargo, es la que presenta mayores problemas para su aplicación y menor calidad [5].

## 2.3 Componentes básicos

### -Generadores de corriente eléctrica

Las fuentes de energía para soldadura subacuática son generadores de corriente continua o rectificadores de por lo menos, 300 amperes de capacidad. Sin embargo, para algunas operaciones pueden necesitarse más de 400 y hasta 600 amperes. Así mismo, es posible conectar dos o más máquinas en paralelo para obtener la potencia requerida, para esto se deben revisar las instrucciones de cada aparato, y así emplear el circuito correcto. Una imagen de una fuente de poder utilizada se presenta en la figura 2.2.



Figura 2.2. Fuente de poder (cortesía Universidad Federal de Minas Gerais).

En cuestión de estabilidad del arco de soldadura submarina, es más fácil lograr mantener el arco utilizando una fuente de poder de corriente continua, por otro lado se requeriría mayor habilidad por parte del operador cuando se utilice corriente alterna. Es necesario asegurarse de que la fuente de energía se encuentre en buen estado mecánico y eléctrico, protegiéndola de la intemperie y debe posarse sobre una superficie seca de madera o algún material aislante [1].

Así mismo, existen en el mercado actual sistemas de control de soldadura como el “Piranha (I)” [1], que son paneles de control compuestos por un interruptor de corriente de 400 A además de voltímetro, amperímetro y conectores estándar DIN para cables de soldadura. Un ejemplo de este tipo de equipo se muestra en la figura 2.3 [1].



Figura 2.3. Sistema de control de soldadura (cortesía Instituto Tecnológico de Boca del Río).

El uso de los paneles de control permiten un aislamiento adecuado de la corriente de soldadura para todas las operaciones submarinas, como también el monitoreo y grabación de los parámetros aplicados. Las unidades de control generalmente son en forma de maletines livianos y estables para máxima seguridad y fácil manipulación, como también pueden montarse en gabinetes de acero para estaciones de soldadura permanentes [5].

### **-Interruptores de seguridad**

En toda operación de soldadura subacuática siempre debe haber un interruptor positivo de desconexión operativa (figura 2.4). Esto protege al buzo, puesto que sólo permite el paso de corriente en el momento que esta

soldando o cuando tiene el electrodo posicionado y listo para aplicar la soldadura, permitiendo el cambio de electrodos usados por nuevos.

Dicho sistema de seguridad debe estar ubicado de tal manera que la persona a cargo del sistema de comunicación pueda operar el interruptor y controlar la operación en todo momento cuando el buzo se encuentre debajo de la superficie [5].

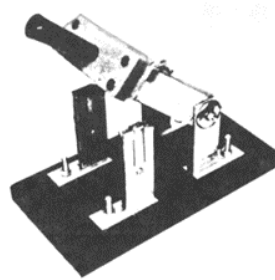


Figura 2.4. Interruptor de cuchillas [1].

### **-Cables eléctricos**

Se usarán exclusivamente cables completamente aislados, aprobados y extra-flexibles. Un cable debe ser capaz de soportar la máxima corriente requerida por el trabajo a realizar. Teniendo que el diámetro adecuado de un cable para una tarea determinada depende de la extensión del circuito.

Es recomendable el calibre 2 cuando el trabajo que debe hacerse se encuentra a una distancia considerable de la fuente de energía, ya que la caída de tensión es mayor. Ocasionalmente puede utilizarse un cable de calibre 3 para profundidades extremas. El cable de calibre 2 debe usarse cuando la extensión total del cable incluyendo el electrodo y conductores a tierra, excede los 300 pies (100 m). Si la extensión total supera los 400 pies (133 m), dos o mas cables de calibre 1 o 2 pueden ser puestos en paralelo para reducir la resistencia [1].

Para soldaduras bajo el agua puede conectarse al porta electrodo un cable a 10 pies (3 m) de calibre 1 (llamado látigo conductor) para hacer más manejable para el buzo este porta electrodos. Los cables deben ser formados en longitudes mínimas de 50 pies (15 m), complementados con conectores machos y hembras. Cada cable adicional y su conector causarán una caída de tensión.

Para compensar esto y mantener el amperaje requerido debe aumentarse la potencia de salida de la fuente de energía para soldar, elevando el voltaje del circuito abierto del generador de corriente continua o aumentando el amperaje si se usa un rectificador de corriente continua o transformador de corriente alternada. Además de ser un peligro potencial, un conector mal aislado bajo el agua origina un escape de corriente considerable y rápido deterioro del cable de cobre debido a la electrólisis. Se recomienda que todas las conexiones bajo el agua permanezcan recubiertas por una cinta aislante (Figura 2.5) [5].



Figura 2.5. Cables conductores de diversos diámetros (cortesía Instituto Tecnológico de Boca del Río).

Los cables y conexiones hechos con ellos deben ser inspeccionados antes de soldar y si existe algún deterioro en las aislaciones se repararán o, en su defecto, se reemplazarán. Los cables se deben mantener almacenados secos y libres de grasa y, si es posible, colgarlos sobre cubierta, enrollados correctamente, protegidos de chorreaduras de aceite, esto alargará la vida útil. Los cables a tierra deben estar conectados próximos al trabajo que debe realizarse y puestos de tal manera que el cuerpo del buzo nunca este entre el electrodo y la parte puesta a la tierra del circuito a soldar.

Hay dos opciones para los cables de soldadura, de cobre o aluminio en varios diámetros, acordes a los diferentes requerimientos. Las mangueras de soporte de gas son combinadas con los cables en una construcción trenzada con monofilamentos de polietileno. También pueden incluir cables de comunicaciones, video cámaras o de energía para algunas herramientas [5].

### **-Polaridad**

La soldadura bajo el agua, se realiza con polaridad directa cuando se utiliza corriente continua y cuando se emplea corriente continua con polaridad inversa, se producirá la electrólisis y causará el rápido deterioro de cualquiera de los componentes metálicos en el porta electrodo].

Es importante, entonces, utilizar la polaridad correcta. Cuando se usa corriente continua, la polaridad directa se obtiene conectando el borne negativo de la máquina de soldar a la antorcha o porta electrodo, y la terminal positivo a la abrazadera de conexión a tierra, la abrazadera de conexión a tierra deberá estar colocada en un área limpia en la pieza a trabajar, que proporcionará una buena conexión eléctrica [5].

### **-Electrodos**

Los electrodos recubiertos consisten de una varilla con un recubrimiento de fundente concéntrico. La composición química determina la naturaleza del electrodo. El tamaño del electrodo es una medida del diámetro de la varilla y dicho factor tiene un mayor efecto en el ancho del cordón de soldadura, la forma y velocidad de enfriamiento. Electrodo más grandes pueden causar excesiva fusión del metal base. El metal se transfiere desde el electrodo en forma de pequeñas gotas, ocasionalmente una gota grande se forma ocasionando corto circuito.

Los tres tipos principales de electrodos para soldadura húmeda son:

- Ferríticos
- Austeníticos
- Base níquel

Los electrodos ferríticos son generalmente usados para soldaduras de aceros con un carbono equivalente menor a 0.4 hasta profundidades de 100m. Ya que los metales de aporte de aceros inoxidables austeníticos y base níquel tienen mayor solubilidad de hidrógeno, haciéndolos menos susceptibles al agrietamiento asistido por hidrógeno, son utilizados en soldaduras de aceros con altos valores de carbono equivalente [6].

Estos se proveen en cajas o tubos sellados que impiden la penetración de la humedad y la disminución de su rendimiento. Una etiqueta en la caja identifica los electrodos, el material de que están constituidos y vienen acompañados de una guía general de uso y datos de seguridad. Se fabrican de diferentes tamaños: 1/8" (3,2mm) - 5/32" (4,0mm) - 3/16" (4,8mm) de diámetro por unos 356 milímetros de largo. Para acero inoxidable también se pueden adquirir electrodos de 3/32" (2,4mm) [1]. Una descripción de algunos electrodos comerciales se presenta en la tabla 2.1 y, en la tabla 2.2 se presentan los parámetros recomendados para diferentes electrodos [5].

Tabla 2.1. Electrodos para soldadura submarina [7].

Tamaño	Descripción
1/8" Andersen Easy	Acero al carbón (E7014)
1/8" BROCO sof-Touch	Acero al carbón (E7014)
1/8" BROCO SS	Acero inoxidable (E3XX)

Tabla 2.2. Amperajes recomendados para soldaduras húmedas a 50 m de Profundidad [7].

Electrodo		Posición de soldadura			
Tipo	Tamaño (pulg)	Horizontal	Vertical	Sobre cabeza	
		Amperaje (A)			Voltaje (V)
E7014	1/8	140-150	140-150	130-145	25-35
	5/32	170-200	170-200	170-190	26-36
	3/16	190-240	190-240	190-230	28-38
E3XX	1/8	130-140	135-140	125-135	22-30

Algunas de las especificaciones que provee el fabricante del electrodo de la tabla anterior son las siguientes:

-Calificación: cumple o excede los requerimientos de la ANSI/AWS D3.6 en todas las posiciones de filete y ranura. Los electrodos han sido probados

para reparaciones nucleares pasando pruebas de doblez y radiografía para ASME.

-Profundidad: calificaciones para soldaduras de filete en todas las posiciones a 110 m para soldaduras clase B según ANSI/AWS D3.6.

-Empacado de los electrodos.

-Aprobados por la armada de Estados Unidos: aceptados para la reparación de cascos de buques de acero alto carbono.

Algunos materiales de acero estructural que se utilizan para la fabricación de plataformas marinas fijas así como los materiales de aporte que se deben emplear se indican en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Clasificación de los aceros estructurales empleados en plataformas marinas fijas para la designación del electrodo y proceso de soldadura [8].

Grupo	Clase	Requisitos de la especificación del acero				Requisitos del metal de aporte		
		Especificación del acero <sup>5</sup>		Resistencia a la tensión		Proceso	Espec. AWS <sup>5</sup>	Clasificación del electrodo
				MPa	ksi			
I	C	ASTM A 36	≤ 19 mm (3/4 pulg)	400-550	58-80	SMAW	A5.1 <sup>1</sup>	E60XX, E70XX
							A5.5 <sup>2</sup>	E70XX-X
I	C	ASTM A 53	Grado B	414 mín.	60 mín.	SAW	A5.17 <sup>1</sup>	F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX
I	C	ASTM A 106	Grado B	414 mín.	60 mín.			
I	C	ASTM A 131	Grado A	400-490	58-71			
I	A	ASTM A 131	Grados CS, E	400-490	58-71			
I	B	ASTM A 131	Grado B, D	400-520	58-75		A5.23 <sup>2</sup>	F7XX-EXXX-XX

### Componentes que conforman el electrodo:

a) Revestimiento fundente.

El fundente cubre la barra de acero del electrodo y se compone de minerales, metales y materiales orgánicos. Tiene varias utilidades:

-Permitir el fácil encendido y conservación del arco.

-Formar y mantener una pantalla protectora alrededor del arco. El revestimiento debe consumirse más lentamente que el núcleo y debe hacerlo concéntricamente en la soldadura para permitir el re-encendido del arco si fuera necesario.

-Debe generar gases para formar la burbuja en donde se conserva el arco.

-Previene la formación de arco hacia los costados del electrodo cuando se trabaja en esquina [1].

El mejor recubrimiento de fundente en electrodos que ha sido encontrado es el rutílico del tipo ácido y oxidante. Electrodo bañados de rutilo y polvo de hierro proporcionan un arco más suave y un buen comportamiento de contacto de la soldadura, pero esto puede presentar un arco más elongado que arroje voltajes altos, bajos amperajes y puede extinguir el arco.

Algunas razones pueden ser consideradas para explicar por que los electrodos oxidantes prueban ser más adecuados para la soldadura submarina húmeda, entre otras:

-Primero, el metal de soldadura depositado tiene un contenido alto de inclusiones de óxido de hierro y estas inclusiones actúan atrayendo al hidrógeno y se cree que reducen el contenido de hidrógeno difusible.

-Segundo, todos los análisis de soldaduras muestran que los depósitos son virtualmente hierro puro, libre de todas trazas de adiciones comunes de aleación, resultando en un esfuerzo de cedencia mas bajo, que en turno reduce los niveles de contracción aplicados en la zona afectada por el calor así como el riesgo de agrietamiento [5].

La descomposición del agua durante la soldadura húmeda produce oxígeno e hidrógeno. El contenido de oxígeno en la soldadura aumenta rápidamente con el incremento en la profundidad en el agua. El oxígeno reacciona con los elementos de aleación del electrodo para formar óxidos. Por lo tanto, existe una pérdida de elementos de aleación, originalmente destinados a mejorar las propiedades mecánicas de las soldaduras húmedas. El contenido de magnesio y silicio en el metal de soldadura disminuye, al incrementar la profundidad en el agua o incrementar el contenido de oxígeno [9].

#### b) Revestimiento Impermeable.

Históricamente el uso de la soldadura subacuática ha sido restringido por el factor de ser una técnica utilizada en un ambiente desfavorable, lo cual no permite una completa confiabilidad de los depósitos de soldadura aplicados. El agua provoca que las reparaciones resulten frágiles y quebradizas.



El hidrógeno contenido por el agua reaccionaba químicamente con el material aportado lo que daba como resultado soldaduras quebradizas o que presentara fisuras horas o días después de realizadas, lo que limitaba la longevidad de la reparación. Así mismo el agua por su temperatura y densidad enfría rápidamente la pieza, causando microestructuras debilitadas que tornaban la soldadura muy rígida, además, los revestimientos fundentes se deterioran al sumergirse en el agua y el agua es absorbida en el fundente, el agua que penetra en los intersticios se convierte en vapor y quita por presión el revestimiento cuando se forma el arco. Por lo tanto, se hace imprescindible colocar un revestimiento impermeable de un grosor adecuado, que mantenga la integridad de los electrodos sumergidos. Los electrodos desarrollados actualmente, son provistos de un revestimiento impermeable que reduce notablemente los efectos del agua sobre el material soldado y aumenta y mejora las reacciones químicas con el metal base, facilitando la limpieza de la escoria resultante del proceso. El revestimiento también provee un mayor aislamiento térmico [5].

### **-Antorchas y portaelectrodos**

Siempre deben usarse antorchas y portaelectrodos específicamente diseñados para aplicaciones bajo el agua como el que se muestra en la figura 2.6. Antes de comenzar las operaciones submarinas se debe revisar las antorchas y portaelectrodos, por si se presentaran partes desgastadas, dañadas o una aislación deficiente. Las partes deterioradas pueden hacer peligrar la vida del buzo, y deben repararse o reemplazarse [5].



Figura 2.6. Porta electrodo para soldadura submarina (cortesía Instituto Tecnológico Boca del Río).

### **-Cristal protector oscuro**

En todas las operaciones de soldadura deben usarse lentes protectores de color verde oscuro. Estos protectores se agrupan en la normativa DIN y, cuanto mayor sea la intensidad del arco pueden ser de DIN 6 hasta el 15. Los vidrios protectores pueden fijarse a los cascos y máscaras de buceo comercial mediante diferentes mecanismos, diferenciados según la marca que los fabrique como se muestra en la figura 2.7 [5].



Figura 2.7. Cascos de buceo (cortesía Instituto Tecnológico Boca del Río).

## **2.4 Procesos de soldadura submarina seca**

Los procesos de soldadura seca generalmente utilizados son el proceso GTAW (soldadura de tungsteno a gas inerte) y MMA (soldadura manual por arco) [5].

### **2.4.1 Gas Tungsten Arc Welding**

El proceso de soldadura GTAW es utilizado, normalmente, como una técnica para realizar el pase de raíz para posteriormente realizar los pases de relleno subsecuente por el proceso MMA o FCAW. El proceso GTAW es también el método usado mediante el uso de robots totalmente mecanizados para soldaduras de órbita hiperbárica.

En este proceso, un arco eléctrico es mantenido entre un electrodo de tungsteno no consumible y el baño de metal fundido. Se agrega por

separado una varilla de alambre. El electrodo, arco y baño de fusión son protegidos por un chorro de gases inertes, normalmente argón o una mezcla de argón – helio.

El voltaje del arco se incrementa conforme aumenta la presión, la presión también afecta la penetración de la soldadura y la forma del arco, otra característica es que el GTAW es un proceso protegido por un gas inerte y en consecuencia, no existen cambios significativos en la composición química del metal fundido al incrementarse la presión [10].

## **2.4.2 Soldadura manual por arco**

El proceso de soldadura manual por arco (MMA) por sus siglas en inglés es utilizado básicamente para soldaduras hiperbáricas en aguas de moderada profundidad. El material de soldadura es depositado a través de un electrodo de acero recubierto del tipo básico (electrodo de bajo hidrógeno). Este recubrimiento contiene aproximadamente 30% de carbonato de calcio. Un arco eléctrico es mantenido entre el electrodo y la pieza de trabajo. Durante la soldadura el recubrimiento se descompone hasta formar gases CO, CO<sub>2</sub> y escoria de óxido de calcio que cubre el metal fundido.

Las condiciones se van poniendo menos favorables con el incremento de la profundidad y es por eso que los procesos de soldadura y los soldadores son calificados en profundidades simuladas [10].

## **2.5 Procesos de soldadura submarina húmeda**

### **2.5.1 Soldadura manual por arco**

La soldadura submarina húmeda se realiza en contacto directo con el agua, se produce por el calor de un arco eléctrico entre un electrodo metálico especial para aplicaciones submarinas y la propia pieza de trabajo. En el centro del arco un intenso calor hace que gas plasma ionizado

conduzca electricidad entre el electrodo y el material base, causando una reacción química entre los componentes del revestimiento fundente, el metal base y el ambiente acuático. Esa reacción produce desprendimiento de gases, lo que genera un ambiente gaseoso que sostiene el arco y protege la soldadura fusionada de la contaminación de la atmósfera ambiental.

El procedimiento básico utilizado para soldar mediante el proceso de MMA se describe a continuación:

Conectar los cables adecuadamente a la fuente de energía según la polaridad a utilizar, montado el interruptor de seguridad entre la pinza y la fuente, colocar un electrodo nuevo en la pinza porta electrodos y raspar suavemente la punta del mismo sobre una superficie abrasiva para remover la capa impermeable y garantizar un correcto contacto eléctrico, cuidadosamente colocar el electrodo sobre la pieza a soldar y llamar al encargado del sistema de comunicación para que conecte la corriente, formándose de esta manera el arco. Cuando se consume todo el electrodo, se solicita que se corte la corriente, reemplazar el electrodo por uno nuevo y conectar la corriente nuevamente, el electrodo deberá comenzar a soldar satisfactoriamente [9]. En la figura 2.8 se ejemplifica el proceso MMA.

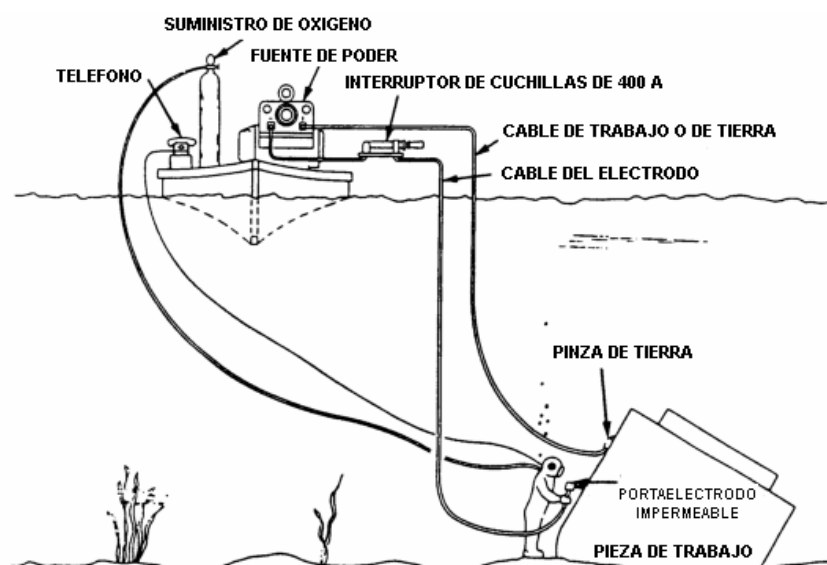


Figura 2.8. Componentes del proceso de soldadura MMA [11].

La energía térmica, necesaria para producir la fusión, proviene de un arco eléctrico que se produce entre la pieza a soldar y el electrodo, la energía eléctrica necesaria para producir ese arco se obtiene de una fuente de corriente eléctrica.

En la soldadura subacuática, se requiere la aplicación de corrientes más elevadas en comparación con las empleadas en soldaduras realizadas en la superficie, esto combinado con la conductividad eléctrica del agua requiere la observación estricta de toda clase de precauciones de seguridad para evitar cualquier accidente [12].

### **2.5.2 Clasificación de los electrodos**

En México una de las clasificaciones empleadas para electrodos está dada por la Sociedad Americana de soldadura (AWS por sus siglas en inglés). Esta clasificación se realiza mediante la letra "E" seguida de cuatro o más números, y en algunos casos estos números van seguidos de letras tales como A, B, C, etc. a las que pueden seguir números como 1, 2, etc. Los dos primeros números, multiplicados por 1000 dan la resistencia a la tracción en libras por pulgada cuadrada que debe tener el material depositado.

El grupo de las dos últimas cifras tomadas en su conjunto, nos indican el tipo de revestimiento: 10 y 11: celulósicos, 12 y 13: rutilicos, 14 y 24: rutilicos de contacto, 15, 16 y 18: básicos, y 28: básicos de contacto. La antepenúltima cifra tomada sola indica la posición para la cual el electrodo es apto. Si esa cifra es 1 indica toda posición, si es 2 o más la posición es horizontal o plana únicamente. La última cifra indica el tipo de corriente, 0 ó 5 significa que debe soldarse sólo con corriente continua (polaridad positiva). Todos los demás significan que son aptos para ambas corrientes, continuas o alternas.

Las letras y números que pudieran presentarse en los últimos lugares indican que los electrodos tienen elementos aleados en el revestimiento, los cuales se depositarán en el cordón soldado. En soldaduras submarinas los

electrodos mas comúnmente usados son los AWS E7014 y E7018 para acero y AWS E312-16 para aceros inoxidable [13].

### **2.5.3 Técnicas de soldadura submarina.**

Las técnicas más extensamente usadas a nivel mundial para soldadura submarina son 2, las cuales se describen a continuación siendo aplicadas en gran medida en soldaduras de filete, que son utilizadas especialmente para trabajos submarinos, ya que provee una ranura natural para guiar a los electrodos en el caso de aplicaciones de reparación o fabricación mediante el proceso MMA, por lo cual nos centraremos únicamente en este tipo de soldaduras [5].

#### **2.5.3.1 Técnica de autoconsumo o de arrastre.**

Para soldadura bajo agua se emplea la técnica conocida como de auto consumo. Esto implica depositar el metal de aporte en una serie de cordones. Estos cordones en forma de filete resultan en soldaduras que tiene aproximadamente el mismo cateto que el diámetro del electrodo usado. De este modo una sola pasada con un electrodo de 3/16" (4,76mm), da por resultado un filete de aproximadamente esa medida [1].

En la figura 2.9 se ilustran las etapas de la técnica de autoconsumo, mismo que consiste en:

- A) Posicionar el electrodo a un ángulo de aproximadamente  $30^\circ$  con la punta del electrodo y la línea de soldadura en contacto con la pieza de trabajo.
- B) Llamar al encargado del sistema de comunicación en la superficie (tender) para que conecte la corriente e iniciar el arco.
- C) Aplicar suficiente presión en la dirección de la flecha para permitir al electrodo consumirse.

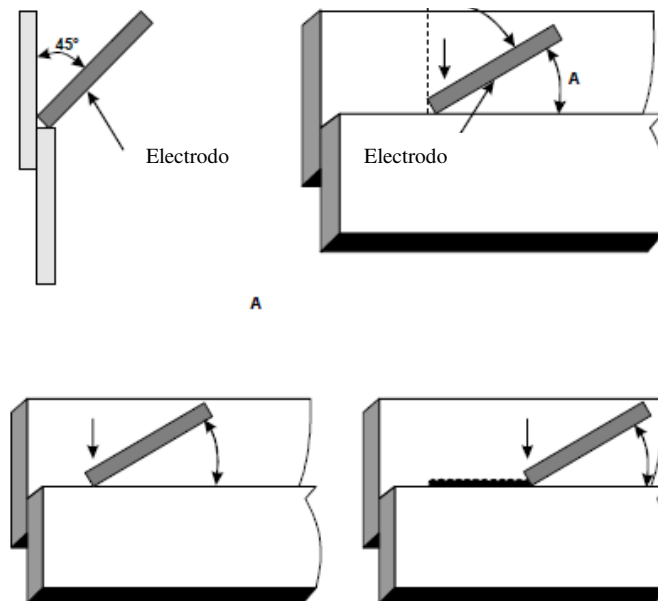


Figura 2.9. Técnica de autoconsumo para soldadura MMA [7].

Mediante esta técnica se mantiene un contacto constante entre la cubierta del electrodo y la pieza, lo que permite la fabricación de juntas fuertes soldadas. A modo de ensayo y con los medios facilitados por la U.S. NAVY, se han realizado soldaduras submarinas con filete en una plancha de acero dulce mediante la técnica de arrastre, desarrollando consistentemente más del 80% de la resistencia a la tensión y 50% de la ductilidad, lo anterior es causado por el endurecimiento que resulta de la fuerte acción enfriadora de las aguas circundantes [7].

A continuación se describe el procedimiento para la aplicación de la técnica de soldadura de arrastre bajo el agua:

- a) Limpiar totalmente las superficies a soldar.
- b) Asegurarse de que el interruptor de seguridad este abierto.
- c) Ajustar el generador de soldar con la corriente adecuada para el electrodo que se va a emplear (Ver tabla 2.4).

Esta corriente es más alta que la corriente sobre la superficie para el mismo electrodo ya que las aguas circundantes absorben el calor rápidamente.

Tabla 2.4. Ajuste de corriente para soldaduras bajo el agua [7].

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

d) Ubicar el extremo del electrodo que forma el arco contra la pieza, de manera que el electrodo forme un ángulo de aproximadamente 30° con la línea de soldadura. El ángulo puede variar de 15 a 40°, dependiendo del tipo de electrodo empleado y las preferencias personales del buzo [1].

e) Pedir que se conecte la corriente, el arco debe formarse cuando el tender cierra el interruptor de seguridad. Si no se formara el arco, se debe golpear ligeramente o raspar el extremo del electrodo contra el trabajo hasta que se forme. Una vez iniciado hacer la suficiente presión contra la pieza de trabajo para permitir que el electrodo se consuma. Mantener el ángulo original entre el electrodo y la línea de soldadura moviendo la mano perpendicularmente hacia la superficie que se esta soldando. No hay que conservar un arco como en la soldadura sobre la superficie, simplemente, mantener el ángulo conservando el electrodo en contacto con la pieza. Mover los cordones derechos, no entrecruzarlos. Este método es una ventaja definida, especialmente, donde la poca visibilidad haría difícil conservar un arco en la forma usual sobre cubierta [7].

f) Cuando se consuma el electrodo pedir que se desconecte la corriente; el tender abrirá el interruptor de seguridad y lo mantendrá abierto mientras el buzo cambia los electrodos. Mantener el electrodo posicionado después de completar la soldadura hasta que reciba la verificación del tender, de que la corriente está desconectada.

g) Antes de comenzar a depositar un nuevo electrodo, se debe limpiar el extremo del depósito de soldadura anterior. El depósito del nuevo electrodo,



debe sobreponerse levemente al depósito previo. Si se va a agregar una segunda pasada, debe limpiarse completamente todo depósito previo de la soldadura de metal.

h) No se debe pedir que conecten la corriente hasta que el nuevo electrodo esté posicionado contra la pieza de trabajo y listo para soldar. En general conviene soldar de modo tal, que las burbujas generadas interfieran lo menos posible en la visibilidad. Por ejemplo, generalmente es mejor para el buzo soldar en posición debajo de sí mismo.

La técnica de autoconsumo es recomendada para buzos soldadores con habilidades promedio o menores que tienen poco tiempo para practicar. Naturalmente esta técnica no produce soldaduras tan fuertes como aquellas llevadas a cabo por un buzo soldador con suficiente habilidad utilizando la técnica de manipulación. Sin embargo, para propósitos de reparación la técnica de autoconsumo se considera aceptable (Figura 2.10) [7].

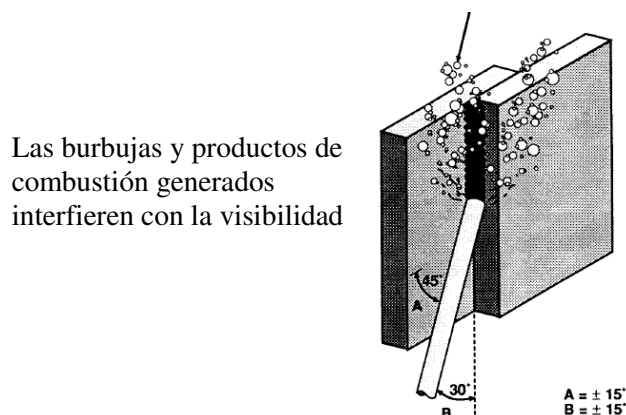


Figura 2.10. Técnica de autoconsumo en soldadura MMA, para soldadura de filetes en posición vertical [7].

### 2.5.3.2 Técnica de manipulación o de tejido.

Esta técnica es menos empleada y requiere un gran adiestramiento del buzo. Requiere que el soldador mantenga un arco constante bajo el agua, de igual forma que lo haría en la superficie, mientras manipula el electrodo. Muy poca, o casi ninguna, presión es ejercida sobre el electrodo, mientras es trasladado de un lado a otro por el buzo. El largo del arco bajo el agua es

menor que si fuera una soldadura sobre superficie. Mientras en superficie el arco voltaico es de 1 a 1.5 veces el diámetro del electrodo, bajo el agua éste es igual a la mitad del diámetro del electrodo. La velocidad ideal de avance del electrodo es de 5 a 7 pulg/min (12.7 a 17.8 cm/min) [1].

Para usar esta técnica, se deben determinar el amperaje correcto y el tipo de electrodo a utilizar, esto realizando una prueba sobre una placa de metal, bajo condiciones húmedas de trabajo. La correcta posición del electrodo y la velocidad de avance deberán ser determinadas antes de comenzar la soldadura.

Los amperajes por diámetro de electrodo serán los mismos a utilizar para la técnica de autoconsumo, pero deben ajustarse ligeramente. La corriente apropiada puede identificarse observando las mismas características para soldadura en superficie [9].

#### **2.5.4 Posiciones de soldadura**

a) Posición vertical: Se utiliza la misma técnica de autoconsumo, salvo que las soldaduras con filetes verticales deben hacerse en posición vertical descendente.

b) Posición sobre cabeza. Se utiliza la técnica de arrastre, excepto que el rango de corriente para soldar sobre cabeza sea muy estrecho. Los depósitos de soldaduras que usan corriente fuera de este rango, resultarán ser muy pobres o nulos en absoluto. Los buzos hábiles pueden usar un ángulo de  $35^\circ$  a  $55^\circ$  del electrodo respecto al trabajo de posición para arriba. Esto requiere considerable habilidad, pero producirá soldaduras con filete sin la convexidad y socavación que se obtiene cuando se usa la técnica de autoconsumo. Si el operador no tiene esta habilidad se recomienda la técnica de autoconsumo [14].

El ángulo del electrodo juega un papel muy importante en la morfología del depósito de soldadura. Aparte del efecto típico de manipulación del charco de soldadura, el ángulo del electrodo tiene dos efectos adicionales mayores,

en la dirección de las fuerzas afectando el arco eléctrico y la forma de la burbuja de vapor. Ha sido observado que a mayores ángulos entre la placa y el electrodo causa una penetración mas profunda debido a una vertical mayor del componente que horizontal. El ángulo del electrodo también afecta la forma de la burbuja, dando mayor protección al charco de soldadura cuando el ángulo es pequeño [15].

### **2.5.5 Velocidad de avance**

La velocidad de avance es una función tanto del electrodo y la configuración de los parámetros. Forzar al electrodo a ir más rápido resultará generalmente una soldadura irregular, con un depósito estrecho y de poca penetración. En el caso de la soldadura submarina es requerida una velocidad de avance más lenta. Pero, se debe tomar en cuenta que el tamaño del cordón será determinado por el tamaño del electrodo utilizado, y la velocidad de avance es por si misma, establecida libremente cuando el buzo soldador aprende a dominar la técnica de aplicación.

En general cuanto menor sea el ángulo, mayor será el cordón de soldadura y la penetración menos profunda.

La velocidad de avance dependerá de:

- La habilidad del soldador
- Tamaño del electrodo
- La corriente
- El tamaño de cordón requerido [9].

### **2.5.6 Arco eléctrico en soldadura submarina**

El arco de soldadura no se comporta de la misma manera como lo hace el arco generado en la superficie, y la actividad de la burbuja de gas es particularmente importante para completar con éxito la soldadura submarina. Cuando el arco es generado, la combustión del electrodo y la disociación del agua crean una burbuja envolvente como se muestra en la figura 2.11.

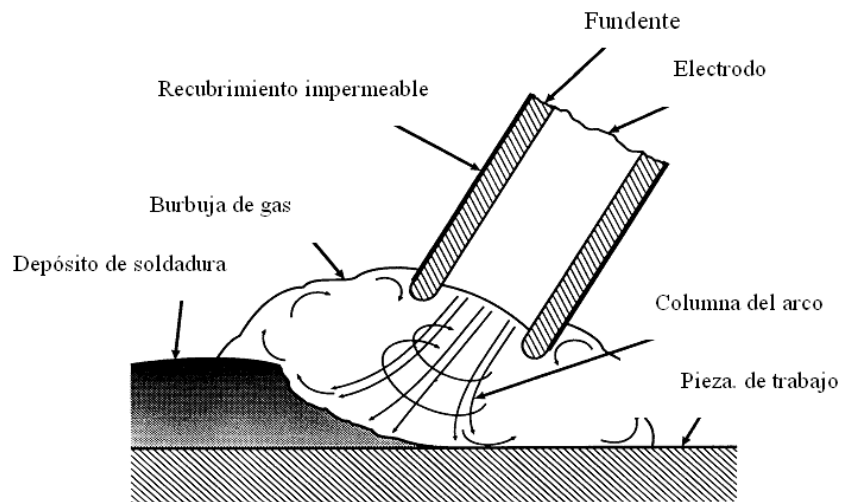


Figura 2.11. Arco eléctrico de soldadura submarina [11].

A medida que la presión dentro de la burbuja aumenta, es forzada a dejar el arco hacia los alrededores mientras que otra burbuja formada toma su lugar. Entonces a medida que la presión se vuelve mayor a la fuerza de capilaridad, la burbuja se rompe. Por lo tanto si el electrodo se encuentra muy alejado de la pieza de trabajo, la soldadura será destruida conforme las burbujas explotan a través de ésta. Si la velocidad de avance es muy lenta la burbuja colapsará alrededor de la soldadura evitando la posibilidad de producir una soldadura efectiva. En general, el voltaje en soldadura submarina necesita ser más alto para iniciar el arco, del requerido para mantener el propio arco. El amperaje aumenta conforme baja el voltaje, después de haber iniciado el arco y que la caída de voltaje depende de la resistencia eléctrica de la longitud de arco, la composición química alrededor del arco, la fuerza del campo eléctrico en el arco submarino se incrementa con el aumento de la corriente. La corriente de arco disminuye con el incremento de la profundidad en el agua, y por lo tanto el voltaje aumenta en orden de mantener la misma cantidad de corriente [11].

Debido a las altas velocidades de enfriamiento, mayor calor se disipa hacia el agua circundante y es necesario mayor calor de entrada. Por lo tanto, es requerido mayor voltaje [11].

El alto contenido de hidrógeno en la zona del arco incrementa la resistencia eléctrica. Por lo tanto, es requerido mayor voltaje.

Las máquinas de soldadura tienen una relación específica entre la corriente y voltaje, siendo la corriente la única variable independiente. También es cierto que en agua salada el arco de soldadura se vuelve más estable debido a los iones que sirven como conductores.

La polaridad de la corriente puede ser el mayor factor en el control de la apariencia del cordón y la penetración. El tamaño de la burbuja generada del arco durante la soldadura submarina esta directamente influenciada por el calor de salida del arco. Calores de entrada más altos son usualmente requeridos para generar burbujas más grandes y menos frecuencia de salida de burbujas para proteger el arco desde el agua del ambiente.

El calor que fluye fuera de la zona de soldadura determina tanto el tiempo al que la región permanece a su máxima temperatura y la velocidad de enfriamiento desde esta temperatura. Ambas características son críticas en la determinación de la microestructura final de la soldadura. En la actualidad se ha estudiado con tal profundidad el comportamiento del plasma en arco eléctrico que no existe duda alguna de la vigencia de las leyes de la termodinámica en describir, con alto grado de certeza, las reacciones que ocurren en las condiciones del arco eléctrico [16].

### **2.5.7 Factores que dificultan la aplicación del proceso MMA**

Antes de que las operaciones de soldadura sean comenzadas, el área de trabajo debe ser inspeccionado para determinar si la soldadura puede o no realizarse de manera efectiva en el sitio.

Los siguientes factores pueden dificultar la soldadura submarina:

- a) Equipamiento de buceo.
- b) Lugares que no pueden ofrecer una plataforma estable de la cual soldar, por ejemplo al trabajar cerca de la superficie en aguas turbulentas vuelve difícil la labor de generar una plataforma estable. Cuando se trabaja desde una estación es preferible fijar la estación al objeto a ser soldado en vez de

al barco de salvamento, lancha o bote debido al cambio de posición constante debido al oleaje agresivo.

c) Corrientes adversas.

d) Bajas temperaturas.

e) Donde el espesor del metal es menor a 0.20”.

f) Donde el ajuste es pobre. Un espacio de 1/8” debe ser considerado el máximo permisible para una soldadura húmeda de calidad utilizando la técnica de autoconsumo con electrodos de 1/8”.

g) Mayores profundidades, debido al incremento en la presión hidrostática.

h) Donde la visibilidad es extremadamente baja, y el buzo no tiene una ranura la cual seguir [17].

### **2.5.8 Defectos en soldadura submarina**

Algunos defectos encontrados en soldadura submarina son también comúnmente encontrados en soldaduras en la superficie, tal como fragilización por golpe de arco, falta de penetración, falta de homogeneidad en el depósito de soldadura, porosidad, inclusiones de escoria y agrietamiento en frío y en caliente [17].

Los defectos en soldadura son de tres clases generales:

-Dimensionales.

-Discontinuidades estructurales.

-Propiedades inherentes al proceso.

Además existen dos factores básicos que incrementan los problemas con la aparición de defectos, los cuales son el enfriamiento rápido y la presencia de hidrógeno [17].

#### **-Esfuerzos dimensionales**

Los esfuerzos residuales de alta magnitud pueden derivar de la expansión térmica, contracción y permanecer en la estructura después de

que esta se enfría, estos esfuerzos causan distorsión. Hablando ampliamente de esfuerzos térmicos pueden resultar en materiales soldados debido a temperaturas de distribución no uniformes.

Las turbulencias de un arco de soldadura submarina necesitan estabilizarse y formar gases químicos para estabilizar y proteger el arco durante la soldadura.

El perfil de una soldadura terminada puede tener un efecto considerable sobre su desempeño al soportar cargas. Este perfil es afectado por la viscosidad y fluidez de la escoria formada durante la soldadura. Un refuerzo excesivo que es normalmente indeseable, tiende a tensar la sección y establecer concentradores de esfuerzo [1].

### **-Discontinuidades estructurales**

El rápido efecto del agua puede prevenir el escape de gases formados por reacciones químicas durante la soldadura en el propio charco, las porosidades son frecuentemente encontradas en soldadura submarina, siendo la razón mas frecuente para la porosidad la presencia de herrumbre, suciedad, aceite, pintura o cualquier otro gas que produzca concentración. Debe realizarse limpieza a través de la superficie antes de realizar la soldadura submarina. El fundente del electrodo puede absorber humedad mientras se suelda en el agua. Además debe haber suficiente cantidad de fundente para proteger el metal fundido del agua. Así que a menudo son utilizados electrodos con recubrimiento contra el agua más gruesos. En conjunto si la porosidad en soldaduras húmedas es causada por el hidrógeno, y dicho elemento presente en el metal de soldadura es afectado por la basicidad de la escoria, es de esperarse que la basicidad de la escoria afecte directamente la cantidad de porosidad en soldaduras húmedas [16].

Debido a la rápida solidificación, o baja temperatura durante la soldadura, podría provocar que la escoria no se elevara a la superficie.

Cuando la escoria es atrapada en la línea de fusión, el agrietamiento por recalentamiento (agrietamiento en caliente) se vuelve un problema. Por otro

lado, el agrietamiento en frío es muy alto en soldadura submarina debido al alto contenido de hidrógeno absorbido, además el enfriamiento demasiado rápido incrementa severamente la dureza de la zona soldada y dificulta el escape del hidrógeno, de esta manera el agrietamiento en frío es muy severo en soldaduras de aceros de alta resistencia [18].

Obviamente la generación de escoria del metal fundido puede ser acelerada por muchos factores que tienden a hacer al metal más viscoso o retardar su solidificación por efecto del precalentamiento, alto calor de entrada, baja velocidad de soldadura. La fusión incompleta puede ser causada al fallar en el alcance de la temperatura de fusión del metal base. El atrapamiento de escoria, poros subsuperficiales o preparación inadecuada de la unión pudieran causar penetración incompleta.

Si la porción del metal base mas cercana al electrodo, esta a una considerable distancia de la raíz, la conducción de calor puede ser insuficiente para obtener la fusión de la raíz. Las zonas sin fundir de la raíz permiten la concentración de esfuerzos que pudieran fallar sin apreciable deformación. Los esfuerzos de contracción y la consecuente distorsión de las partes durante la soldadura causarán una grieta iniciada en la zona sin fundir.

El socavado ocurre cuando el proceso de solidificación toma lugar muy rápidamente para permitir al charco de soldadura retroceder completamente hacia el pie de la región del charco fundida [18].

### **-Dificultades inherentes al ambiente donde se realiza el proceso de soldadura**

Debido a que el charco de soldadura induce a una atmósfera de arco que es alta en contenido de vapor de agua y oxígeno e hidrógeno disociado. Se conoce que los factores del hidrógeno pueden ser críticos. El hidrogeno no inducirá al agrietamiento a menos que la región haya sido endurecida y contenga esfuerzos residuales. El hidrógeno es aumentado durante el calentamiento y se disuelve en la austenita. A medida que la temperatura se enfría, el hidrógeno intenta difundir fuera del metal de soldadura y la zona



afectada por el calor. El hidrógeno que escapa de solución, puede formar porosidad alargada, el cual incrementa conforme se incrementa la presión o profundidad en el agua [19].

El hidrógeno que ha saturado el metal puede resultar en agrietamiento por alguno de los siguientes mecanismos.

- 1.- El hidrógeno difunde a áreas de concentración de esfuerzos, como áreas de estructura martensítica.
- 2.- Las áreas con esfuerzos ocasionan la iniciación de una grieta después de la introducción de hidrógeno, entonces la grieta puede propagar.
- 3.- La grieta puede crecer por etapas.

### Agrietamiento por hidrógeno

La soldadura húmeda produce un rápido calentamiento y enfriamiento en la zona afectada por el calor. En el acero esto causa endurecimiento en esta zona. El proceso de soldadura húmeda permite altos niveles de hidrógeno en el arco, y por lo tanto en el charco de soldadura. El contenido de hidrógeno difusible disminuye con el incremento en el calor de entrada, una posible explicación es una perturbación electroquímica en el arco de soldadura [20].

Cuando la soldadura se enfría, la combinación de:

- Una zona endurecida.
- Hidrógeno en la zona afectada por el calor.
- Esfuerzos residuales.

Pueden causar agrietamiento y presentarse bajo la superficie de la unión necesitando pruebas no destructivas para su detección.

Aunque el agrietamiento inducido por hidrógeno usualmente ocurre en la zona afectada por el calor del metal base, también es conocido que ocurra en el metal de soldadura.

El riesgo de agrietamiento por hidrógeno depende en gran medida de la composición del material, debido a que esto determina el tipo de estructura formada en la zona afectada por el calor. Materiales con alto contenido de

carbono son más propensos al agrietamiento por hidrógeno debido a la susceptibilidad de endurecimiento en la zona afectada por el calor.

La velocidad de enfriamiento es también importante, a mayores velocidades de enfriamiento se producen zonas afectadas por el calor que son más propensas al agrietamiento que una zona afectada por el calor con microestructuras más suaves, que son producidas por una velocidad de enfriamiento más lenta o controlada. La mayor parte del calor de la soldadura enfriada es extraído por el agua de los alrededores [20].

### **-Desgarre laminar**

El desgarre laminar es un tipo de agrietamiento que ocurre en el metal base cerca de la soldadura. Este ocurre cuando inclusiones no metálicas en la placa de acero crean un perfil debilitado que se agrieta durante la contracción de una soldadura enfriada en la superficie de la placa. Las inclusiones microscópicas son rodadas en formas planas durante el rodado en caliente de la placa por el fabricante.

Desde que estas formas aplanadas se presentan paralelas a la superficie de la placa ellas solamente causan un perfil debilitado si las contracciones de la soldadura actúan en la dirección del espesor de la placa. Por lo que el tipo de unión usualmente afectado es una unión de filete en T.

La característica en zig-zag de la grieta vista en la sección transversal resulta de la tendencia de la grieta de seguir las inclusiones aplanadas que están en diferentes niveles.

En la mayoría de las circunstancias la contracción de una junta soldada en T ocurre sin desgarramiento laminar como parte del movimiento de la junta o distorsión para aliviar los esfuerzos de contracción. Si por otro lado, las partes son fuertemente contraídas, altos esfuerzos direccionales se desarrollarán a través de la placa de la junta en T y el desgarramiento laminar puede ocurrir si existe una acumulación de inclusiones cerca de la línea de fusión de la soldadura [1].

## **-Defectos en la técnica**

Los defectos enlistados a continuación son generalmente aquellos asociados con fallas técnicas o mano de obra mal aplicada.

### Socavado

#### Causa:

- Arco demasiado largo
- Acceso restringido a la preparación de la unión
- Ángulo incorrecto del electrodo

#### Prevención

- Mantener un arco mas corto.
- Utilizar electrodos más pequeños.
- Corregir el ángulo entre 30 y 45°.

### Falta de fusión

#### Causa

- Ángulo de electrodo incorrecto.
- Velocidad de avance incorrecta.
- Baja corriente

#### Prevención

- Corregir el ángulo entre 30 y 45°
- Si la velocidad de avance es demasiado rápida no permite la adecuada de fusión.
- Incrementar la corriente con precaución.

### Inclusiones de escoria

#### Causa

- Falta de cuidado en la limpieza
- Soldaduras convexas o irregulares
- Falta de penetración con escoria atrapada bajo la soldadura

#### Prevención

- Cuidado extra al realizar la limpieza
- Ajustar las condiciones de soldadura para obtener depósitos de soldadura más regulares.

- Utilizar electrodos más pequeños o incrementar el amperaje.

#### Penetración incompleta

##### Causa

- Corriente demasiado baja
- Diámetro de electrodo demasiado grande
- Ángulo de electrodo incorrecto

##### Prevención

- Incrementar la corriente con precaución.
- Usar electrodos más pequeños
- Corregir el ángulo entre 30 y 45°

#### Perfil de soldadura incorrecto

##### Causa

- Excesiva concavidad en la soldadura
- Longitud de piernas desigual
- Filete de soldadura cóncavo

##### Prevención

- Mejorar la ejecución de la aplicación
- Ajustar la ejecución de aplicación del depósito
- Reducir velocidad, reducir amperaje

Aunado a todo esto, las soldaduras húmedas presentan propiedades mecánicas inferiores comparadas con soldaduras realizadas en la superficie debido a las reacciones químicas del oxígeno, hidrógeno y carbono con los elementos de aleación más importantes en el charco de soldadura [1].

### **2.5.9 Resistencia de los depósitos en filete de soldadura submarina**

La resistencia de una soldadura depende de varios factores, las cargas involucradas son fuerzas de dos tipos, estáticas o dinámicas. Las cargas dinámicas pueden ser una combinación de tensión, compresión, corte y

flexión. Debido a que siempre existen dudas con respecto a la magnitud de la carga, un factor de protección es usado en el cálculo de la longitud requerida de una soldadura de filete.

Una soldadura de filete es una soldadura triangular utilizada para unir dos superficies que están en ángulos rectos entre sí. Una soldadura de filete debe de tener una longitud de pierna igual al espesor de la placa o arriba de 3/8" de su espesor. Para placas con espesores de 3/8" y mayores, un mínimo de longitud de pierna de 3/8" es requerida en todas las soldaduras húmedas.

Al igual que en soldaduras en la superficie, el uso de electrodos para soldadura submarina más grandes resultarán en depósitos de soldadura de mayores dimensiones. Sin embargo los electrodos más grandes tienden a generar mayor porosidad en los depósitos de soldadura. También un pase de soldadura más largo tendrá una tenacidad mas baja, esto es el resultado del efecto de revenido que tiene cada pase de soldadura en las soldaduras que le proceden.

Para un trabajo mas adecuado es recomendado un electrodo de 1/8". Por lo tanto, el buzo soldador tendrá que realizar un número de pases usualmente entre 3 a 5 para alcanzar la longitud de la pierna de 3/8". El número de pases será determinado por la posición y técnica de soldadura. El punto importante no es el número de pasadas sino obtener las dimensiones adecuadas del depósito. En casos donde el metal a ser soldado es de menor espesor, será requerido un electrodo de 1/8". Utilizando el electrodo mas pequeño será necesario una mayor cantidad de pases. Las soldaduras multipase utilizando electrodos más pequeños actualmente resultan en soldaduras húmedas de mayor calidad con mejores propiedades metalúrgicas [22].

### **2.5.10 Soldadura de filete con posicionamiento bajo**

En placas o piezas a ser soldadas con un posicionamiento pobre es necesario aplicar metal de soldadura adicional para rellenar el espacio en la raíz del filete. Esto puede ser realizado mediante la alimentación del

electrodo hacia la junta más rápido a como usualmente se realiza con la técnica de autoconsumo. Aproximadamente 6" de metal por 10" de electrodo puede ser depositado en vez de las 8" usualmente depositadas. Cuando es utilizada esta técnica el metal adicional solidifica rápidamente, como se muestra en la figura 2.12, no se desplaza hacia afuera de la abertura como ocurre en soldaduras en la superficie. Filetes con aberturas en la raíz mayores a 1/8" han sido exitosamente soldados usando este proceso, aunque no es recomendable utilizarlos en materiales con espesores delgados [22].

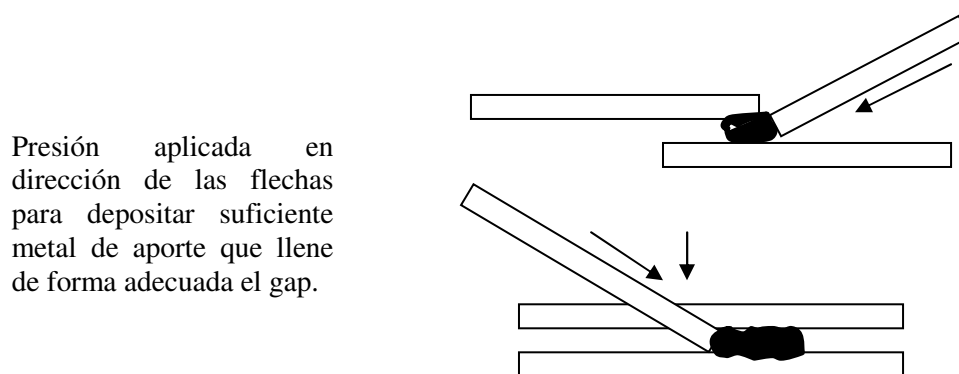


Figura 2.12. Técnica de alimentación para soldaduras de filete con abertura mayor a 1/8" [11].

### 2.5.11 Soldadura en placas delgadas

Las técnicas para soldadura de placas que presentan calibres menores a 20 (0.9mm) son básicamente las mismas descritas anteriormente. Sin embargo las siguientes prácticas son requeridas con el propósito de obtener una soldadura adecuada y prevenir que el electrodo queme el metal.

- a) El tamaño máximo del electrodo debe ser de 1/8".
- b) La velocidad de avance máxima y el mínimo amperaje debe ser consistente.
- c) Es esencial una presión mínima del electrodo.
- d) Los electrodos deben ser adecuadamente manipulados para evitar el sobrecalentamiento en un área específica.

- e) Cuando se suelda un material de mayor espesor en otro de menor mediante la técnica de manipulación o autoconsumo la mayoría del calor debe ser dirigida hacia el material más grueso.
- f) El arco siempre será cortado jalando atrás en el metal depositado previamente [11].

### **2.5.12 Reparación de grietas**

La preparación es la clave para detener la propagación de grietas. Los intentos de detener las grietas mediante el relleno con soldadura a menudo resultan en falla, ya que es muy probable que la grieta se abra paso a través de la soldadura nuevamente. Por lo tanto es lo mas apropiado utilizar parches pequeños, preferiblemente aquellos circulares son recomendados [7].

Es recomendado realizar el siguiente procedimiento de reparación:

- a) Localizar el final de la grieta mediante técnicas no destructivas apropiadas.
- b) Perforar pequeños hoyos al final de la grieta para prevenir un desarrollo posterior de la propia grieta.
- c) Un área de aproximadamente 2" deberá ser cepillada y limpiada alrededor de la grieta, donde será colocado el parche, colocándolo 6" más haya de la grieta y en todas direcciones.

El procedimiento que a continuación se describe es recomendado para la reparación de grietas en estructuras submarinas utilizando depósitos de soldadura en forma de parches rectangulares como se muestra en la figura 2.13.

- a) Rodear las esquinas del la zona a reparar utilizando un radio de 3".
- b) Colocar el parche sobre la grieta y conectarlo mediante soldadura de filete.

- c) Gire el ángulo  $45^\circ$  para reducir la necesidad de soldadura sobre cabeza.

### Mantenimiento

Después de cada uso es necesario lavar el portaelectrodo en agua dulce y secarlo, se debe desensamblar e inspeccionar las partes metálicas de cualquier daño contra la corrosión debido a la electrolisis, reemplazando todas las partes dañadas.

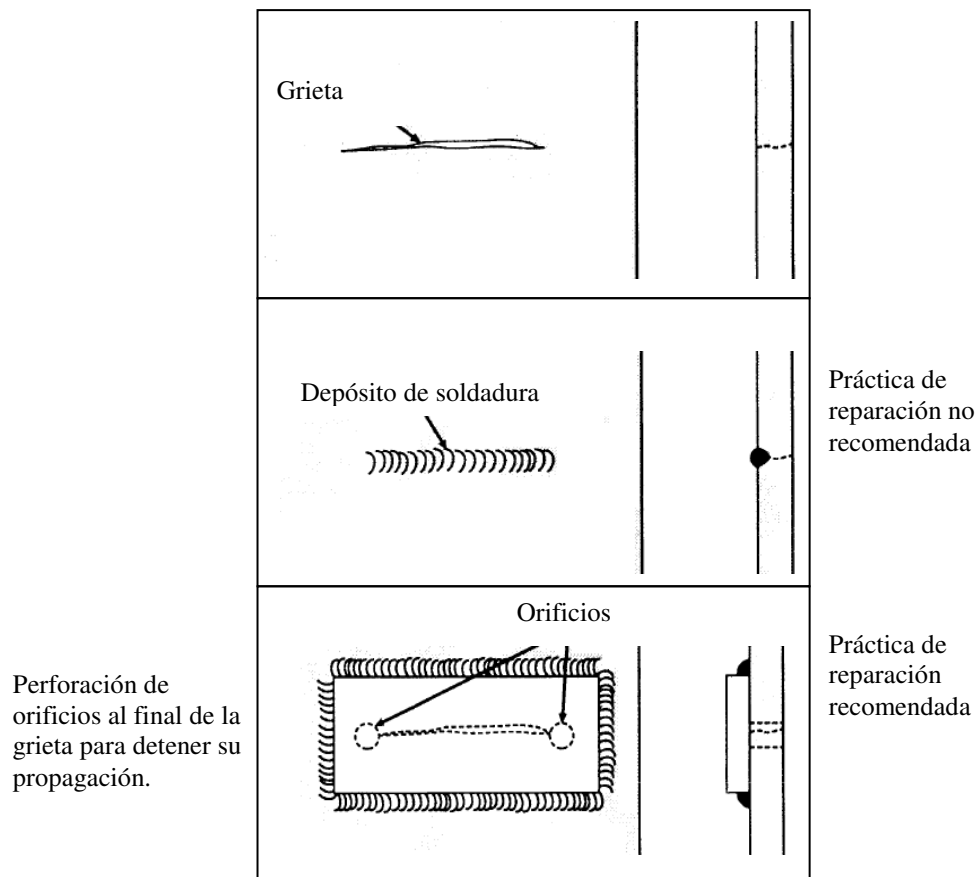


Figura 2.13. Método para reparación de grietas en estructuras submarinas utilizando parches rectangulares [7].

### 2.5.13 Preparación de la superficie

Es muy importante la adecuada preparación de la superficie a ser soldada, debido a que una soldadura no puede ser realizada sobre una capa de pintura, herrumbre o crecimiento marino. La iniciación del arco es



imposible o en el mejor de los casos muy difícil en una superficie que no haya sido preparada. Incluso una superficie poco oxidada afectará adversamente la calidad de aceros inoxidables y soldaduras húmedas con alto níquel. Las superficies a ser soldadas y las adyacentes deben ser limpiadas aproximadamente a una distancia de  $\frac{1}{2}$ ".

Las placas deben ser limpiadas a bordo de un barco o bajo el agua mediante disco o flama antes de ser posicionadas y soldadas, en el caso de la limpieza bajo el agua se puede realizar mediante cepillo de cerdas de alambre o martillo neumático. En pases múltiples de soldadura cada cama deberá limpiarse e inspeccionarse para ver si esta libre de defectos antes de depositar el siguiente cordón [7].

#### **2.5.14 Posicionamiento de la unión**

Dado que las tareas bajo el agua presentan mayor dificultad que aquellas de similitud realizadas en la superficie, el posicionamiento adecuado de las placas o piezas a unir bajo el agua se vuelve mas complicado. El posicionamiento bajo el agua debe realizarse con minuciosidad y cuidado para asegurar una soldadura satisfactoria. En la soldadura submarina de filete es importante que no exista espacio en la raíz del filete antes de la soldadura. En caso de que el espacio no pueda ser completamente eliminado, debe ser tan pequeño como las condiciones lo permitan.

Incluso los soldadores más expertos son ineficaces cuando el posicionamiento es pobre. Es más recomendable dedicar un poco mas de tiempo para la sujeción y acomodo de las juntas que dedicar una mayor cantidad de tiempo soldando [7].

#### **2.5.15 Preparación para la soldadura**

El proceso de soldadura submarina depende grandemente de la habilidad del buzo soldador, sin embargo antes de concentrarse en cualquier técnica de aplicación de soldadura se presentan los puntos básicos.

-Alineación de la junta

- Preparación de la junta
- Selección de la corriente de soldadura
- Ángulo de electrodo
- Longitud de arco
- Velocidad de avance
- Registro y monitoreo

- Alineación de la junta

El posicionamiento adecuado debe ser realizado cuidando de asegurar la aplicación de una soldadura con las características adecuadas.

En soldaduras de filete es importante que no exista algún espacio en la raíz del filete antes de comenzar la soldadura. Si el espacio no puede eliminarse, debe ser lo mas pequeño posible.

- Preparación de la unión

La importancia de una preparación precisa de los bordes es incrementada, sobretodo en donde son requeridos controles precisos de penetración.

- Selección de la corriente de soldadura

La selección de la corriente será de acuerdo a los rangos especificados por el equipo y electrodos.

- Ángulo del electrodo

El ángulo del electrodo generalmente se encuentra entre 30 a 45°, aunque esta no es una regla.

- Longitud de arco

El soldador continuamente alimenta el electrodo hacia la junta para compensar la extinción del mismo. Utilizando la técnica de arrastre, la longitud de arco es en gran medida autorregulada y esta relacionada con el ajuste de corriente/voltaje y el tamaño del electrodo. Con una excesiva longitud de arco, el arco puede ser extinguido, el metal de soldadura se vuelve amplio y la penetración es reducida, por otro lado, si el arco es demasiado corto, el metal de soldadura se vuelve más angosto y el electrodo puede pegarse a la pieza de trabajo.

- Velocidad de avance

Es importante mantener una velocidad de avance constante para dar el ancho de cordón adecuado, en soldaduras de filete esto es medido por la longitud de la pierna, entonces 4 mm de electrodo darán 4 mm de longitud de pierna aproximadamente. La velocidad de avance dependerá de:

- Tamaño del electrodo
- La corriente
- El tamaño de cordón requerido

- Limpieza de la superficie

Es muy importante limpiar la superficie para ser adecuadamente soldada, eliminando herrumbre, pintura o algas marinas, de lo contrario pudiera dificultar incluso el inicio del arco eléctrico. En pases múltiples de soldadura, cada cama debe ser limpiada a fondo antes de depositar el siguiente cordón.

Los bordes deben ser limpiados, quedando libre de herrumbre además de ser cuadrados planos para evitar variaciones en el posicionamiento. Los espacios alrededor de los bordes causan pobre penetración e inclusiones de escoria en el área de la raíz. El uso de herramientas neumáticas son de gran ayuda para realizar la limpieza.

- Registro y monitoreo

Este es un trabajo importante, tanto el buzo como su tender necesitan trabajar juntos. Cada uno necesita saber que se espera de él y que información necesita ser registrada. Durante el transcurso del buceo, el buzo y el tender deberán dar instrucciones y preguntar interrogantes. Esta información relevante necesita ser registrada para que el procedimiento sea compilado. Esto dará información de las áreas problemáticas, proporcionando respuestas acerca de que debe ser modificado la próxima vez mejorando el proceso y por ende la soldadura [11].

### **2.5.16 Consideraciones especiales en la aplicación del proceso MMA**

Cuando no estén disponibles los electrodos de soldadura submarina con revestimiento impermeable, algunos de los electrodos usados para soldadura en la superficie pueden ser de utilidad si son impermeabilizados, los cuales pueden dar un desempeño satisfactorio bajo el agua si son adecuadamente preparados y depositados por un buzo soldador experimentado. Los electrodos adecuados para estas tareas son los de grado E6013, E7014, E7016 y electrodos de acero inoxidable de 1/8" de diámetro.

A diferencia de los electrodos manufacturados especialmente para soldadura submarina, es necesario impermeabilizar la cubierta de fundente de los electrodos. Esto se realiza mediante la inmersión del electrodo en un impermeabilizante adecuado como los que se listan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Electrodo de soldadura seca adecuados para soldadura bajo el agua e impermeabilizantes [11].

Electrodo	Material	Clasificación
1/8", 5/32" & 3/16" E6013, E7014, E7016 & E7018	Acero al carbón	AWS A5.1
1/8", 5/32" & 3/16" E309, E310 & E312	Acero inoxidable	AWS A5.4
1/8" & 5/32" ENiCrFe-2, ENiCrFe-3 & ENiCrMo-3	Alto níquel	AWS A5.1
Materiales impermeabilizantes		
Epoxy 152	MIL-P-24441	
Lea-Lac 30-L2093		
Poliuretano, no a base de petróleo		

Una o dos inmersiones son requeridas, dependiendo de la viscosidad del material impermeabilizante. Se debe de asegurar cubrir completamente la capa de fundente. Cuando el recubrimiento impermeabilizante es inadecuado el agua se convierte en vapor al generarse el arco escapando hacia fuera del recubrimiento. Los recubrimientos impermeabilizantes deben estar completamente secos antes de aplicar recubrimientos adicionales y antes de ser utilizados. Es conveniente proporcionarle unos cuantos electrodos a la vez ya que el recubrimiento protector del electrodo tiene una cantidad limitada de tiempo.

Algunas consideraciones a seguir en el manejo de electrodos que no son exclusivos para soldadura submarina son las siguientes:

- a) Evitar manejar el revestimiento de fundente con los dedos.
- b) Antes del proceso de inmersión, los electrodos E7014 y E7016 deberán ser removidos de sus empaques originales y colocados en un horno y calentados a 300°F durante 4 horas, seguidos de una reducción de temperatura a 150°F. Los electrodos deben permanecer en el horno hasta que se lleve a cabo la inmersión en el recubrimiento.

- c) Es importante que el trabajo se lleve a cabo en un área con baja humedad.
- d) Mezclar el impermeabilizante de acuerdo a las instrucciones del fabricante.
- e) Adjuntar sujetadores al final del electrodo antes de sumergirlo, para una manipulación más sencilla.
- f) Sumergir los electrodos calientes verticalmente en la solución impermeabilizante. Espere hasta que ya no exista generación de burbujas para seguir con la remoción de los electrodos del contenedor, asegurando una uniformidad del recubrimiento.
- g) Sumerja los electrodos una o dos veces, si sumerge mas de un electrodo a la vez asegurar que no exista contacto entre ellos.
- h) Colocar el electrodo verticalmente en un área caliente y seca, permitiendo que sea absorbido un exceso de impermeabilizante por la cubierta de fundente.
- i) Permitir al electrodo secar completamente antes de sumergirlo nuevamente.
- j) El secado de los compuestos impermeabilizantes varían de unos cuantos minutos a varios días dependiendo del fabricante.
- k) Nunca bajo ninguna circunstancia colocar un electrodo impermeabilizado dentro de un horno caliente [7].

## **2.6 Normas, organismos regulatorios y manuales para soldadura subacuática**

### **2.6.1 Normas y estándares**

Las normas son documentos técnico legales con las siguientes características:

- Contienen especificaciones técnicas de aplicación voluntaria.
- Son elaborados por consenso de las partes interesadas:
  - + Fabricantes.
  - +Administraciones.

- +Usuarios y consumidores.
- +Centros de investigación y laboratorios.
- +Asociaciones y Colegios Profesionales, etc.
- Están basados en los resultados de la experiencia y el desarrollo tecnológico.
- Son aprobados por un organismo nacional, regional o internacional de normalización reconocido.
- Están disponibles al público [1].

Dichos documentos son elaborados con el fin de garantizar la interoperabilidad entre elementos construidos independientemente, así como la capacidad de replicar un mismo elemento de manera sistemática [22].

## **2.6.2 Normas aplicadas en soldadura húmeda**

### **ANSI/AWS D3.6-99**

El desarrollo más significativo en los últimos 15 años, ha sido la publicación del ANSI/AWS D3.6-83, Specification for Underwater Welding (Especificaciones para Soldadura Subacuática), que substituye las opiniones concernientes a la calidad de la soldadura obtenida con criterios objetivos probados, ya que esta actividad tiene variables esenciales con respecto a las soldaduras realizadas en la superficie [7].

En 1974 la Sociedad Americana de la Soldadura (AWS por sus siglas en ingles) inició un nuevo subcomité para la investigación de las soldaduras submarinas – secas y húmedas - y formular especificaciones comprensivas para esta actividad. Este comité, llamado D3b, integrado por ingenieros y personal representativo de agencias gubernamentales de Estados Unidos, compañías petroleras, contratistas de buceo, compañías constructoras de insumos y organismos educacionales; lanzó las primeras especificaciones en el año 1983, las que tuvieron una segunda revisión en 1989, la tercera en 1992 y luego en 1999, y que fueron desarrolladas en concordancia con los requerimientos del Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI por

sus siglas en ingles), la máxima organización en materia de regulaciones, reglamentaciones, códigos y especificaciones de Estados Unidos. Dichas reglamentaciones resultaron un gran éxito en Norteamérica, Europa, Asia y Medio Este, lo que implicó una pronta aprobación a nivel mundial [1].

Su objetivo es proveer estándares para la calificación de soldadores submarinos y procedimientos de soldadura y corte submarinos para establecer variables esenciales y, en general, proveer un documento que haga posible al usuario seleccionar el procedimiento de soldadura o corte apropiado y obtener soldaduras de calidad [23].

La ANSI establece los estándares de aceptación para todas las soldaduras incluyendo las de reparación, que deben de ser examinadas mediante inspección visual, radiográfica, examen de ultrasonido y examen de partículas magnéticas [1].

Las especificaciones establecen cuatro categorías de soldaduras, identificadas como clase A, B, C y O. Estas clases son definidas de la siguiente forma:

Soldaduras clase A: son aquellas comparables con las realizadas sobre el agua con respecto a sus propiedades específicas y requerimientos de prueba.

Soldaduras clase B: se designa así aquellas soldaduras para aplicaciones menos críticas donde la baja ductilidad, gran porosidad y largas discontinuidades, pueden ser toleradas.

Soldaduras clase C: son aquellas para aplicaciones donde la cantidad de cordones no es la principal consideración y satisfacen menores requerimientos que las clase A, B y O.

Soldaduras clase O: son las que deben reunir los requerimientos de otros códigos o especificaciones.

Mientras que las soldaduras clase B y C son logradas fácilmente mediante estos procesos, la producción de soldaduras clase A no había sido posible a causa de la dificultad de reunir todas las propiedades mecánicas y visuales detalladas en los requerimientos de la ANSI/AWS D3.6-83 [15].

En septiembre de 1999 un grupo de empresas contratistas de salvamento, se unió en un ambicioso programa de soldadura submarina, El



programa incluía un entrenamiento intensivo para buzos soldadores, producción de procedimientos de soldadura, y finalmente calificación a los soldadores. Estos lograron ser el primer grupo en ofrecer calidad de superficie, soldaduras estructurales como las especificadas en el ANSI/AWS D3.6M:1999 Specification for Underwater Welding for Class A welds, lo que probó que la calidad de las soldaduras de superficie puede obtenerse también de la soldadura submarina, y esto representó un significativo paso adelante y permitió que las reparaciones mediante soldadura húmeda en buques a flote fuera aceptada como permanente [7].

Durante años se emplearon electrodos de superficie que se les cubría con un sinnúmero de variaciones de lacas, pinturas, lanolina, nitrato de celulosa y barniz, pero se comprobó que una buena cobertura a prueba de agua no es, por sí misma suficiente para producir soldadura submarina que reúnan los estándares de la norma AWS D3.6-83. Era necesario conocer como afectaba el medio acuático a la metalurgia de la soldadura. Se fundamentaron y publicaron pequeñas fuentes de información que principalmente eran resultados de aspectos prácticos de soldaduras subacuáticas. Por otra parte, la comunidad de buzos comerciales ayudó a establecer los requisitos necesarios para especialistas que realicen estas actividades [23].

### **2.6.3 Manual de corte y soldadura submarina desarrollado por la Armada de Estados Unidos**

Este manual esta destinado a proveer información sobre el uso de las técnicas convencionales de corte y soldadura submarina. Esta escrito por buzos de la marina de los Estados Unidos especializados en el rescate de buques y operaciones de limpieza de puertos. No es una guía de procedimiento de soldadura certificable [7].

#### **2.6.4 Sociedades regulatorias en aplicación de normas a procesos y sistemas de seguridad en ámbito marítimo**

Actualmente existen más de 50 organizaciones de clasificación marítima en el mundo, siendo las tres principales la británica Lloyd's Register, la noruega Det Norske Veritas y la estadounidense American Bureau of Shipping, las cuales a continuación se describen brevemente.

-American Bureau of Shipping, con sede en Houston, Texas. ABS fue fundada en 1862 y actualmente es una de las tres empresas líderes en su sector a nivel mundial. Las funciones de dicha sociedad de clasificación son principalmente la verificación de estándares para el diseño, construcción y mantenimiento de buques y plataformas offshore.

-Lloyd's Register of Shipping, con su sede en Inglaterra es la primera y más antigua Sociedad de Clasificación, estableciendo reglas diseñadas para aumentar la seguridad y asegurando que los buques se construyen y mantienen de acuerdo a esas reglas.

-Det Norske Veritas, sociedad de clasificación de ámbito mundial con sede en Noruega y fundada en 1864, Sus objetivos son salvaguardar la vida, propiedades y el medio marino y es, a su vez un proveedor líder de servicios de gestión de riesgos [24].

# **CAPÍTULO III**

## **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA**

### **3.1 Análisis de trabajo**

Después de haber realizado la revisión bibliográfica se observan diferentes aspectos que afectan la soldadura submarina húmeda manual, siendo esta la mayormente utilizada para reparación y mantenimiento de plataformas y ductos por su gran versatilidad. Dichos aspectos son el tipo de fuente de poder, voltaje y corriente, polaridad, tipo de electrodo, ángulo del electrodo, velocidad de avance, velocidad de consumo del electrodo, errores del soldador. Además de los efectos adicionales del agua como, presión, constricción del plasma, velocidad de enfriamiento rápida y presencia de hidrogeno.

La porosidad es uno de los principales problemas sin resolver en soldaduras submarinas húmedas. La razón principal parece ser la falta de conocimiento del fenómeno que toma lugar en el arco y el charco de soldadura. Las extremadamente altas temperaturas experimentadas en el

arco hacen casi imposible medir experimentalmente las variables en el propio arco y acero fundido. También, a estas temperaturas las reacciones químicas en el acero fundido se vuelven muy intensas, complejas y difíciles de cuantificar.

La ductilidad y tenacidad de soldaduras húmedas son reducidas debido a la porosidad, así como por los cambios en la composición química y microestructura del metal soldado causada por el ambiente húmedo.

Debido al profundo efecto que tiene el incremento en la profundidad del agua en la calidad de la soldadura aplicada, no existe formulación alguna de electrodo que produzca soldaduras húmedas de calidad a cualquier tipo de profundidad, derivando en un extremo cuidado en la selección de los consumibles a utilizar.

Por otro lado la soldadura hiperbárica seca es a menudo utilizada a pesar de su alto costo, debido a que pueden ser obtenidas soldaduras de alta calidad.

## CAPÍTULO IV

# CASOS DE ESTUDIO

### 4.1 Soldadura húmeda con electrodo de grado AWS-E6013 a tres profundidades fuera de posición.

El presente caso muestra la aplicación de la soldadura vertical descendente. Un depósito de soldadura en placa fue depositado en placas de acero A-36 a tres presiones de agua, a profundidades de 0.5, 50 y 100 m.

Las soldaduras húmedas fueron hechas con electrodos AWS-E6013 en una cámara hiperbárica capaz de simular profundidades, realizándolas utilizando un sistema de soldadura gravitacional colocado dentro de la cámara. Una ilustración esquemática del sistema de soldadura gravitacional usado para aplicar la soldadura es mostrada en la figura 2.14.

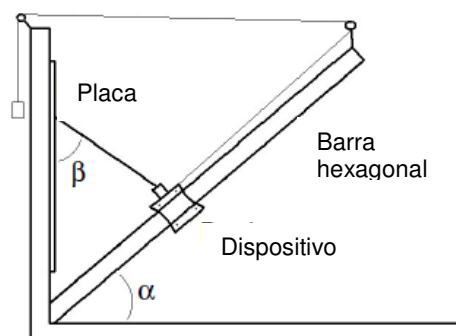


Figura 2.14. Sistema de soldadura gravitacional vertical [25].

## Resultados y conclusiones

Los mejores valores de corriente de soldadura identificados para los electrodos E6013 en soldadura vertical descendente para tres profundidades, velocidades de avance, ángulo del electrodo y ángulo de la barra hexagonal son mostrados en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Parámetros de soldadura de las pruebas [25].

Profundidad (m)	Corriente (A)	Velocidad de avance (mm/s)	Ángulo del electrodo con la placa $\beta$	Ángulo de la barra hexagonal $\alpha$
0.5	130	3.0-3.5	65°	30°
50	180	3.5-4.0	65°	30°
100	184	3.5-4.0	65°	30°

La penetración de la soldadura en la placa disminuye a medida que la presión del agua incrementa como se muestra en la figura 2.15.

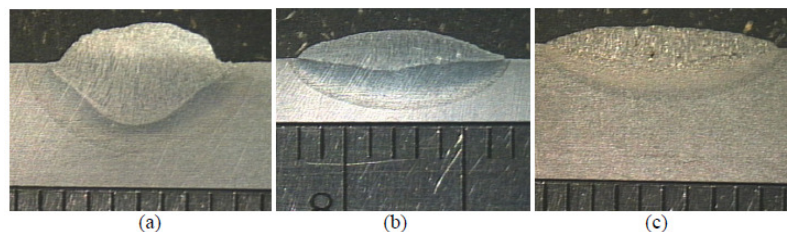


Figura 2.15. Micrografías de las soldaduras húmedas realizadas a (a) 0.5 m, (b) 50 m y, (c) 100 m de profundidad [25].

La examinación visual de las soldaduras en placa mostraron irregularidades en las superficies del cordón que incrementaban con la profundidad en el agua (Figura 2.16).



Figura 2.16. Cordón de soldadura húmeda en placa depositado con un electrodo E6013 a 100 m de profundidad [25].

La dificultad mas grande para producir las soldaduras húmedas en vertical descendente usando el sistema de soldadura gravitacional fue el control de la velocidad de avance. Este parámetro es importante debido a que controla el tamaño del charco de soldadura. A altas velocidades de avance, el charco de soldadura tiende a ser más pequeño, con penetraciones poco profundas y cordones de soldadura de menor tamaño [26].

El socavado es el defecto mas frecuente. A bajas velocidades de avance, el charco de soldadura se vuelve mas largo, con penetraciones mayores y cordones de mayor tamaño. En el último caso el metal líquido desborda el charco de soldadura, causando corto circuito, extinguiendo el arco. Como resultado se tienen discontinuidades en el cordón de soldadura con secciones sin rellenar producidas y con formas irregulares [25].

## Discusión

Algunas consideraciones de esta investigación es que las soldaduras fueron realizadas en un ambiente de profundidades simulado pero utilizando agua dulce. Según la literatura la diferencia entre agua dulce y salada no es significativa en el comportamiento de la soldadura. Un pequeño incremento en la conductividad eléctrica es esperado para el agua salada.

Otro aspecto a tomar en cuenta es la temperatura del agua, ya que las diferentes temperaturas del agua pueden afectar la calidad de la soldadura húmeda debido a los diferentes rangos de transferencia de calor, esto considerando las soldaduras realizadas en campo. Por último sería interesante analizar que tan alejados de la realidad se encuentran estas soldaduras con aquellas realizadas en campo con exactamente las mismas condiciones y parámetros de operación.

## 4.2 Desarrollo de electrodos tubulares revestidos para soldadura submarina.

En el presente caso se presentan los experimentos desarrollados con electrodos tubulares revestidos usando como base el revestimiento rutílico (6013). Se formularon tres diferentes mezclas de polvos, con las cuales se llenaron las cavidades de los alambres tubulares. Finalmente se seleccionaron dos electrodos a los cuales se les aplicó el barniz impermeabilizante modificado con mezclas pirometalúrgicas. Los depósitos se realizaron en un acuario con una capa de agua de 1 m. Los resultados obtenidos revelaron que la mezcla pirometalúrgica formada por óxido de manganeso y aluminio tanto en el interior del electrodo como en el barniz impermeabilizante brindó los mejores resultados en el comportamiento tecnológico y metalúrgico de la soldadura subacuática mojada.

Con el objetivo de valorar el comportamiento metalúrgico y tecnológico del contenido en las cavidades de los electrodos tubulares revestidos e impermeabilizados en la soldadura subacuática mojada se prepararon, en primera instancia, 3 tipos de electrodos tubulares (Figura 2.17) revestidos empleando un alambre tubular de 4 mm de diámetro externo, 2 mm de diámetro interno y 350 mm de longitud, que fueron revestidos, manteniendo la misma formulación y espesor de los revestimientos utilizados en los electrodos macizos E 6013. La capa de impermeabilizante se aplicó por inmersión empleando un barniz comercial constituido por resina vinílica y solventes aromáticos [27].

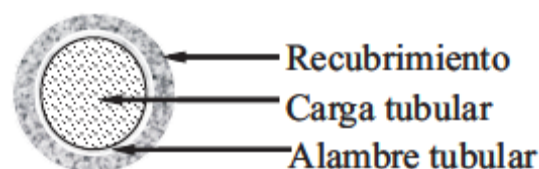


Figura 2.17. Representación esquemática de las características estructurales de la sección transversal de un electrodo tubular revestido [27].



- En la 1ra variante (polvo de Fe) se incorpora sólo polvo de hierro a la cavidad tubular del electrodo.
- En la 2da variante (Fe+Al+MnO<sub>2</sub>) se evaluó la influencia que ejerce sobre el proceso de soldadura la incorporación del dióxido de manganeso (MnO<sub>2</sub>) en el interior del electrodo tubular.
- En la 3ra variante (Fe+CaC<sub>2</sub>) se evaluó la influencia que ejerce sobre el proceso la adición de carburo de calcio, el cual es capaz de reaccionar de manera exotérmica con el oxígeno disminuyendo por tanto su contenido en el baño de soldadura.

### Resultados y conclusiones

- En la primera variante (polvo de Fe) fue necesario elevar la corriente hasta 130 A para lograr abrir el arco debido a que se deriva cierta cantidad de corriente por dentro de la cavidad.
  - En la segunda variante (Fe + Al + MnO<sub>2</sub>) se presentó al principio ciertas dificultades en establecer el arco, debido a interrupciones causadas también por la profundidad del cono en la punta del electrodo. En general el proceso de soldadura fue más estable que los anteriores casos, obteniéndose cordones con una forma más regular y continua y con mejor aspecto.
  - En la tercera variante (Fe+CaC<sub>2</sub>) ocurren fenómenos distintos a todos los antes mencionados, que provocan parecidos efectos de inestabilidad del arco a causa de la magnitud de la profundidad del cono en la punta del electrodo, a pesar del poco contenido de CaC<sub>2</sub> en la cavidad tubular.
- El grado de empaquetamiento alcanzado en las mezclas de polvo (≈ 60%) empleadas dentro de la cavidad tubular de los electrodos y sus características pirometalúrgicas influyen decisivamente en el comportamiento metalúrgico y tecnológico del proceso de soldadura húmeda.
- La adición de mezclas pirometalúrgicas al barniz impermeabilizante comercial contribuye de forma decisiva al comportamiento tecnológico de los electrodos tubulares revestidos debido a que reduce en un 35% la altura del cono en la punta del electrodo y da una contribución adicional de energía

exterior que favorece el consumo del revestimiento de los electrodos tubulares revestidos [27].

### Discusión

Estudios sobre el comportamiento metalúrgico y tecnológico de los componentes que se añaden a la cavidad de los electrodos tubulares revestidos e impermeabilizados destinados a la soldadura submarina húmeda son inexistentes, por lo tanto los electrodos tubulares revestidos constituyen una alternativa viable para el desarrollo de consumibles para aplicación en este tipo de procesos.

# **CAPITULO V**

## **CONCLUSIONES**

Las diversas técnicas de soldadura submarina brindan la posibilidad de obtener soldaduras sanas que cumplan con los requerimientos de las sociedades clasificatorias, llegando a tener una mayor aceptación con el paso del tiempo debido a la estandarización de los métodos, procedimientos y requerimientos de certificación.

Dentro de los procesos de soldadura la aplicación más difundida (soldadura manual con electrodo revestido) presenta una constante investigación centrada por una parte en el comportamiento de la burbuja formada bajo el agua, la cual protege el arco de soldadura, así como las diferentes variables que intervienen en el proceso y la forma en que afectan la calidad de la soldadura. De igual manera se mantiene una constante búsqueda por desarrollar electrodos que permitan realizar soldaduras que cumplan con los estándares requeridos. Lo anterior mediante el adecuado conocimiento del comportamiento de los elementos presentes en el electrodo con el medio donde se realiza la soldadura, reduciendo de esta manera los niveles de hidrógeno en la soldadura, así como evitando la pérdida por oxidación de los elementos de aleación del propio electrodo, destinados a proporcionar las propiedades mecánicas al depósito, generando así las microestructuras deseadas en este tipo de soldaduras, por ejemplo ferrita acicular en el caso de aceros al carbono. Por consiguiente se

busca producir consumibles capaces de formar una escoria con las propiedades físicas que permitan desgasificar el charco de soldadura e incrementar la recuperación de los elementos de aleación en la soldadura.

Por otro lado se centra la atención en el efecto que tiene la adición de ciertos elementos de aleación en los electrodos y su distribución en el charco de soldadura provocando la formación de microestructuras favorables para las propiedades mecánicas del depósito de soldadura. Los aspectos mencionados tiene la finalidad de mitigar los efectos adversos del incremento en la profundidad a la cual se realiza una soldadura submarina mediante la optimización de los consumibles utilizados, evitando los efectos adversos del medio submarino, como son la presión, constricción del plasma de soldadura, velocidad de enfriamiento rápida y presencia de oxígeno e hidrógeno principalmente.

Es común la aplicación de algunas técnicas de soldadura con el objetivo de disminuir los efectos adversos del enfriamiento brusco, obteniendo soldaduras de calidad aceptable, por ejemplo, la técnica de soldadura por cordón revenido, sin embargo este tipo de técnicas requieren una gran habilidad y precisión por parte del soldador que las aplique.

De igual manera existe investigación que aún se encuentra en etapas iniciales de experimentación en medios submarinos simulados, proyectando para etapas futuras perfeccionar las técnicas desarrolladas y aplicarlas en la reparación o fabricación de estructuras directamente en el medio submarino.

A pesar de la existencia de un buen número de aplicaciones exitosas y resultados de investigaciones, la soldadura submarina requiere investigación y desarrollos continuos para lograr su completo potencial.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Keats D.J., 1990. Professional Diver's Manual on Wet-Welding. Woodhead Publishing Limited, West Yorkshire, UK.

[2] <sup>a</sup>Donald Faulds, <sup>b</sup>Unni Hoff Solberg, <sup>c</sup>Tore Haabrekke. 2008. Induction Heating of Live Pipeline for Hyperbaric Diver Welding. Paper presented at Underwater Intervention, <sup>a</sup>Perry Slingsby Systems Ltd Kirkbymoorside, United Kingdom, <sup>b</sup>EFD Induction Norway AS Skien, Norway, <sup>c</sup>Technip Norway AS Stabekk, Norway.

[3] Dutta Majumdar Jyotsna, 2006, Underwater Welding – Present Status and Future Scope. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, Kharagpur, West Bengal India.

[4] Ian M. Richardson, Neil J Woodward, John Billingham, 2002, Deepwater Welding for Installation and Repair – A Viable Technology?, Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan.

[5] Juan M. Medina. 2000. Corte y soldadura subacuática. Textos compilados, Argentina.

[6] Sánchez Osio Alberto. 1994. the influence of consumable composition and solidification on inclusion formation and growth in low carbon steel underwater wet welds. Colorado School of Mines, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Golden, Colorado U.S.

[7] United States Navy, 2002, U.S Navy Underwater Cutting and Welding Manual. Naval Sea Systems Comand, USA.

- [8] Sub comité técnico de normalización de PEMEX-Exploración y producción. 2008. Norma Soldadura en acero estructural para plataformas marinas. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios, México.
- [9] Pérez Guerrero Faustino. 2003. Tesis. Effect of nickel additions on rutile electrodes for underwater welding. Colorado School of Mines, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Golden, Colorado U.S.
- [10] Nixon, John H., © 2000 Elsevier. Underwater Repair Technology, Cranfield University, UK.
- [11] Sánchez Sánchez Edgar. 2002. Tesis. “Investigación del Estado del Arte del Proceso de Soldadura bajo el Agua para Estructuras de Plataformas” Universidad de las Americas, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Puebla, Puebla, México.
- [12] Keats D.J. 2004. Underwater Wet Welding: A Welder's Mate. Woodhead Publishing Limited, West Yorkshire, UK.
- [13] The Colorado School of Mines – Center for Welding research. 1985. Proceedings: International Workshop on Quality in Underwater Welding of Marine Structures, Golden, Colorado U.S.
- [14] Amit Mukund Joshi. 2000. Underwater welding a review. Junior Research Fellow Mechanical Engineering Department. Indian Institute of Technology I.I.T – Bombay, India.
- [15] Hevia García Gonzalo. 2005. Tesis. Weld pool behavior in underwater wet welding of structural steels. Colorado School of Mines. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Golden, Colorado U.S.
- [16] Quintana Puchol Rafael, Perdomo González Lorenzo, Duffus Scott Alejandro, Queiroz Bracarense Alexandre y Pereira Pessoa Ezequiel Caires.

2009. Thermodynamic Considerations Between Pores Formation and Hydrostatic Pressure During Underwater Wet Welding. Soldagem Insp. Vol. 14, No. 2, p.161-169, São Paulo, Brasil.

[17] Andrade Luciano, Liu Stephen, and Perez Faustino. 2009. Enhanced Shielded Metal Arc Electrode Development for Underwater Wet Welding: Technology Transfer to Industry. Minerals Management Service Engineering and Research Branch. Colorado School of Mines, Golden, Colorado U.S.

[18] Hideo Yara, Yasuji Makishi, Kenji Heshiky, Hiroji Nakagawa, Fukuhisha Matsuda. 1984. Implant Weldability Test in Wet Underwater Welding. Welding Research Institute of Osaka University, Ibaraki, Osaka Japón.

[19] Yasuo Suga, Atsushi Hasui. 1986. Effect of Water Pressure On Formation of Porosity In Underwater Weld Metal. Transactions of Japan Welding Society, Vol. 17 No. 1, Osaka Japón.

[20] Liu Stephen, Olson David, Smith Charles. 1994. Proceedings: International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans, Louisiana U.S.

[21] American Welding Society, 1981, Underwater Welding of Offshore Platforms and Pipelines, American Welding Society Education Department, Louisiana U.S.

[22] Wikitel. Julio de 2010, Disponible en [http://es.wikitel.info/wiki/Normas\\_y\\_Estándares](http://es.wikitel.info/wiki/Normas_y_Estándares)

[23] AWS Comitte on Welding in Marine Construction. 1999. AWS D3.6M:1999 Specification from underwater welding. American Welding Society, Miami, Florida, USA.

[24] Wikipedia. Julio de 2010 Disponible en [http://en.wikipedia.org/wiki/Classification\\_society](http://en.wikipedia.org/wiki/Classification_society).

[25] <sup>a</sup>Pereira Pessoa Ezequiel Caires, <sup>b</sup>Perez-Guerrero Faustino, <sup>a</sup>Queiroz Bracarense Alexandre, and <sup>b</sup>Liu Stephen, <sup>a</sup>Universidade Federal de Minas Gerais <sup>b</sup>Colorado School of Mines. 2006. Out of Position Wet Welding with AWS-E6013 Electrode Grade at Three Water Depths, Belo Horizonte, Minas Gerais Brasil.

[26] Pereira Pessoa Ezequiel Caires<sup>a</sup>, Queiroz Bracarense Alexandre<sup>a</sup>, Maluf Zica Eduardo<sup>a</sup>, Liu Stephen<sup>b</sup>, Perez-Guerrero Faustino<sup>b</sup>. 2006. Porosity variation along multipass underwater wet welds and its influence on mechanical properties. <sup>a</sup>Federal University of Minas Gerais – UFMG, Laboratory of Robotics, Welding and Simulation, Mechanical Engineering Department – Belo Horizonte – MG, Brazil, <sup>b</sup>Colorado School of Mines – CSM, Center for Welding, Joining and Coatings Research, Golden, CO U.S.

[27] <sup>a</sup>Queiroz Bracarense Alexandre, <sup>b</sup>Perdomo González Lorenzo, <sup>a</sup>Pereira Pessoa Ezequiel Caires, <sup>b</sup>Qintana Puchol Rafael. <sup>a</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. <sup>b</sup>Universidade Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV), Cuba. 2009. Development of tubular coated electrodes for underwater wet welding. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 32, Nº 2, 89 – 97.



## Listado de tablas

Tabla 2.1 Electrodo para soldadura submarina	14
Tabla 2.2 Amperajes recomendados para soldaduras húmedas a 50 m de profundidad	14
Tabla 2.3 Clasificación de los aceros estructurales empleados en plataformas marinas fijas para la designación del electrodo y proceso de soldadura	15
Tabla 2.4 Ajuste de corriente para soldaduras bajo el agua	24
Tabla 2.5 Electrodo de soldadura seca adecuados para soldadura bajo el agua e impermeabilizantes	45
Tabla 2.6 Parámetros de soldadura de las pruebas	54

## Listado de figuras

Figura 2.1 Habitat para soldadura submarina seca	8
Figura 2.2 Fuente de poder (cortesía Universidad Federal de Minas Gerais)	9
Figura 2.3 Sistema de control de soldadura (cortesía Instituto Tecnológico de Boca del Río)	10
Figura 2.4 Interruptor de cuchillas	11
Figura 2.5 Cables conductores de diversos diámetros (cortesía Instituto Tecnológico de Boca del Río)	12
Figura 2.6 Porta electrodo para soldadura submarina (cortesía Instituto Tecnológico Boca del Río)	17
Figura 2.7 Cascos de buceo (cortesía Instituto Tecnológico Boca del Río)	18
Figura 2.8 Componentes del proceso de soldadura manual por arco	20
Figura 2.9 Técnica de autoconsumo para soldadura manual por arco	23
Figura 2.10 Técnica de autoconsumo en soldadura MMA, para soldadura de filetes en posición vertical	25
Figura 2.11 Arco eléctrico de soldadura submarina	28
Figura 2.12 Técnica de alimentación para soldaduras de filete con abertura mayor a 1/8"	38

Figura 2.13 Método para reparación de grietas en estructuras submarinas utilizando parches rectangulares	40
Figura 2.14 Sistema de soldadura gravitacional vertical	53
Figura 2.15 Micrografías de las soldaduras húmedas realizadas a (a) 0.5 m, (b) 50 m, y (c) 100 m de profundidad	54
Figura 2.16 Cordón de soldadura húmeda en placa depositada con un electrodo E6013 a 100 m de profundidad	54
Figura 2.17 Representación esquemática de las características estructurales de la sección transversal de un electrodo tubular revestido	56