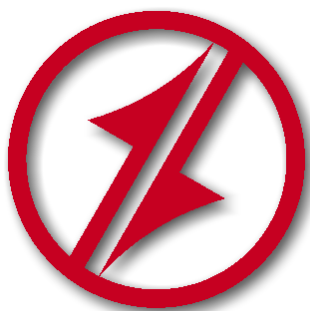


**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO API- 5L- X52  
SOLDADO POR EL PROCESO MMAW EN AMBIENTES MARINOS**

**POR**

**ING. PEDRO HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ**

**TESIS**

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

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, 25 DE FEBRERO DEL 2011**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO API- 5L- X52  
SOLDADO POR EL PROCESO MMAW EN AMBIENTES MARINOS**

**POR**

**ING. PEDRO HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ**

**TESIS**

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

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, 25 DE FEBRERO DEL 2011**

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis “**COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO API- 5L- X52 SOLDADO POR EL PROCESO MMAW EN AMBIENTES MARINOS**”, realizada por el alumno **PEDRO HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ**, con número de matrícula **10 – MS019** sea aceptada para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

---

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Tutor Académico

---

**Lic. Luis Arnoldo Trejo  
Torres**  
Tutor en Planta

---

**Dr. Jorge Leobardo Acevedo  
Dávila**  
Asesor

---

**MTSI. Francisco  
Cepeda Rodríguez**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**M.C. Claudia A. 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 Grado del alumno **PEDRO HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO API-5L- X52 SOLDADO POR EL PROCESO MMAW EN AMBIENTES MARINOS**”, aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 25 días de mes de febrero del 2011.

---

**Dr. Dagoberto Vázquez**  
**Obregón**  
Presidente

---

**Dr. José Jorge Ruiz**  
**Mondragón**  
Secretario

---

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Vocal

# ÍNDICE

	Página
SÍNTESIS	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES</b>	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo General	6
1.2.2 Objetivos Específicos	6
1.3 Justificación	7
1.4 Planteamiento del Problema	7
1.5 Hipótesis	8
1.6 Límites del Estudio	8
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>ESTADO DEL ARTE</b>	9
2.1 Soldadura Aplicada en Ambientes Marinos	9
2.2 Soldadura Seca	10
2.2.1 Soldadura en hábitat seco	10
2.2.2 Soldadura en cámara seca	10
2.2.3 Soldadura de punto seco	10
2.2.4 Soldadura automatizada	10
2.3 Soldadura Húmeda	11
2.4 Soldadura Manual de Arco Metálico	15
2.5 Electrodo para Aplicaciones Acuáticas	18
2.6 Electrodo Especiales	22
2.7 Problemática de la Soldadura Bajo el Agua	24
2.7.1 Dificultades en un Medio Húmedo	24
2.8 Efecto del Medio Ambiente Bajo el Agua	33
2.9 Efecto de la Profundidad en la Composición Química	33

2.10 Porosidad	35
2.11 Efecto de la Profundidad en la Microestructura	38
2.12 Soldabilidad de los Aceros en Ambientes Marinos	39
2.13 Dificultades al Soldar Bajo el Agua en un Medio Seco	40
2.13.1 Soldadura Hiperbárica Manual	42
2.13.2 Soldadura Hiperbárica Mecanizada	44
2.14 Técnicas de Soldadura Submarina con Filete	44
2.14.1 Técnicas de Auto – Consumo o Arrastre	45
2.14.2 Técnica de Manipulación o Tejido	47
2.15 Arco Eléctrico en Soldadura Submarina	48
2.16 Condiciones Importantes de la Soldadura MMAW	49
2.17 Resistencia de los Depósitos en Filete de Soldadura Submarina	50
2.18 Soldadura en Placas Delgadas	51
2.19 Preparación de la Superficie	52
2.20 Posicionamiento de la Unión	52
2.21 Consideraciones Especiales	53
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>METODOLOGÍA</b>	56
3.1 Descripción de Metodología Utilizada	56
3.1.1 Análisis Químico	57
3.1.2 Análisis Metalográfico	57
3.1.3 Pruebas Mecánicas	57
3.1.3.1 Ensayo de Dureza	57
3.1.3.2 Ensayo de Tensión	58
3.1.3.3 Ensayo de Dobleza	58
3.1.3.4 Ensayo de Impacto	59
3.2 Habilitado de los Cupones	59
3.3 Desarrollo Experimental	60
3.3.1 Parte Exploratoria	60

3.3.2	Desarrollo Experimental	61
3.4	Métodos Estadísticos	62
3.5	Comportamiento de los Tiempos de Enfriamiento de los Cupones de Soldadura a Diferentes Parámetros	63
3.6	Análisis Térmico de las Uniones Soldadas por el Método de Elemento Finito	65
3.6.1	Consideraciones para la Realización de la Modelación	66
3.6.2	Consideraciones Generales Sobre la Generación del Calor Aportado por el Arco de Soldadura	66
3.6.3	Análisis y Consideraciones para la Introducción de los Datos de Entrada para la Modelación por MEF en la Soldadura Húmeda	67
<b>CAPÍTULO 4</b>		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		69
4.1	Caracterización del Metal Base	69
4.1.1	Composición Química del Metal Base	69
4.1.2	Análisis Metalográfico	69
4.1.3	Dureza del Metal Base	70
4.1.4	Composición Química del Metal de Aporte	70
4.2	Resultados de la Parte Exploratoria	71
4.3	Parte Experimental	74
4.4	Análisis Microestructural de las Uniones Soldadas	74
4.5	Medición de la Zona Afectada por el Calor	78
4.6	Microdureza	80
4.7	Pruebas de Tensión	82
4.8	Pruebas de Dobleces	83
4.9	Pruebas de Impacto	84
4.10	Comportamiento de los Tiempos de Enfriamiento de los Cupones de Soldadura a Diferentes Parámetros	85
4.11	Resultados del Análisis Térmico y Microestructural de la Soldadura	87
4.12	Conclusiones	90

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	91
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	95
<b>LISTA DE TABLAS</b>	98
<b>RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO</b>	99



# SÍNTESIS

La aplicación de soldadura realizada en aquellos materiales que se encuentran bajo el agua ha representado siempre para el hombre, un alto costo que en definitiva ha provocado el encarecimiento del trabajo e incluso la no ejecución de algunos de ellos. Por esto los interesados en el tema han volcado su atención a mejorar la calidad, incrementar el conocimiento de la unión soldada y por supuesto disminuir los costos.

Una de las aplicaciones de mayor demanda se presenta en la reparación de tubería, sin embargo debido a las múltiples variables presentes resulta complicada la obtención de uniones sanas.

Tomando en consideración todo lo anterior, la soldadura húmeda es el método más ampliamente usado para soldar bajo el agua, cuya efectividad y versatilidad viable, lo han convertido en el proceso más conveniente en trabajos como estructuras submarinas o buques que se encuentran operando, así como también en la industria petrolífera en alta mar como las plataformas (offshore) en tuberías submarinas. Aún así su alcance se ha visto limitado a las exigencias del fabricante y a los códigos que las norman.

Sin embargo en años recientes ha existido una apreciable mejora en el proceso de soldadura Manual por Arco Metálico (MMAW por sus siglas en inglés Manual Metal Arc Welding) en el campo de soldadura húmeda, el cual ha ampliado su potencial de abarcar proyectos de soldadura bajo el agua para lo cual previamente no podría haber sido considerada, esta mejora se ha debido a la participación directa de los fabricantes de electrodos, al igual que de entidades relacionadas en áreas de la soldadura como "Sociedad Americana de Soldadura" (AWS), la actividad del buceo "Sociedad Americana de Buzos" e institutos de investigación.

El presente trabajo se enfoca al desarrollo de la aplicación de la soldadura húmeda en uniones de tubería API 5L X52 con el objetivo de conocer el efecto de las variables de amperaje, velocidad de alimentación y profundidad de trabajo en las propiedades de la unión soldada.

Cabe hacer mención que las técnicas de caracterización fueron de Inspección visual, microscopia y estereoscopia óptica, pruebas mecánicas como dureza, tensión, dobléz e impacto; la parte experimental se dividió en dos etapas parte exploratoria, y parte experimental, la primera consistió en realizar uniones en profundidades menores a 1.5m de profundidad en donde el soldador experimentó realizar soldaduras en rangos de 130 a 160 amperes y se cronometró la velocidad de avance la cual es establecida en este documento a 15.24m/h, la parte experimental consistió en realizar uniones a tope con bisel de 45° a tres diferentes profundidades de trabajo 5, 10 y 15m respectivamente y en cada una variando los amperajes y las velocidades de avance.

Finalmente los resultados de la experimentación fueron satisfactorios por lo que se pudo definir a la velocidad de avance como la variable que tiene mayor influencia sobre la generación de la zona afectada térmicamente y respecto a las pruebas mecánicas. Se observó que el atrapamiento de escoria es la principal causa para no alcanzar los valores mínimos de resistencia del metal base, en cuestión de la microestructura se analizaron 18 muestras en las cuales existe la presencia de ferrita equiaxial con trazas de perlita, ferrita alotriomórfica y ferrita widmanstätten en la zona de la unión.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

### 1.1 ANTECEDENTES

Durante años a los procesos de soldadura se les ha reconocido mucha utilidad para determinadas aplicaciones bajo el agua. Su campo de acción incluye operaciones tales como reparación de buques, reparaciones y construcción de muelles, barcos deteriorados, como también las construcciones de estos. También se ha producido un vigoroso crecimiento en su aplicación en trabajos de estructuras, en la reparación de barrenos, tubería de conducción y equipos de producción.

Sin embargo, la soldadura húmeda, siempre ha sido vista como una unión deficiente en relación con aquellas realizadas en la superficie, pero en contradicción con esto la soldadura húmeda es el proceso más extensamente usado para reparaciones submarinas, su versatilidad y rápido manejo provee una alternativa viable a los métodos tradicionales para reparaciones; los sistemas de soldadura submarinas pueden ser movilizados en horas o pocos días y se pueden emplear en estructuras o buques que se mantienen operando, evitando entonces la detención del servicio.

Su incremento ascendente comienza a partir del siglo pasado debido a la demanda originada por la industria petrolífera en alta mar (Offshore), en estructuras sumergidas con tuberías. Figura 1.1

Desde entonces, casi todas las tareas de soldadura húmeda fueron realizadas por personas que han perfeccionado su aplicación en este medio. En el Golfo de México se encuentran gran cantidad de plataformas debido a los yacimientos de petróleo y gas. Petróleos Mexicanos (PEMEX) cuenta con aproximadamente 4,270 pozos en explotación y con 167 plataformas marinas, las cuales debe mantener en buenas condiciones siendo la soldadura bajo el agua una técnica para poder seguir siendo la empresa más grande de México y una de las diez empresas petroleras más grandes del mundo.



**Figura 1.1** Proceso de soldadura por MMAW en pierna de plataforma<sup>[1]</sup>

La reparación de ductos debido al adelgazamiento de espesor por corrosión entre otros, comúnmente es efectuado por inspectores, a veces, localizan defectos críticos que necesariamente se deben de reparar o remplazar alguna parte o sección de tubería por lo que es de vital importancia mantener en buenas condiciones a los mismos, los materiales involucrados en estos

ambientes generalmente para tubería de conducción son de la familia de los API 5L, si bien la soldadura seca es la técnica predominante en general, la soldadura submarina es, en muchas ocasiones el único método a emplear para solucionar un problema en medio húmedo.

Los resultados obtenidos generalmente no fueron favorables, esta es la razón por la que la producción de soldadura en este medio no fue considerada sino hasta hace poco como una opción conveniente, debido a las dificultades de cumplir con las especificaciones y requerimientos de los clientes, su alcance entonces era limitado.

Esta limitación en un campo tan necesario por desarrollar, llevó a que las tres partes involucradas en este tema: La Sociedad Americana de Soldadura (AWS por sus siglas en inglés), las escuela de Buzos / Soldadores y los fabricantes de soldadura, intercambiaran información para permitir el desarrollo de este campo.

Gran parte de esta dificultad para cumplir con dichas especificaciones, es justamente por los inconvenientes que se le presentan al buzo/soldador en conseguir cordones de soldadura aceptables, soldados bajo condiciones adversas como: poca visibilidad, dificultad en conseguir un arco de soldadura estable, elevado grado de humedad, presión, etc., todo esto debido a que, el medio que rodea al buzo/soldador es muy diferente al que rodea al soldador en superficie.

Para esto se consideró imprescindible una adecuada preparación y capacitación del buzo / soldador, de tal manera que se instruya a esta persona en las técnicas y conocimientos adecuados para el medio en que se piensa desarrollar el trabajo de soldadura; todo esto llevó a tener un personal mucho más capacitado y el resultado final es una apreciable mejora en la calidad de la

soldadura bajo agua, sin embargo no es una tarea fácil y por lo tanto seguía siendo muy poco viable el desarrollo de la soldadura bajo agua.

Fue entonces cuando los fabricantes de soldadura decidieron tener un papel protagonista en la solución de este problema, volcando su conocimiento a la investigación y desarrollo de electrodos (consumibles) que permitan obtener mejores resultados que los conseguidos hasta ese momento por aquellos electrodos para soldadura húmeda existente.

Actualmente en países como Estados Unidos y Canadá se imparten permanentemente cursos de entrenamiento intensivos para buzos comerciales, a cargo de personal altamente capacitado y experimentado con una duración que alcanza aproximadamente las 30 semanas, comenzando por los sistemas de corte y luego con los procesos de soldadura húmeda, examinando la calidad obtenida. El resultado de este entrenamiento son 300 buzos comerciales capacitados cada año, el 90% de ellos será contratado para reparaciones y mantenimiento de plataformas petrolíferas <sup>[1]</sup>.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el desarrollo microestructural del acero API – 5L – X52 unido por el proceso MMAW en ambientes marinos.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- I. Estudiar los procesos de soldadura aplicados en ambientes marinos.
- II. Realizar el estado del arte del proceso MMAW.
- III. Caracterización del metal base.

- IV. Desarrollar, caracterizar y analizar la uniones de probetas de acero API – 5L – X52 por el proceso MMAW.
- V. Analizar cuáles son las variables de mayor influencia e interacción con las propiedades mecánicas de la unión soldada.
- VI. Estudiar el comportamiento de los diferentes parámetros con respecto al espesor de la zona afectada por el calor.
- VII. Escritura y defensa de Tesis.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Una de las principales razones de la realización de este estudio es la necesidad de ampliar el conocimiento en la rama de la soldadura submarina debido al constante uso y aplicación en el sector petrolero, la poca eficiencia que se ha desarrollado en cuestión de calidad de las mismas, surge la necesidad de aportar al medio productivo y científico una propuesta para predecir el comportamiento microestructural presente en la soldadura y zona afectada por el calor que se presentarían en los aceros API 5L X52 evaluando su comportamiento mecánico al manipular los parámetros en una reparación de tubería en medios marinos.

### **1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente en México se carece de especialistas en soldadura aplicada en ambientes húmedos, lo que nos pone en desventaja internacional. Pemex, la empresa más grande de México, requiere de personal especializado y capacitado, que permita afrontar los problemas inherentes, como se presentan en la actualidad el tema de extracción de los recursos a mayores profundidades.

Por ello se plantea la necesidad de desarrollar conocimientos en el tema de soldadura en ambientes marinos específicamente del proceso MMAW.

El conocer cómo afectan los parámetros de soldadura del proceso MMAW en las uniones de fabricación y reparación de tubería de conducción de aceros tipo API 5L X52.

## **1.5 HIPÓTESIS**

En base a la manipulación de parámetros de operación es posible que la calidad de la soldadura mariana puede ser mejorada al estandarizar los procedimientos de aplicación de esta, lo cual ayudaría a cumplir con los criterios de aceptación de la soldadura marina incrementando su aceptación en esta aplicación.

## **1.6 LÍMITES DEL ESTUDIO**

Realizar pruebas de soldadura en acero API 5L X52 por el proceso MMAW a tres diferentes profundidades y analizar la influencia de los distintos parámetros evaluados en sus propiedades microestructurales y propiedades mecánicas de este tipo de tubería reparada en ambientes marinos.



# CAPÍTULO 2

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1 SOLDADURA APLICADA EN AMBIENTES MARINOS

El proceso de unión bajo el agua se divide en dos grandes ramas, la soldadura bajo el agua en un ambiente húmedo y la soldadura bajo el agua en un ambiente seco, este último con el apoyo tanto de cámaras o hábitats como de boquillas especiales, mediante los cuales se logra retirar el agua de la zona a soldar. Cuando se habla de soldadura en ambiente húmedo, debe entenderse como a aquella en la que el arco eléctrico de soldadura y la parte a soldar se encuentran rodeados completamente de agua.

En este proceso se involucran diversas variantes a las que se harán mención, dentro de éstas se encuentran la profundidad de trabajo, la presión, las características del metal de aporte, el tipo de metal base, las clases de uniones, la corriente, el voltaje, entre otros.

Dentro de este trabajo se encuentra información acerca de la problemática de la soldadura bajo el agua, los diferentes procesos de soldadura, así como la información obtenida del diseño de experimentos con la

realización de cupones soldados mar adentro a tres diferentes profundidades. Lo anterior evaluando el comportamiento microestructural de las uniones soldadas con diferentes parámetros de soldadura analizando y encontrando las mejores propiedades tanto microestructurales como mecánicas.

## **2.2 SOLDADURA SECA**

Con este término se conoce a la aplicación de soldadura 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 como se menciona a continuación.

**2.2.1 SOLDADURA EN HÁBITAT SECO.** Realizada en un ambiente de presión de agua en una cámara de gran tamaño que le permite al buzo especialista encontrarse en un ambiente totalmente seco, lo cual implica que el soldador pueda trabajar sin el traje de buceo puesto. Para desalojar el agua de la cámara es inyectado gas a presión dentro del hábitat <sup>[2]</sup>.

**2.2.2 SOLDADURA DE CÁMARA SECA.** En esta aplicación el espacio en el que se localiza el área a ser soldada se encuentra seca. El especialista coloca la cabeza y hombros dentro de la cámara para realizar la aplicación, en este caso el buzo mantiene su equipo de buceo completo <sup>[2]</sup>.

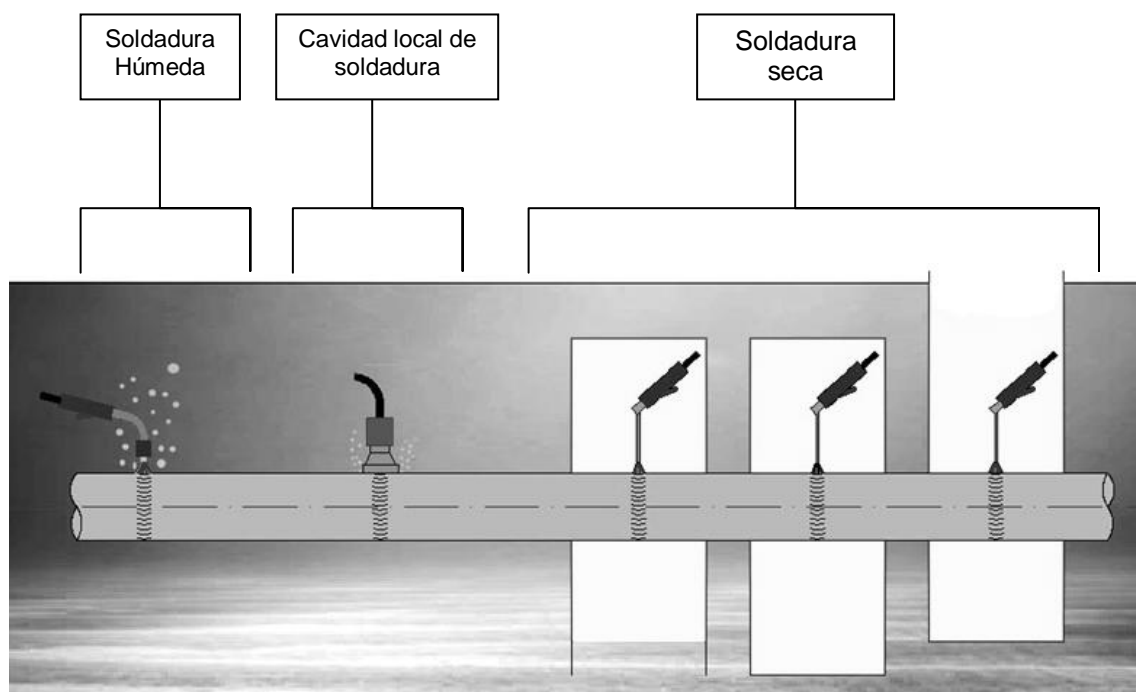
**2.2.3 SOLDADURA DE PUNTO SECO.** Para esta aplicación se desaloja el agua por medio de gas, adecuando un pequeño espacio donde el especialista soldador introduce el brazo para realizar la operación de soldadura. <sup>[2]</sup>

**2.2.4 SOLDADURA AUTOMATIZADA.** Es llevada a cabo 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 <sup>[2]</sup>.

## 2.3 SOLDADURA HÚMEDA.

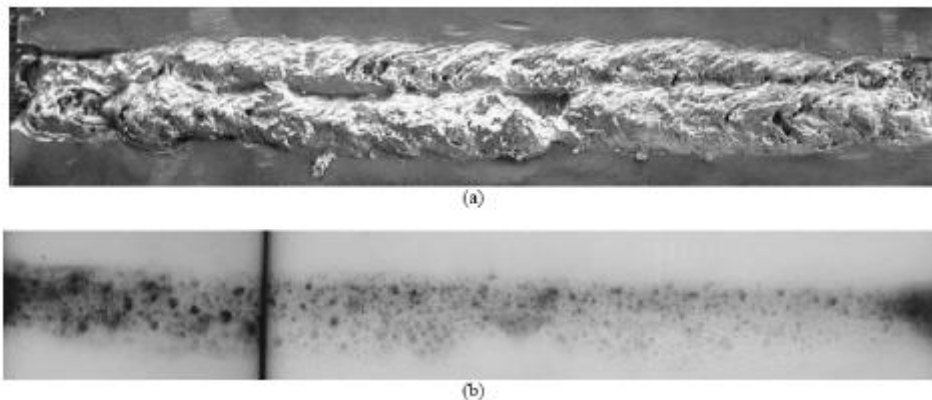
Este tipo de soldadura se realiza en ambiente acuático, ya sea marino o bien en algún otro cuerpo de agua, en el cual la presión del agua actúa sobre el cuerpo del buzo soldador y no existe una barrera física entre el arco eléctrico y el agua; este tipo de soldadura es la de mayor uso en aplicaciones subacuáticas, al ser la más versátil, sin embargo, es la que presenta mayores problemas para su aplicación y menor calidad <sup>[2]</sup>. La clasificación de las técnicas de soldadura submarina es representada en la figura 2.1.



**Figura 2.1** Técnicas utilizadas en la actualidad de soldadura marina <sup>[1]</sup>

La simplicidad del proceso hace posible soldar incluso geometrías complejas de las estructuras <sup>[3,4,5,6]</sup>. Más adelante de este trabajo se mostrarán comúnmente las técnicas de soldadura húmeda con MMAW con electrodo

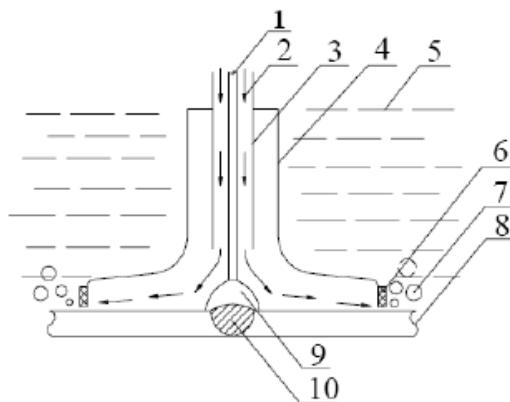
recubierto que es considerado un método más versátil y económico en operaciones bajo el agua. La soldadura húmeda con electrodo recubierto en el proceso MMAW se lleva a cabo perfectamente a profundidades operables hasta 100m. El agua es el medio ambiente para llevar a cabo la velocidad de enfriamiento de las soldaduras húmedas y ésta es mucho mayor que en las soldaduras aplicadas en seco. Durante el enfriamiento, en el intervalo de temperaturas de 850°C a 450°C, se puede producir la precipitación de fases frágiles si no se adoptan otros tipos de precauciones y puede pasar de 414 a 56° C/seg <sup>[7]</sup>. Esto causa la pérdida de ductilidad de metal soldado y la zona afectada por el calor (ZAC). Las soldaduras húmedas realizadas por lo general contienen altos porcentajes de porosidad figura 2.2



**Figura 2.2** Soldadura húmeda de ranura en V depositada a 100m de profundidad (a) su imagen en radiografía imagen (b). <sup>[8]</sup>

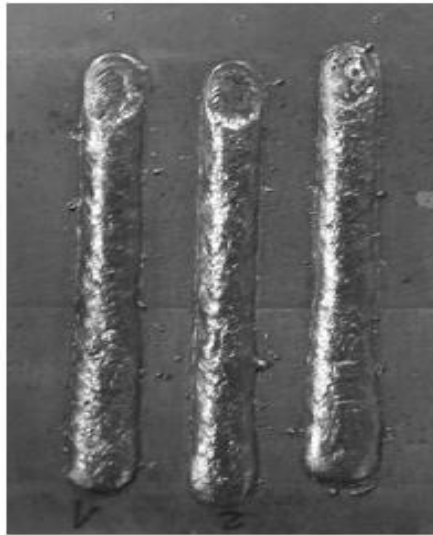
La porosidad puede ser formada por hidrógeno molecular, monóxido de carbono o vapor de agua <sup>[9,10,11]</sup>. Los poros están presentes en toda la extensión de la soldadura <sup>[6,9,10,11]</sup>. Los principales factores que afectan este fenómeno son la profundidad del agua, la cubierta del electrodo y la estabilidad del arco <sup>[6]</sup>. Durante los últimos años la calidad de las soldaduras húmedas ha sido mejorada, existen en el mercado electrodos modernos como el “Black Beauty”<sup>[23]</sup>, tubulares de tipo especial para garantizar la buena calidad de la soldadura en las juntas soldadas <sup>[4,12,13]</sup>.

La soldadura por el método de cavidad local es posible gracias al empleo de equipos semiautomáticos y automáticos de soldadura por arco metálico con protección de gas (GMAW, por sus siglas en inglés), instrumentos adicionales como boquillas exteriores y cubierta elástica se muestran en la figura 2.3.



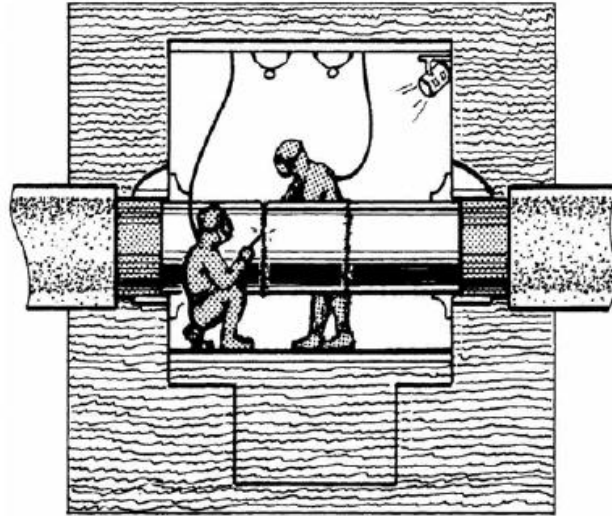
**Figura 2.3** Método de soldadura local (1) tobera de soldadura, (2) electrodo, (3) gas de protección, (4) boquilla exterior, (5) agua, (6) cubierta elástica, (7) burbujas de gas, (8) elemento soldado, (9) arco y (10) soldadura <sup>[13]</sup>.

El método de cavidad local en condiciones de enfriamiento, es casi similar a las que existen durante la fabricación de una soldadura enfriada al aire. Los resultados para la determinación de hidrógeno difusible indican que la cantidad de hidrógeno en el metal de soldadura se encuentra en el rango de 5 a 21ml/100gr de Fe y depende de los parámetros de soldadura, especialmente de la tasa de flujo del gas de protección <sup>[13]</sup>. Las propiedades de las soldaduras realizadas con el uso de cámaras secas son reportadas en la literatura <sup>[6,8,9]</sup> de mejor calidad que las soldaduras obtenidas en húmedo para los requerimientos a profundidades de 200 m. En la figura 2.4 se presenta un ejemplar de los cordones de soldadura obtenidos por el método de cavidad local. Las principales desventajas del método es la falta de posibilidad de la observación del proceso de soldadura. Los procesos de cavidad local se pueden utilizar para reparaciones de tubería cuando esta presenta corrosión por picadura con la aplicación de soldadura por rayo láser como fuente de calor <sup>[12]</sup>.



**Figura 2.4** Soldaduras obtenidas por el método de soldadura de cavidad local <sup>[13]</sup>.

La soldadura en seco conocida también como hiperbárica (ver figura 2.5) es generada a presión de una atmosfera en una cámara donde el agua es desplazada con aire o mezclas de gases, dependiendo la profundidad. Las soldaduras en seco en comparación con las obtenidas en húmedo son de mejor calidad, pero un equipo de soporte es requerido e involucra costos relativamente altos <sup>[15]</sup>. Sin embargo, las propiedades mecánicas son iguales o similares a las soldaduras realizadas en húmedo. Un costo estimado y el tiempo para realizar soldaduras en seco es casi similar a las reparaciones de soldadura húmeda <sup>[3]</sup>. En condiciones secas hay la posibilidad de utilizar todos los métodos estándar de soldadura los cuales son <sup>[15]</sup>: Soldadura de Arco Metálico Protegido SMAW por sus siglas en inglés (Shielded Metal Arc Welding), Soldadura de Arco Metálico con Protección de Gas GMAW por sus siglas en inglés (Gas Metal Arc Welding), Soldadura por Arco con Núcleo Fundente FCAW por sus siglas en inglés (Flux Core Arc Welding), y Soldadura de Tungsteno con protección de Gas GTAW por sus siglas en inglés (Gas Tungsten Arc Welding). La máxima profundidad usada en soldadura manual hiperbárica es de 300 m <sup>[15]</sup>.



**Figura 2.5** Soldadura submarina en condición seca <sup>[2]</sup>.

## 2.4 SOLDADURA MANUAL DE ARCO METÁLICO

El proceso de soldadura manual de arco metálico (MMAW por sus siglas en inglés “Manual Metal Arc Welding”) es utilizado, básicamente, para soldaduras hiperbáricas en aguas de moderada profundidad (100 – 200 m) y para soldaduras en ambiente húmedo a bajas profundidades. El material de soldadura es depositado a través de un electrodo de acero recubierto del tipo “básico” (electrodo de bajo hidrógeno) <sup>[6]</sup>.

Este recubrimiento contiene aproximadamente 30% de carbonato de calcio en general para todos los recubrimientos de este tipo. Un arco eléctrico es mantenido entre el electrodo y la pieza de trabajo, durante la soldadura, el recubrimiento se descompone hasta formar gases de monóxido y dióxido de carbono así como de óxido de calcio que cubre el metal fundido.

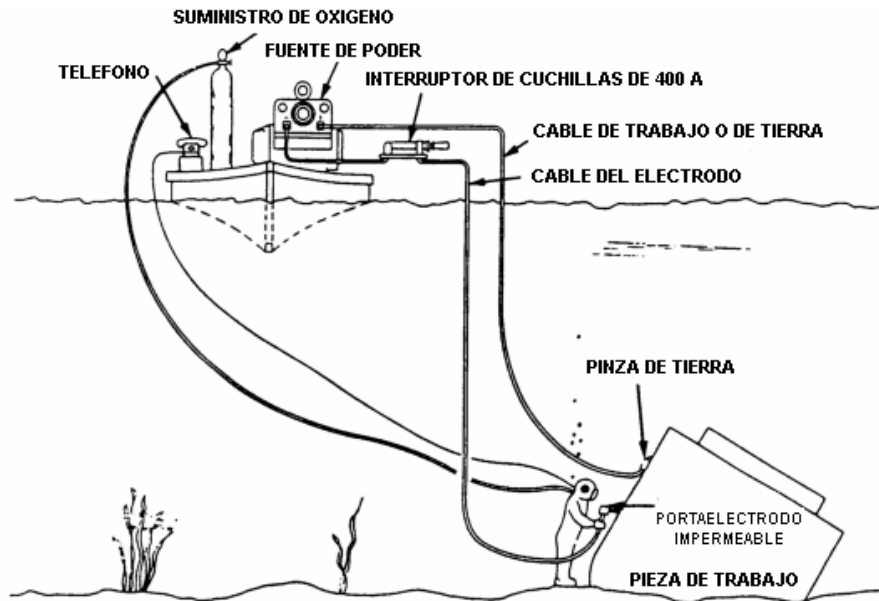
Las condiciones son menos favorables con el incremento de la profundidad y es por eso que los procesos de soldadura y los soldadores deben

ser calificados en profundidades simuladas a fin de asegurar la calidad del trabajo en sitio <sup>[18]</sup>.

La soldadura húmeda subacuática produce calor por el arco eléctrico generado entre un electrodo metálico – revestido con fundente y material resistente al agua - y la pieza de trabajo. En el centro del arco un intenso calor hace que un 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 acuoso. Esa reacción produce desprendimiento de gases, los cuales crean 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 este proceso involucra, que una vez conectados los cables a la fuente de poder, se establezca la polaridad, generalmente se utiliza electrodo al negativo, montado el interruptor de seguridad entre la pinza y la fuente, al momento de colocar un electrodo nuevo en la pinza porta electrodos es necesario 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. En la figura 2.6 se ilustra de forma esquemática el proceso de MMAW.





**Figura 2.6** Componentes del proceso de soldadura manual por arco <sup>[1]</sup>

El electrodo está constituido por un alma metálica, de forma cilíndrica y revestimiento, durante la fusión, el revestimiento se funde en conjunto con el alma metálica y produce una escoria sobre el cordón, la que sirve de protección. 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, llámese rectificador, transformador o máquina rotativa.

En la soldadura subacuática, el uso de corrientes más altas que las que se emplean en las soldaduras al aire, combinado con la conductividad eléctrica del agua, requiere la observación estricta de toda clase de precauciones de seguridad para evitar el choque eléctrico o descarga eléctrica <sup>[2]</sup>.

## 2.5 ELECTRODOS PARA APLICACIONES ACUÁTICAS

Un electrodo es la varilla que conduce corriente y que soporta al arco establecido entre ésta y la pieza de trabajo y que puede o no suministrar metal de aporte. Como metal de aporte se debe entender como el metal que se agrega al hacer una junta soldada. Los electrodos se clasifican por su revestimiento en cinco tipos <sup>[1]</sup>:

**CELULÓSICO.** Este electrodo contiene en su revestimiento 45% de celulosa. El arco eléctrico del electrodo calienta el recubrimiento descomponiendo la celulosa en CO, CO<sub>2</sub> y vapor de agua. Este tipo de electrodo forma poca escoria, efecto causado por la capa gaseosa de recubrimiento.

**BASE RÚTILO.** Se destaca por su tipo de acabado y facilidad de manejo, de escoria se remueve fácilmente y en algunos casos se remueve sola.

**BAJO HIDRÓGENO.** Este tipo de electrodo produce las soldaduras de más alta calidad debido a su bajo contenido de carbono e hidrógeno. Algunos de sus componentes del revestimiento son el carbonato de calcio, que absorbe y neutraliza impurezas del azufre, y el manganeso que liga al azufre evitando sulfuros.

**ÓXIDO DE FIERRO.** Este electrodo se caracteriza por su tipo de escoria líquida y su alta velocidad de depósito y limpieza. Posee un alto contenido de manganeso.

**POLVO DE FIERRO.** Este electrodo contiene un 50% de fierro en su revestimiento.

La evolución de la industria de la soldadura bajo el agua en ambiente húmedo, ha envuelto el desarrollo de muchos electrodos, algunos de los cuales

son comercialmente disponibles y otros restringidos para el uso del inventor. La industria ha usado electrodos, disponibles en el mercado, que no han sido modificados para aplicaciones submarinas excepto por el recubrimiento a prueba de agua. Para soldaduras ferríticas, la gran mayoría de los electrodos usados, tanto comerciales como privados, son del tipo AWS A5.1 E-60XX o E-70XX. Los dos electrodos más usados son E-6013 y E-7014. No obstante, existen diferencias significativas de proveedor a proveedor en tales electrodos. El núcleo del alambre para los electrodos E-60XX o E-70XX es normalmente la misma composición química, por ejemplo, acero de bajo contenido de carbono con adiciones controladas de Mn y Si y normalmente valores bajos de S y P. Adiciones menores de otros elementos tales como Ni, Cr, Mo, Cu y V pueden hacerse para obtener los requerimientos de resistencia de las especificaciones. Cada fabricante de electrodos ha desarrollado su propia cubierta de fundente.

Estos recubrimientos de fundente pueden contener una gran cantidad de minerales y componentes que son intencionados para producir la escoria, desoxidar el charco fundido, modificar la viscosidad de la escoria, estabilizar el arco, descomposición en el arco para formar un gas protector y añadir menos elementos aleantes. Los productores formulan su propio recubrimiento y guardan su fórmula cuidadosamente.

Existe información en general sobre electrodos comerciales y electrodos privados, muchos de los cuales han sido calificados de acuerdo a la norma AWS D3.6 <sup>[22]</sup> y que comparan los resultados obtenidos de un tipo de electrodo con otro.

Dado el alcance de los electrodos ferríticos se pueden hacer los siguientes comentarios:

- Soldaduras en ambiente húmedo siempre mostraran mayor dureza en el metal de soldadura y en la zona afectada por el calor cuando se comparan con las soldaduras en ambiente seco.
- La operatividad y los perfiles de cordones resultantes pueden ser satisfactorios.
- El nivel de defectos puede ser mantenido bajo.
- El nivel de porosidad puede variar de un electrodo a otro pero puede ser mantenido en un nivel permitido.
- Los electrodos E-6013 o E-7014 producen la mejor operatividad, es por eso que son los electrodos más usados en la industria.
- Variedad de electrodos y sus recubrimientos pueden producir diferente operatividad, estabilidad del arco, perfiles de cordón, penetración, porosidad, que afectan la resistencia a la tensión, ductilidad y tenacidad.
- Menores cambios en la composición del fundente pueden alterar los resultados. La reducción del contenido de aleantes al núcleo del alambre o al revestimiento del fundente podría beneficiar a la producción de propiedades mecánicas superiores <sup>[22]</sup>.

Como se ha venido mencionando, los electrodos que normalmente se usan, cumplen con la clasificación AWS E6013, AWS E7014, AWS E7018 y deben de ser impermeables. De acuerdo a las normas, la E indica que es un electrodo para soldar con arco metálico protegido, el primer par de números indica la resistencia máxima en miles de libra por pulgada cuadrada (ksi), el tercer número indica la posición de soldadura, para las cuales el número "1" dice que el electrodo puede ser empleado en toda posición; y el último número

indica el tipo de recubrimiento y las condiciones de operación como es observado en la figura 2.7. En este caso, se tienen los números 3 que indica que el recubrimiento es “rutilico potásico”, el 4 es “Rutilico con polvo de Fe” y el 8 indica que el recubrimiento es de “bajo hidrógeno con polvo de Fe”.

Letra "E"	Dos o tres primeros dígitos	Penúltimo dígito	Numeración	Dos últimos dígitos					Letra Grupo de aleación	Número Aleante principal
				Corriente	Polaridad	Revestimiento	Arco	Penetración		
Electrodo para soldar con arco metálico protegido (Electrica SMAW)	Resistencia mínima a la tensión del cordón depositado en miles de libras por pulgada cuadrada	Posición ideal de soldadura 1= Todas las posiciones 2= Plana y filete horizontal 3= Plana	xx10	CD	PI	Celulosa-Sodio	Energico	Alta	A-1	Molibdeno
			xx11	CA-CD	PI	Celulosa-Potasio	Energico	Alta		
			xx12	CA-DD	PD	Rutilo-Sodio	Medio	Mediana		
			xx13	CA-CD	PD-PI	Rutilo-Potasio	Suave	Ligera	B-1	Cromo-Molibdeno
			xx14	CA-CD	PD-PI	Rutilo-Polvo Fe	Suave	Ligera	B-2	
			xx15	CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-1	Niquel
			xx16	CA-CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-2	
			xx18	CA-CD	PI	Bajo Hidrogeno	Medio	Mediana	C-3	
			xx20	CA-CD	PD-PI	Oxido de Hierro	Medio	Mediana	D-1	Molibdeno
			xx24	CA-CD	PD-PI	Rutilo	Medio	Mediana	D-2	
			xx27	CA-CD	PD	Polvo de hierro	Medio	Mediana	M-	Militar
			xx28	CA CD	PI	Bajo hidrogeno	Suave	Ligera	S-	No clasificado

Figura. 2.7 Clasificación AWS de los electrodos [22].

En el reporte titular sobre “consumibles para soldar y su soldabilidad” [1] los autores agrupan la información disponible sobre consumibles en las siguientes categorías:

El efecto en la soldadura húmeda en las propiedades del metal soldado resultante. Ventajas y desventajas de usar consumibles de tipo estándar en la soldadura húmeda.

El comportamiento (tanto operacional como desde el punto de vista de las propiedades del metal soldado) de los tipos estándar de la generación de escoria, respecto uno del otro.

En el trabajo el término “tipos estándares de consumible” es usado para referirse a productos diseñados para soldar en la superficie (aire) o debajo de la

protección del gas a la presión atmosférica. El desarrollo de fórmulas para recubrimiento para electrodos cubiertos ha sido un proceso muy importante desde que se concibió este producto. El ejemplo al que se hace referencia es el estándar AWS 5.1, que cubre notablemente estos productos que han sido usados hasta ahora para llevar a cabo soldadura bajo el agua tanto en situaciones experimentales como en situaciones prácticas. Esas clasificaciones, con algunas variantes, han permanecido básicamente sin cambios con respecto a la clasificación y designación de los tipos de recubrimiento y/o escoria <sup>[22]</sup>.

## **2.6. ELECTRODOS ESPECIALES.**

Existen algunas empresas que fabrican electrodos especiales para hacer soldaduras bajo el agua, y también existen otras opciones de electrodos comerciales que tienen más de un recubrimiento a prueba de agua. Uno de estos electrodos recibe el nombre de “BARRACUDA” fabricado por la empresa M.O.S. North America Welding Skills Inc. Este tipo de electrodos fueron probados y las soldaduras examinadas, las cuales cumplieron con los requerimientos que establece la norma AWS D3.6 para las soldaduras Clase B, y también cumplieron con los estándares de las soldaduras Clase A en base a la calidad inspeccionada con rayos X <sup>[23]</sup>.

De igual forma, existen investigadores que han realizado trabajos con electrodos con el fin de mejorar la calidad de las soldaduras depositados en las estructuras de plataformas bajo el agua. Uno de ellos es el de Chon Tsai, que desarrolló un nuevo electrodo llamado “Black Beauty” <sup>[23]</sup>, nombre que se le dio por su apariencia de color negro que le da el recubrimiento a prueba de agua.

El “Black Beauty” ha demostrado su potencial para sobrepasar muchos problemas relacionados con la soldadura bajo el agua, incluyendo el pobre perfil de soldadura, microgrietas, características de operación indeseables y una

aparición pobre de la soldadura. El electrodo mostró las siguientes características:

1. Excelente apariencia y un buen perfil de soldadura, haciendo de ellas menos propensas a la fractura mientras se encuentran en servicio.
2. Eliminación de las microgrietas del metal depositado.
3. Características de operación superiores en comparación con otros electrodos comercialmente disponibles. El electrodo produce resultados satisfactorios cuando se suelda en cualquier posición, mientras que otros electrodos están limitados a una sola posición de soldeo.

El electrodo desarrollado creó mayor eficiencia en los procesos de soldadura húmeda. Aunado a que son más económicos en relación a los electrodos comercialmente disponibles.

En México la clasificación de electrodos está dada por la Sociedad Americana de Soldadura, y es la que más amplia difusión tiene.

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, 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 anteúltima 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 se agregan a continuación, indican que los electrodos tienen elementos aleados en el revestimiento, los cuales se depositarán en el cordón soldado.

## **2.7 PROBLEMÁTICA DE LA SOLDADURA BAJO EL AGUA**

Los problemas del proceso de la soldadura bajo el agua se pueden dividir en dos; aquellos presentes en ambientes húmedos, es decir la que se realiza en un medio acuoso, y los que se manifiestan en un hábitat o cámara para soldar.

En esta sección, se hará referencia a los problemas o factores importantes que intervienen dentro del proceso de soldadura húmeda y que pueden ocasionar una deficiente calidad de las soldaduras. Algunos de estos problemas se deben comúnmente a la transferencia de calor, la visibilidad del soldador, la presencia de hidrógeno en la atmósfera del arco, la presencia de vapor metálico durante la soldadura, entre otros <sup>[24]</sup>.

Se presentarán a detalle algunos de los problemas mencionados.

### **2.7.1 DIFICULTADES EN UN MEDIO HÚMEDO.**

Las propiedades mecánicas de las soldaduras realizadas bajo el método de la soldadura húmeda se ven afectadas y alteradas debido a que se hace en un medio acuoso. Cuando el metal base y el arco se encuentran rodeados de agua, no existe acumulación de calor y, por lo tanto, tampoco un aumento de temperatura en el metal base, lo que ocasiona un efecto de templado, afectando directamente las propiedades de la soldadura y reduciendo la calidad de la misma. El hecho de la descomposición del agua y del rápido enfriamiento



de la zona en donde es aplicado el calor, son factores responsables de muchos problemas. Existen también otros factores que afectan las propiedades mecánicas como es la presión ejercida por el agua, la forma en que se realizan las uniones, el tipo de recubrimiento del electrodo y las variables mismas del proceso de soldadura.

En relación a los problemas que se presentan con las uniones de soldadura bajo el agua, se encuentran los siguientes:

- Fragilización en el zona afectada por el calor del metal base.
- Fragilización por hidrógeno en el metal de soldadura.
- Porosidad en el metal de soldadura.
- Fragilización por solidificación de la soldadura.

Respecto a la fragilidad, esta depende directamente de la estructura, tanto del metal base como del metal de soldadura, la cual se ve afectada por la composición química y por la velocidad de enfriamiento.

Referente a la composición química, el alto carbono equivalente (CE) del acero es perjudicial, pues puede ocasionar la fragilización en la zona afectada por el calor <sup>[30]</sup>. Se define al carbono equivalente como la forma de describir la composición química por medio de un número, con la finalidad de analizar cómo las variaciones de la misma influyen en el comportamiento del material, orientado a brindar información sobre diversos aspectos como pueden ser:

- La templabilidad del acero (tendencia a formar martensita)
- La sensibilidad de los aceros a la fisuración en frío.
- La evaluación de las propiedades durante el servicio.

Además, que el criterio empleado mediante el carbono equivalente (CE) es que cuanto más alto sea su valor, el acero tendrá mayor dificultad para ser soldado.

De acuerdo a esto, muestra una clasificación de la soldabilidad de los aceros en función de su CE:

1. Aceros con  $CE < 0.2-0.3\%$  tienen buena soldabilidad.
2. Aceros con  $CE > 0.4\%$  tienen riesgo de fisuración en frío en la zona afectada por el calor.

Para el cálculo del CE existen varias fórmulas, pero la más usada es la propuesta por el Instituto Internacional de Soldadura (IIW) (ecuación 2.1) que se expresa de la siguiente manera:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \dots\dots\dots (2.1)$$

En relación a la velocidad de enfriamiento, ésta se ve afectada ya que en presencia del agua, el enfriamiento es mucho más rápido que en condiciones secas, lo anterior debido a que el calor se pierde por conducción principalmente al estar en contacto con el agua y después por convección, por lo tanto este efecto influye sobre la estructura metalúrgica y las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor, en la Figura 2.8 se muestran las diferentes regiones del área soldada <sup>[24]</sup>.

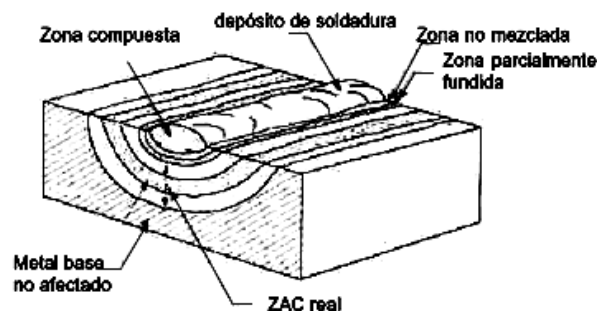
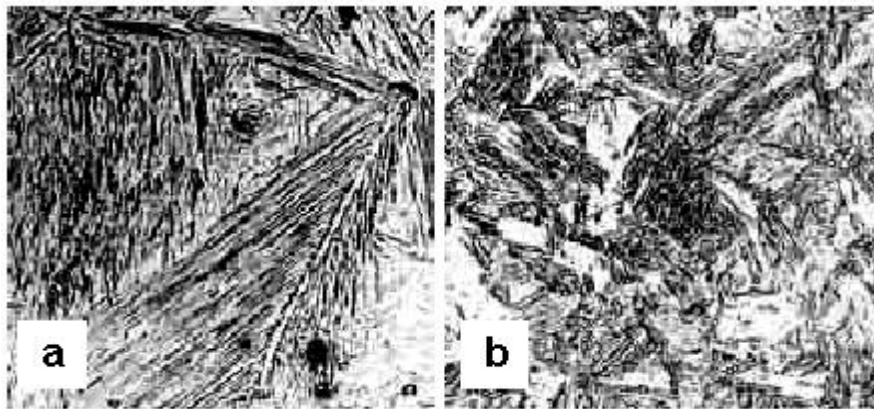


Figura. 2.8 Zona afectada por el calor <sup>[24]</sup>.

Este rápido enfriamiento puede influir en la formación de la microestructura martensita y bainita en el acero estructural convencional. Chon Tsai y colaboradores <sup>[22]</sup> menciona que al incrementar las velocidades de enfriamiento, la microestructura del acero presenta un nuevo constituyente llamado “bainita” que tiene una forma acicular y que es un constituyente de mayor dureza que la perlita pero mucho más tenaz (absorbe mejor las cargas de impacto) y que aumentando aún más la velocidad de enfriamiento, se presenta un nuevo constituyente más duro que la bainita denominado “martensita” en la Figura 2.9 se observan microestructuras obtenidas en diferentes condiciones. En cuanto a sus propiedades, la martensita es muy dura y muy frágil, lo que la hace susceptible a la fragilización por hidrógeno.



**Figura. 2.9** Microestructuras de un mismo acero de bajo contenido de Carbono, sometido a diferentes tratamientos térmicos de temple. a) estructura bainítica b) estructura martensítica. <sup>[24]</sup>

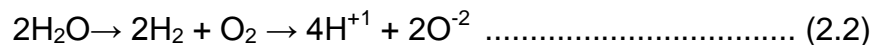
La fragilización del metal base es causada por la simultánea aparición de diversos factores, en los que podemos encontrar:

- Concentración crítica de hidrógeno.
- Creación de concentradores de esfuerzos.
- Temperatura menor a aproximadamente 200 °C.

Haciendo referencia a los dos primeros factores, el hecho de que el proceso se realiza en un medio acuoso, significa que hidrógeno en grandes

cantidades es generado por la descomposición del agua, y automáticamente absorbido por el relleno de soldadura.

En relación a esto, Chon Tsai y colaboradores <sup>[22]</sup> menciona que el hidrógeno puede penetrar al cordón de soldadura de diferentes maneras, la más importante, la humedad en el ambiente, la humedad del material de aporte y del metal base, en este caso, el proceso bajo el agua se encuentra rodeado por agua que al calentarla se transforma en vapor de agua, el cual rodea el arco eléctrico y es calentado a mayor temperatura, provocando así la partición de las moléculas de hidrógeno y oxígeno (ecuación 2.2) y finalmente a temperaturas más elevadas que se encuentran presentes en el arco eléctrico, se produce la disociación de dichas moléculas al estado atómico.



Es en estas condiciones, el oxígeno reacciona con el metal formando óxidos y el hidrógeno podrá penetrar en baño fundido y posteriormente a la zona afectada por el calor.

Al llevarse a cabo la solidificación y la disminución de la temperatura, el hidrógeno es difundido hacia la zona afectada por el calor del metal base causando fragilidad o grietas en dicha zona. Esta difusión del hidrógeno depende directamente de la profundidad del agua, es decir, de la presión, del recubrimiento del electrodo y del calor aplicado.

Con respecto a la fragilización por hidrógeno en la microestructura, como se mencionó anteriormente, la formación de la martensita y la bainita en la zona afectada por el calor, dependerá de la composición química del metal base y metal de soldadura, el calor aplicado, la velocidad de enfriamiento y la presión del agua. Como se sabe, la martensita es un microconstituyente no deseado, ya

que su presencia en la zona afectada por el calor reduce la tenacidad del acero favoreciendo la ruptura frágil.

En cuanto a los factores que ocasionan la fragilidad por hidrógeno en el metal de soldadura, se encuentra que la composición y la estructura del metal de soldadura, juegan un papel muy importante, ya que si la capacidad de endurecimiento del metal de soldadura es mayor que la del metal base, es probable que la descomposición de la austenita ocurrirá primero en la zona afectada por el calor del metal base <sup>[22]</sup>.

Fosca y colaboradores <sup>[24]</sup> menciona respecto a la fragilización por hidrógeno lo siguiente: “Como la solubilidad del hidrógeno en los metales disminuye con la temperatura, conforme se va enfriando la unión soldada algunas de las regiones de la misma se van sobresaturando de hidrógeno, este se ve obligado a difundirse a regiones de la red cristalina que le permitan mantenerse en solución. Estas regiones pueden ser defectos en el cordón como poros, inclusiones no metálicas o pequeñas discontinuidades en la estructura cristalina. Debido a que el hidrógeno en estado atómico es muy inestable tenderán a formar moléculas en el interior de estos defectos. La formación de una molécula de hidrógeno a partir de dos átomos del mismo implica un incremento de volumen notable, pues el tamaño atómico de la molécula es 100,000 veces mayor que la del átomo de hidrógeno. Ello conduce a la generación de elevadas presiones internas (> 100 bar) que someten a esta pequeña región del material a elevados esfuerzos internos que pueden dar origen a la nucleación de una microgrieta. Esta microgrieta crece hasta relajar el estado de tensiones a su alrededor y entonces se detiene. Es aquí cuando se produce nuevamente la difusión del hidrógeno al fondo de la microgrieta provocando un nuevo ciclo de aumento de presión, de tensiones internas y crecimiento de la misma. Cuando la fisura alcanza un tamaño crítico esta se propaga instantáneamente a través de toda la sección provocando la ruptura del elemento. De lo anteriormente expuesto se puede ver que el mecanismo de

fisuración debido a hidrógeno consta de varias etapas: una etapa de nucleación, seguido por un crecimiento lento por el mecanismo de fragilización por hidrógeno y finalmente una etapa de crecimiento muy rápido de la grieta determinada por la tenacidad a la fractura del material. Todo este proceso, especialmente las dos primeras etapas, suele durar horas, días e incluso meses después de ejecutada la soldadura.

De la misma forma, Rafael Quintana Puchol y colaboradores <sup>[34]</sup> hacen mención de los factores que influyen en la fragilización por hidrógeno, el calor de aporte empleado, el nivel de esfuerzos residuales, el nivel de hidrógeno que difunde en el cordón, así como los antes mencionados, la composición química y la estructura del metal.

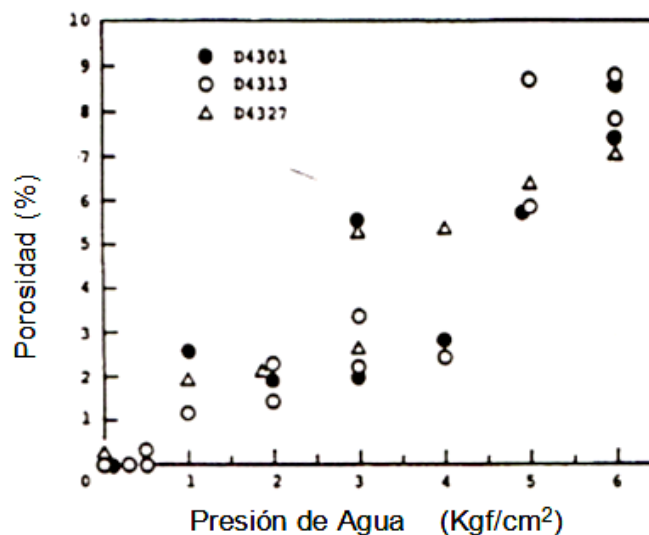
Por otro lado, la baja solubilidad de la ferrita en la zona afectada por el calor, impedirá la difusión del hidrógeno hacia el metal base, lo que ocasiona que aumenten las posibilidades de presentarse la fragilización en el metal de soldadura cuando finalmente se dé la transformación martensítica.

Referente a los esfuerzos residuales, la literatura <sup>[22]</sup> describe que los esfuerzos residuales son aquellos que están presentes en el interior del material y que permanecen en él cuando se eliminan todas las cargas aplicadas. Las tensiones residuales originadas en la región de la soldadura se producen como consecuencia de las diferentes dilataciones y contracciones generadas al calentar localmente el material así como por los cambios dimensionales que son inducidos por las transformaciones microestructurales que se presentan.

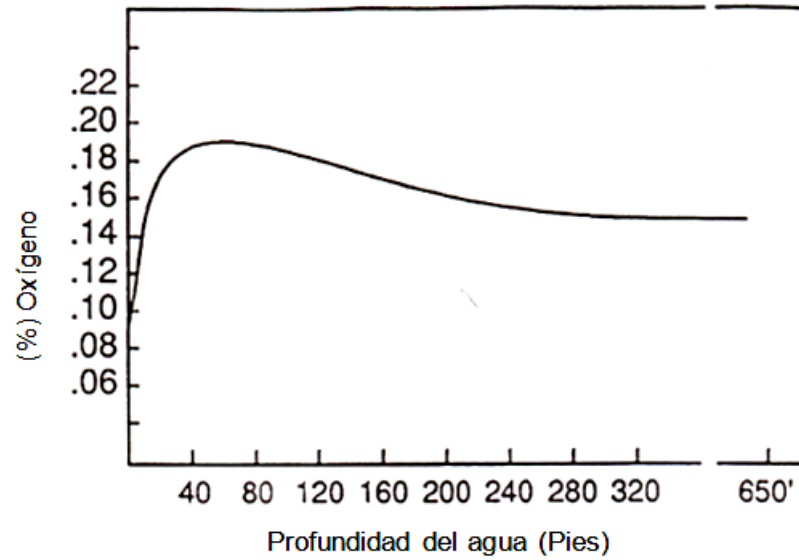
Estos esfuerzos pueden dividirse en dos; macroscópicos y microscópicos, los primeros producidos por el calentamiento de una plancha durante el proceso de soldadura y los segundos los pueden originar las transformaciones microestructurales como la formación de la fase martensítica.

Otro defecto en la soldadura es la porosidad que se presenta en la zona soldada, misma que se origina por la formación de gases que se desprenden en forma de burbujas o que pueden quedar atrapados en el depósito. En cuestión a la cantidad de poros, así como su diámetro que se debe de controlar, esto se encuentra definido dentro de la norma AWS D3.6. Respecto al diámetro, no se permiten poros con más de 5 mm, y los poros que tienen entre 5 y 1.6 mm de diámetro son restringidos a una cantidad de 7 poros por pulgada de longitud y por pulgada de ancho.

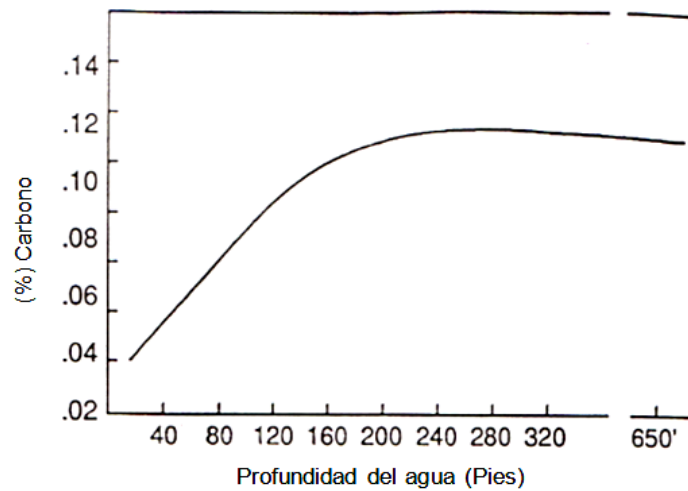
De igual forma, se tiene que los principales factores que afectan a la porosidad del metal de soldadura, son la presión del agua (en relación a la profundidad), la estabilidad del arco y el recubrimiento del electrodo. En la figura 2.10 se muestra el porcentaje de porosidad en relación con la presión que ejerce el agua se puede observar que con los tres tipos de electrodos el comportamiento es similar esto es que a mayor profundidad de trabajo aumenta el contenido de porosidad y la porosidad comienza a partir de los 5 metros de profundidad, en la gráfica 2.11 se muestra el comportamiento del contenido de oxígeno en el metal de soldadura al aumentar la presión y en la gráfica 2.12 se muestra como el contenido de carbono en el metal de soldadura aumenta al incrementar la profundidad del agua.



**Figura. 2.10** Porosidad en función a la profundidad del agua. <sup>[27]</sup>



**Figura. 2.11** Contenido de oxígeno en función a la profundidad. <sup>[27]</sup>



**Figura 2.12** Contenido de carbono en función a la profundidad. <sup>[27]</sup>



Algunos experimentos <sup>[27,34]</sup> que se han realizado relacionados a los efectos que produce la porosidad en las propiedades mecánicas de las soldaduras hechas bajo el agua, muestran que este problema disminuye el módulo de Young, el esfuerzo de cedencia, el esfuerzo a la tensión, la ductilidad y la dureza del metal de soldadura, además de acelerar el crecimiento de grietas <sup>[34]</sup>.

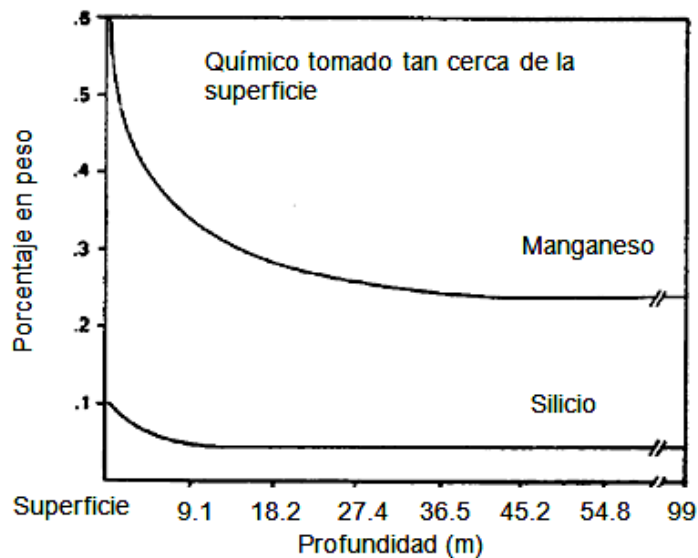
## **2.8 EFECTO DEL MEDIO AMBIENTE BAJO EL AGUA**

Cuando el vapor de agua es expuesto a altas temperaturas en la soldadura por arco, se descompone en oxígeno e hidrógeno que se disuelven en el charco de soldadura. Como en el acero fundido enfriado, la solubilidad del oxígeno e hidrógeno disminuye. El oxígeno puede salir de la solución en forma sólida o líquida, inclusiones de óxido, o gas y puede causar porosidad. El hidrógeno puede formar poros de hidrógeno molecular, reaccionar con el oxígeno para formar vapor de agua, o puede causar fragilización y agrietamiento después de que el metal se enfría. A medida que las profundidades bajo el agua incrementan, la presión hidrostática incrementa una atmósfera por cada 33ft (10m). Para dar una presión molar, la presión parcial del gas incrementa si incrementa la presión total. Las actividades de oxígeno e hidrógeno se incrementan en el charco de la soldadura con la profundidad. El resultado es un cambio en la composición química, estructural y contenido de la porosidad del metal de soldadura con respecto al cambio de profundidad <sup>[26]</sup>.

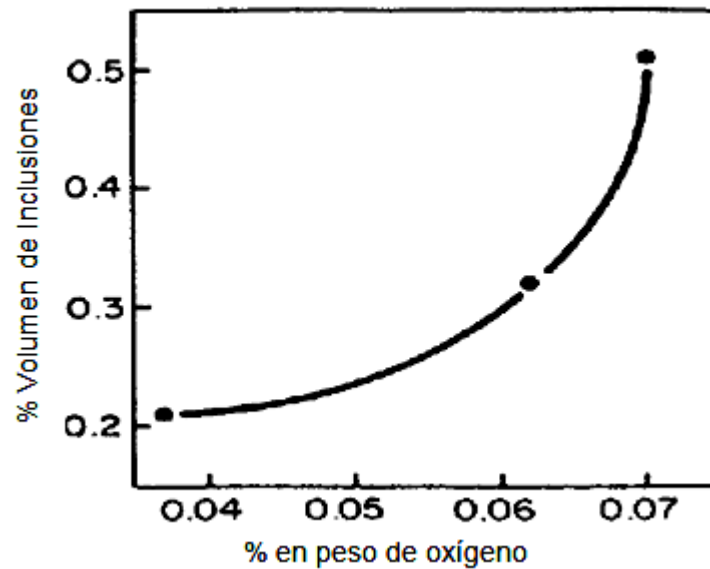
## **2.9 EFECTO DE LA PROFUNDIDAD EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA.**

Elementos con una afinidad al oxígeno son cada vez más separados del metal de soldadura para la formación de escoria y de inclusiones de óxido con la profundidad. Ibarra y colaboradores <sup>[25]</sup> demostraron que las concentraciones de manganeso y silicio disminuyen en el metal de soldadura con la profundidad.

También se menciona que en el metal de soldadura aumenta el contenido de oxígeno con la profundidad. Los datos de Ibarra y colaboradores se presentan en las figuras 2.10 y 2.13. Así mismo se encontró en la literatura <sup>[26]</sup> la relación que existe entre el volumen en por ciento de inclusiones de óxido en el metal de soldadura con el contenido de oxígeno en el metal de soldadura, como se ve en la figura 2.14. Por lo tanto, se puede concluir que el contenido de óxido de inclusiones de las soldaduras húmedas aumenta a mayor profundidad. El efecto neto del incremento en la profundidad es una disminución de la dureza por la pérdida en el contenido de los elementos de aleación y aumento en el contenido de oxígeno <sup>[26]</sup>.



**Figura. 2.13** Efecto de la profundidad del agua en la composición química <sup>[25]</sup>



**Figura 2.14** Efecto del contenido de oxígeno en el metal de soldadura con él % de volumen de inclusiones <sup>[26]</sup>

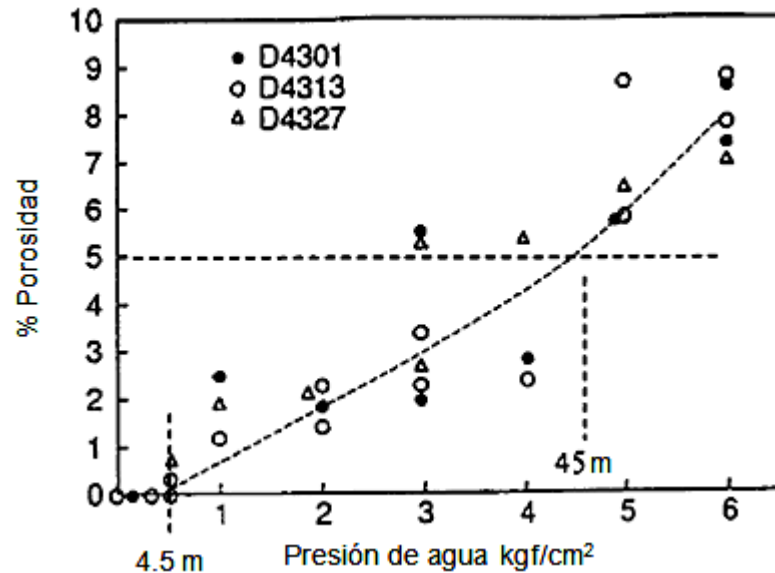
## 2.10 POROSIDAD

La porosidad en soldaduras submarinas húmedas incrementa dramáticamente con el aumento de la profundidad. En la literatura <sup>[27]</sup> se reporta que la porosidad comienza a aparecer en las soldaduras húmedas a profundidades mayores a 4.6 m como es mostrado en la figura 2.15. La porosidad máxima permitida para AWS D3.6 clase B es el 5 %. Se hace más difícil cumplir con las especificaciones de la clase B a mayores profundidades. La soldadura de clase B son adecuadas para aplicaciones estructurales limitadas.

La composición del gas contenido en soldaduras húmedas porosas ha sido analizada y reportada en la literatura. Suga y Hasui <sup>[27]</sup> encontraron que la composición de gas en soldaduras porosas húmedas constituyen el 96% de hidrógeno con pequeñas cantidades de monóxido de carbono. Ando y Asahina <sup>[35]</sup> analizaron el contenido del gas en soldaduras húmedas porosas en depósitos de óxido de hierro, polvo de hierro y altas concentraciones de óxido

de titanio a tres diferentes profundidades. Los resultados del análisis en todos los casos para la composición de gas fueron del 99% de hidrógeno.

La formación de porosidad en soldaduras submarinas húmedas por la concentración de hidrógeno por delante del frente de solidificación fue modelado por Suga <sup>[27]</sup>.



**Figura 2.15** Efecto de la presión ejercida por el agua con respecto a la porosidad encontrada en distintos cupones <sup>[27]</sup>

La velocidad de crecimiento de la burbuja de gas incrementa y el radio crítico disminuye con el aumento inicial de la concentración de hidrógeno y con la disminución de la velocidad de solidificación.

La velocidad de crecimiento de la burbuja de gas disminuye con la presión para burbujas grandes pero incrementa con la presión para las pequeñas. Esto porque el radio crítico de la burbuja de gas disminuye con el incremento de presión.

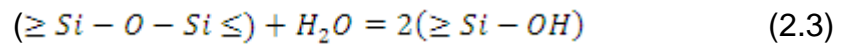
La modificación del contorno del poro cambia de tipo cerrado a cilíndrico y tipo copa con el aumento de la concentración de hidrógeno o con la disminución de la velocidad de solidificación.

El radio crítico es el tamaño mínimo en el que un poro es estable. Un pequeño radio crítico significa que los poros se nuclean más fácilmente. Suga<sup>[27]</sup> predijo que el radio crítico para la formación de poros disminuye con el aumento de presión, el modelo también predice el cambio en la forma de poro que se observa con el aumento de la profundidad (mayor concentración inicial de hidrógeno). Además, el modelo predice que el aumento de las velocidades de recorrido de soldadura debe reducir la porosidad, que aún no se ha demostrado experimentalmente para la soldadura húmeda.

Otros mecanismos para la formación de poros se han propuesto. Basada en el cálculo termodinámico, Liu y colaboradores<sup>[10]</sup> proponen que el oxígeno puede reaccionar con el carbono para producir la porosidad de monóxido de carbono y que el oxígeno puede también reaccionar con el hidrógeno para producir vapor en la porosidad de las soldaduras húmedas. Liu y colaboradores<sup>[10]</sup> llegaron a sugerir que el vapor en los poros puede reaccionar con el hierro que rodean para formar óxido de hierro e hidrógeno, lo que explica la presencia de hidrógeno, y no el vapor de agua, en los poros.

Basado en el supuesto de que la porosidad en las soldaduras submarinas húmedas está causada por el hidrógeno, las técnicas para reducir el contenido de hidrógeno de las soldaduras húmedas también debe ser eficaz para reducir la porosidad. Aumentar el contenido de carbonato de calcio de un recubrimiento del electrodo base-rútulo se ha demostrado que reduce la porosidad en las soldaduras húmedas. Sánchez-Osio y colaboradores<sup>[38]</sup> aumentaron el carbonato de calcio 9 a 15%, lo que redujo la porosidad 2.2 a 1.0% a una profundidad de 9 metros. Los carbonatos se descomponen a partir de dióxido de carbono y monóxido de carbono en el arco, la reducción de la

presión parcial de hidrógeno, reduciendo así la cantidad de hidrógeno absorbido en el baño de soldadura. El vapor de agua se disuelve en escorias de acuerdo a ecuación 2.3 en ácido, y la ecuación 2.4 en básico Turkdogan <sup>[39]</sup>.



La ecuación 2.3 representa el detalle de las redes de silicato por los iones hidroxilo en la escoria ácida. La ecuación de 2.4 representa la reacción de vapor de agua con iones de oxígeno libre en una escoria básica <sup>[39]</sup>.

## 2.11. EFECTO DE LA PROFUNDIDAD EN LA MICROESTRUCTURA

Ibarra y colaboradores <sup>[26]</sup> encontraron que en el metal de la soldadura el oxígeno aumenta con la profundidad hasta alrededor de 2000 ppm a 100 pies (30 m) y se mantiene elevada a mayores profundidades. Los niveles de manganeso en el metal de soldadura disminuyeron significativamente de 0.6 a 0.25% entre 0 y 100 pies debido al aumento de su oxidación, después estos valores de profundidad los valores se mantienen relativamente constantes a mayores profundidades <sup>[26]</sup>. La pérdida de elementos de aleación a altas profundidades altera la microestructura y disminuye la resistencia y la tenacidad. La microestructura de la soldadura húmeda consiste principalmente en ferrita primaria principalmente (PF) y de ferrita con carburos alineados (FS) <sup>[26]</sup>. En contraste con la superficie de la soldadura que suelen contener gran parte de ferrita acicular, que es preferido debido a la resistencia de la ferrita acicular al clivaje de la fractura. Ferrita acicular en la microestructura a una profundidad de 30 pies (9 m) Sánchez-Osio <sup>[38]</sup>. No se sabe si una microestructura con altos contenidos de ferrita acicular se puede producir a mayores profundidades o si el refinamiento microestructural puede aumentar la resistencia de la soldadura bajo el agua.

## 2.12. SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS EN AMBIENTES MARINOS

La soldadura submarina es más difícil en comparación con las que son realizadas al aire: debido a la presión, contenido de hidrógeno en el metal soldado y las altas velocidades de enfriamiento <sup>[7,16]</sup>. Se ha demostrado que a una mayor presión el arco de soldadura se comporte inestable y la presencia de hidrógeno y microestructuras quebradizas pueden ser las razones de la formación de grietas <sup>[6]</sup>.

En la mayoría de los casos, los metales a unir con frecuencia son aceros al carbono, aceros alta resistencia y baja aleación, aceros dúplex y aceros austeníticos <sup>[9]</sup>. La susceptibilidad al agrietamiento en frío es un problema en las soldaduras de aceros alta resistencia baja aleación, figura 2.16 y en la fabricación de juntas disimiles. Los agrietamientos en caliente se han observado en soldaduras de metales como el acero austenítico <sup>[5,15]</sup>.



**Figura 2.16** Micrografía de una grieta en frío con una estructura bainítica de la zona afectada por el calor. <sup>[18]</sup>

Juntas soldadas de aceros de alta resistencia baja aleación en condiciones húmedas tienden al agrietamiento en frío (agrietamiento por hidrógeno) <sup>[17]</sup>. Para eliminar esta tendencia al agrietamiento se deben considerar tres factores que son de suma importancia: la cantidad de hidrógeno, microdureza en la zona afectada por el calor y los esfuerzos residuales en la unión soldada <sup>[17]</sup>. La reducción del contenido de hidrógeno se puede obtener

con el uso de consumibles que contengan poca cantidad de hidrógeno en la soldadura o por selección de los parámetros de soldadura <sup>[17]</sup>.

La generación de la zona afectada por el calor puede ser controlada por la velocidad de enfriamiento mediante el uso de algún aislamiento especial en la superficie de la placa soldada y/o aplicar altos calores de entrada <sup>[7,17]</sup>. En las prácticas de soldadura, los esfuerzos residuales en la junta, dependen del uso de pequeños depósitos de soldadura, consumibles con coeficientes de expansión térmica compatibles con el del metal base y la selección del borde preparados para reducir el metal depositado.

La resistencia de los aceros utilizados para estructuras en las profundidades de agua es un factor muy importante porque los aceros de alta resistencia son requeridos para profundidades mayores. Los aceros de alta resistencia usualmente con un carbono equivalente (CE) mayor que 0.4% muestran menor soldabilidad.

## **2.13 DIFICULTADES AL SOLDAR BAJO EL AGUA EN UN MEDIO SECO**

Los problemas relacionados a este proceso, se deben principalmente a la presión y los gases que se generan durante la soldadura, ya que el progreso de la soldadura en seco, hace posible producir uniones soldadas de alta calidad. Para este tipo de soldadura, se utilizan: el arco metálico con protección, el arco de tungsteno con gas, el arco de plasma, el arco metálico con gas y el arco con núcleo fundente.

Existe un tipo básico de soldadura submarina en seco, la soldadura hiperbárica que emplea una cámara de soldar o hábitat, dicha cámara se hace de manera que se pueda sellar a la parte que se va a soldar. La presión dentro del hábitat es igual a la presión del agua a la profundidad de operación.



Uno de los problemas importantes a resolver dentro del hábitat es la del filtrado de la atmósfera del mismo, ya que durante el proceso se generan vapores metálicos que deben ser extraídos. El gas para respirar y para soldar se diseña para que resista presiones altas debido a que la presión dentro del hábitat aumenta con la profundidad a la que se trabaja. La alta presión es otro problema importante, la cual aumenta a una atmósfera por cada 10 metros de profundidad en agua de mar, por lo tanto se debe de igualar la presión del agua con la de la atmósfera dentro de la cámara o hábitat. La profundidad máxima<sup>[1]</sup> a la que se puede realizar este proceso es de 300 metros, esto relacionado a los aspectos fisiológicos humanos.

Con la soldadura de tungsteno con gas, se genera poco humo, pero el gas inerte que se usa para la soldadura descompensa la atmósfera respirable para el soldador, la cual se basa de acuerdo con la profundidad del trabajo. En relación con la soldadura por arco metálico, con gas se tienen problemas que se basan en la profundidad, pues al aumentar esta, la presión atmosférica es mayor y el arco quedará más estrecho, lo que conduce a un mayor voltaje en el arco, a mayor penetración y se puede generar exceso de calor, lo que hace más difícil el manejo del charco de soldadura. A profundidades mayores de 35 metros, el charco de soldadura es más difícil de controlar y se genera una mayor cantidad de humo. Cabe mencionar que existen posibilidades de que queden gases aprisionados en las partes que se estén soldando, los cuales generalmente son ricos en hidrógeno y en oxígeno y pueden explotar cuando se encienden.

Últimamente la mayor parte de los esfuerzos se han concentrado en la mecanización y automatización de los procesos de soldadura para reducir los efectos dañinos relacionados con los trabajos a profundidad en los buzos soldadores<sup>[20]</sup>.

### 2.13.1 SOLDADURA HIPERBÁRICA MANUAL

Este proceso fue desarrollado como un proceso de soldadura de arco protegido (SMAW) aplicando electrodos como consumibles <sup>[1]</sup>. A medida que el proceso de soldadura es realizado en una cámara o hábitat con una atmósfera artificial, dichos electrodos son generalmente electrodos ordinarios sin ningún recubrimiento especial a prueba de agua como lo tienen aquellos que son especiales para las aplicaciones en un ambiente húmedo. Generalmente, como la atmósfera en tales cámaras es un poco húmeda, los electrodos son guardados en cajas o en empaques sellados para prevenir que el revestimiento de fundente absorba la humedad, ya que el aseguramiento de un electrodo seco y libre de humedad es una parte esencial en la soldadura hiperbárica de arco protegido. Este proceso es generalmente aplicado para el soldeo de pasada de raíz, soldeo de varios cordones y soldadura de relleno que han demostrado el gran alcance de aplicabilidad del proceso.

La aplicación del proceso GTAW para el soldeo de pasada sobre raíz y para el soldeo de varios cordones ha sido aceptada por la industria petrolera debido al mejor manejo de los procesos por el buzo soldador, a la mejor calidad en las piezas soldadas en relación con la ausencia de escoria y escoria atrapada, menor contaminación de hidrógeno en el metal depositado a través del adecuado control del gas protector.

Debido a la baja eficiencia, el proceso manual GTAW no es frecuentemente utilizado para el relleno. El proceso es caracterizado debido a bajo calor administrado y por lo tanto al pequeño baño de fusión de la soldadura. La cantidad de material fundido es limitada y permite un excelente control del baño de fusión, especialmente en soldaduras como la que se realiza sobre cabeza. Esta ventaja del proceso beneficia en la construcción de ductos con soldadura de pasada sobre la raíz. El espesor de la soldadura de pasada sobre raíz es tan pequeña que las capas de relleno no pueden ser aplicados

inmediatamente después de terminado el soldeo de pasada sobre la raíz. Una capa de soldadura muy lejana es esencial antes de que la junta pueda ser cargada por la aplicación de otro proceso. Sin embargo, éste proceso es el más apropiado y es aplicado principalmente para la construcción de ductos submarinos en operaciones manuales. Una combinación entre el GTAW y SMAW, es una versión común para la soldadura hiperbárica manual.

Altas velocidades de ejecución se pueden lograr mediante la aplicación de los procesos GMAW y FCAW. Para el primero, un alambre descubierto de bajo contenido de aleantes es usado como consumible. La combinación de los aleantes es tal que el metal depositado generado se iguala con el metal base y produce cualidades y propiedades mecánicas adecuadas. La escoria resultante que simplemente es generada por el óxido de silicio es fácilmente sobre soldada por capas subsecuentes y no se producen inclusiones de escoria y fallas en la soldadura. Este alambre puede preferiblemente ser usado en procesos de soldadura mecanizados porque no se tiene que hacer un proceso de eliminación de escoria.

En el proceso de soldadura FCAW, usualmente el fundente contiene los aleantes necesarios en una cantidad que toma en cuenta la velocidad de combustión de cierta cantidad de aleantes y garantiza la calidad del material soldado que es compatible con las cualidades del metal base. Además, este fundente es responsable de la producción de escoria encima del cordón con el fin de reducir la velocidad de enfriamiento. Generalmente esta escoria tiene que ser removida y eliminada antes de que sea aplicada una capa adicional de soldadura. En ciertos casos, esta operación puede ser difícil y por lo tanto puede conducir a fallas en la soldadura en forma de incrustaciones de escoria. Solamente un trabajo con alta precisión y atención por parte del buzo soldador logrará garantizar una buena calidad en el material soldado. Por lo que, para estos procesos son aplicados gases protectores para realizar una buena fundición del cordón y buenas cualidades del metal base <sup>[16]</sup>.

### **2.13.2 SOLDADURA HIPERBÁRICA MECANIZADA**

Desde hace algunos años ha habido una remarcada atención al desarrollo de sistemas de soldadura mecanizada que puedan ser controladas vía remoto en el fondo del mar y producir soldaduras de alta calidad <sup>[1]</sup>. Las razones para tal desarrollo se basan en reducir la carga de trabajo de los buzos soldadores y las actividades de exploración de campos petroleros a grandes profundidades. En años recientes se ha ganado experiencia en la operación de los equipos para soldar líneas de ductos y en operaciones de sujeción.

Los sistemas mecanizados instalados en un hábitat en el fondo del mar son operados todos desde la superficie con sistemas de soldadura GTAW, que a su vez requiere de la asistencia de un buzo durante el inicio y durante la ejecución de las tareas de rutina durante la operación de soldeo tales como las mediciones del ajuste o ensamble de ductos, cambio de electrodos, servicio al alimentador de alambre.

La postura que se tiene ahora es la de operar con tales sistemas mecanizados lo más que sea posible, para reducir el pesado trabajo de los buzos. La profundidad máxima en que tales sistemas mecanizados han sido satisfactoriamente aplicados son 220 metros de profundidad. Los esfuerzos son realizados con el fin de llegar a mayores profundidades y aplicar los sistemas mecanizados tan pronto como el tendido de tuberías y el trabajo de instalación se vuelvan evidentes.

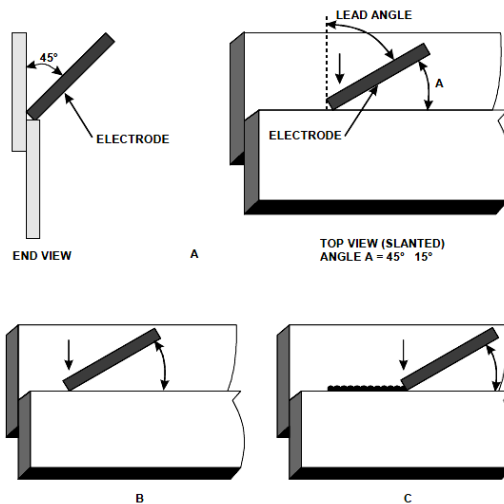
### **2.14 TÉCNICAS DE SOLDADURA SUBMARINA CON FILETE.**

Las técnicas más extensamente usadas a nivel mundial para soldadura subacuática son dos <sup>[20]</sup>.

### 2.14.1 TÉCNICA DE AUTO-CONSUMO O DE ARRASTRE.

Para soldadura bajo agua se usa 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. En la figura 2.17 se ilustran las etapas de la técnica de autoconsumo la cual consiste:

Posicionar el electrodo a un ángulo de aproximadamente 30° con la punta del electrodo y la línea de soldadura en contacto con la pieza de trabajo. Llamar al operador de la máquina para que conecte la corriente e iniciar el arco, y, aplicar suficiente presión en la dirección de la flecha para permitir al electrodo consumirse.



**Figura 2.17** Técnica de autoconsumo para soldadura MMAW <sup>[20]</sup>

En esta técnica se mantiene un contacto constante entre la cubierta del electrodo y la pieza y ha permitido la fabricación de juntas fuertes soldadas <sup>[20]</sup>. A modo de ensayo y con los medios facilitados por la Naval de los Estados Unidos, se hicieron soldaduras con filete en una plancha de acero dulce y, al usar esta técnica, desarrollaron consistentemente más del 80% de la resistencia

a la tensión y 50% de la ductilidad que es causada por el endurecimiento que resulta de la fuerte acción enfriadora de las aguas circundantes <sup>[20]</sup>.

Procedimiento para soldadura de arrastre bajo el agua:

Limpiar totalmente las superficies a soldar, asegurarse de que el interruptor de seguridad este abierto, ajustar el generador de soldar con la corriente adecuada para el electrodo que se va a emplear (Ver tabla 2.1).

**Tabla 2.1** Ajuste de corriente para soldaduras bajo el agua <sup>[18]</sup>.

Diámetro	Tipo de Electrodo	Posiciones de soldadura / Amperaje			
		Plano	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 Inox.	135-150	130-150	125-145	125-145
5/32"	Acero Inox.	150-200	140-200	140-190	140-180

Esta corriente es más alta que la corriente sobre la superficie para el mismo electrodo ya que las aguas circundantes absorben el calor rápidamente <sup>[18]</sup>.

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, pedir que se conecte la corriente, el arco debe formarse cuando el encargado de la maquina 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 está 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, cuando se consume 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 operador de la máquina, de que la corriente está desconectada, antes de comenzar a depositar un nuevo electrodo, se debe limpiar el extremo de la deposición 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, 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, 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

#### **2.14.2 TÉCNICA DE MANIPULACIÓN O DE TEJIDO.**

Esta técnica es menos empleada y requiere capacitación del buzo. Requiere que el soldador mantenga un arco constante bajo el agua, de igual

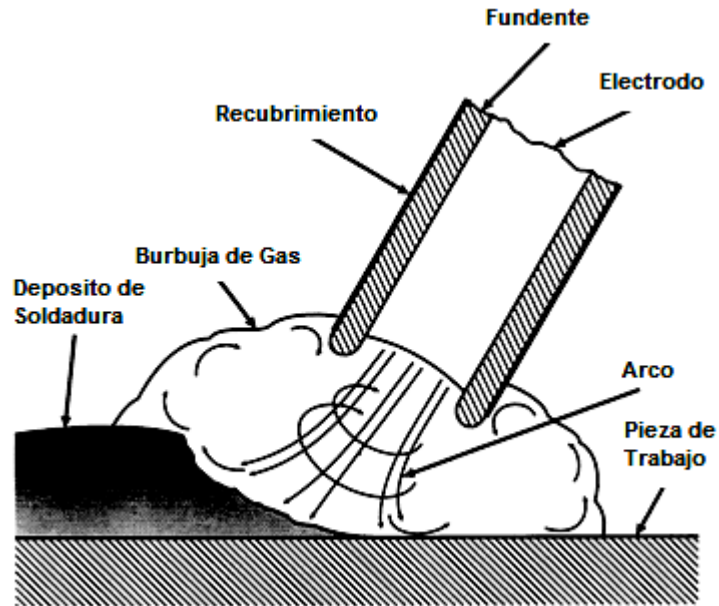
forma que lo haría en la superficie, mientras manipula el electrodo. Muy poca, o casi ninguna, presión es ejercida sobre el electrodo, mientras es trasladado de un lado a otro por el buzo. La distancia del arco bajo el agua es menor que si fuera una soldadura sobre superficie. Mientras en superficie 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" por minuto (12 a 17cm por minuto) <sup>[24]</sup>.

Para usar esta técnica, se deben determinar el amperaje correcto y el tipo de electrodo a utilizar probando 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 auto consumo, pero deben ajustarse ligeramente. La corriente apropiada puede identificarse observando las mismas características para soldadura en superficie.

## **2.15 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 2.18.





**Figura 2.18** Arco eléctrico de soldadura submarina <sup>[1]</sup>

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 <sup>[19]</sup>.

## 2.16 CONDICIONES IMPORTANTES DE LA SOLDADURA MMAW

Antes de que las operaciones de soldadura sean comenzadas, el área de trabajo debe ser inspeccionado para determinar si la unión puede o no realizarse de manera efectiva en el sitio. Los siguientes factores pueden dificultar la soldadura submarina:

a) Equipamiento de buceo.

- b) Donde no puede ser provista una plataforma estable de la cual soldar. Trabajando 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 del 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 base es menor a 0.20".
- f) Donde el ajuste es pobre, un espaciamento 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 <sup>[19]</sup>.

## **2.17 RESISTENCIA DE LOS DEPÓSITOS EN FILETE DE SOLDADURA SUBMARINA**

La resistencia de una soldadura realizada depende de varios factores, las cargas involucradas pueden ser fuerzas 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 más baja, esto es el resultado del efecto de revenido que tiene cada pase de soldadura en las soldaduras que le proceden.

Para un trabajo más 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 más 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 <sup>[18]</sup>.

## **2.18 SOLDADURA EN PLACAS DELGADAS**

Las técnicas para soldadura de placas que presentan calibres menores a 20 son básicamente las mismas descritas anteriormente. Sin embargo, las siguientes prácticas son requeridas a fin 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 más grueso en uno más delgado 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 <sup>[20]</sup>.

## 2.19 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Es muy importante la adecuada preparación de la superficie a ser soldada, debido a que una soldadura satisfactoria 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 inoxidable y soldaduras húmedas con alto níquel. Las superficies a ser soldadas y las superficies adyacentes aproximadamente a una distancia de ½" deben ser limpiadas.

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 está libre de defectos antes de depositar el siguiente cordón <sup>[18,20]</sup>.

## 2.20 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 más 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 espaciado en la raíz del filete antes de la soldadura. En caso de que el hueco 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 más de tiempo para la sujeción y acomodo de las juntas que dedicar una mayor cantidad de tiempo soldando <sup>[18]</sup>.

## 2.21 CONSIDERACIONES ESPECIALES

Cuando no están 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 2.2.

**Tabla 2.2** Electrodos de soldadura seca adecuados para soldadura bajo el agua <sup>[20]</sup>

<b>1/8", 5/32" &amp; 3/16" E6013, E7014, E7016 &amp; E7018</b>	Acero al carbono	AWS A5.1
<b>1/8", 5/32" &amp; 3/16" E309, E310 &amp; E312</b>	Acero inoxidable	AWS A5.4
<b>1/8" &amp; 5/32" ENiCrFe-2, ENiCrFe-3 &amp; ENiCrMo-3 Materiales impermeabilizantes</b>	Alto níquel	AWS A5.1
<b>Lea- Lac 30 – L2093 Poliuretano, no base de petróleo</b>	MIL-P-24441	

Una o dos inmersiones pueden ser 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 149°C durante 4 horas, seguidos de una reducción de temperatura a 65.5°C. 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 de manipulación al final del electrodo antes de sumergirlo.
- 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 más 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 <sup>[20]</sup>.

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA

### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA

Los cupones de soldadura submarina húmeda, se realizaron sobre secciones de tubería de acero del tipo API-5L X52 proporcionada por una empresa de la región, con la finalidad de cumplir el propósito de la presente investigación, se planteo el siguiente desarrollo experimental (ver figura 3.1).



Figura 3.1 Desarrollo Experimental.



### **3.1.1 ANÁLISIS QUÍMICO**

Para determinar la composición química del metal base fue necesaria la realización de un análisis químico de este utilizando la técnica de espectrometría de rayos X de acuerdo a la norma ASTM E 1085–08.

### **3.1.2 ANÁLISIS METALOGRAFICO**

Las muestras fueron debidamente seleccionadas, con una cortadora la cual emplea discos de SiC de 5" de diámetro marca DISCOTOM-2 STRUERS, posteriormente tratadas con una devastadora de disco marca KNUTH-ROTOR - 2 STRUERS y pulidas con equipo marca PLANOPOL. STRUERS hasta obtener un acabado espejo. Las muestras enseguida fueron analizadas por microscopia óptica (MO) con la finalidad de analizar inclusiones presentes del metal base, posteriormente las muestras fueron atacadas con el reactivo HNO<sub>3</sub> 5% (Nital) con el fin de revelar su microestructura. Para este fin se utilizo un microscopio OLYMPUS PM6-3, con cámara equipada marca KP-D5 DIGITAL COLOR y un programa analizador de imágenes Image-Pro Plus.

### **3.1.3 PRUEBAS MECÁNICAS**

#### **3.1.3.1 ENSAYO DE DUREZA**

Para pruebas de microdureza Vickers, se utilizaron las probetas realizadas en el análisis metalográfico se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM E384 con durómetro marca Future Tech FM7 y una carga de 500g.

### 3.1.3.2 ENSAYO DE TENSIÓN

El ensayo se realizó de acuerdo a la especificación ASTM E 8/03 utilizando un equipo TINIUS-OLSEN (60 TON.), las dimensiones de las probetas fueron de 8" de longitud  $\frac{3}{4}$ " de ancho y  $\frac{1}{2}$ " de espesor con un radio de  $\frac{1}{2}$ " presente en la sección reducida como es mostrado en la figura 3.2.



**Figura 3.2** Máquina de tensión marca TINIUS-OLSEN y probetas de realizadas a partir de las secciones de tubería API 5L X 52

### 3.1.3.3 ENSAYO DE DOBLEZ

El ensayo de doblez se realizo de acuerdo a la normativa AWS D3.6 – 1999. Se empleo una máquina de tensión/compresión marca TINIUS-OLSEN con una capacidad de 60 Ton. Este equipo se aplica tanto en pruebas de tensión como compresión. Para la prueba de doblez se utiliza en compresión con un punzón de  $1 \frac{1}{2}$ " de espesor, las dimensiones de los especímenes fueron de 6" de largo por  $\frac{3}{8}$ " de ancho y espesor de  $\frac{1}{2}$ ".

### 3.1.3.4 ENSAYO DE IMPACTO

El ensayo de impacto se llevo a cabo en base a la norma API 5L de acuerdo a los rangos específicos del material base. Las pruebas fueron experimentadas a temperatura controlada de 0 °C. Se utilizo una maquina de ensayo Charpy marca TINIUS-OLSEN Figura 3.3.



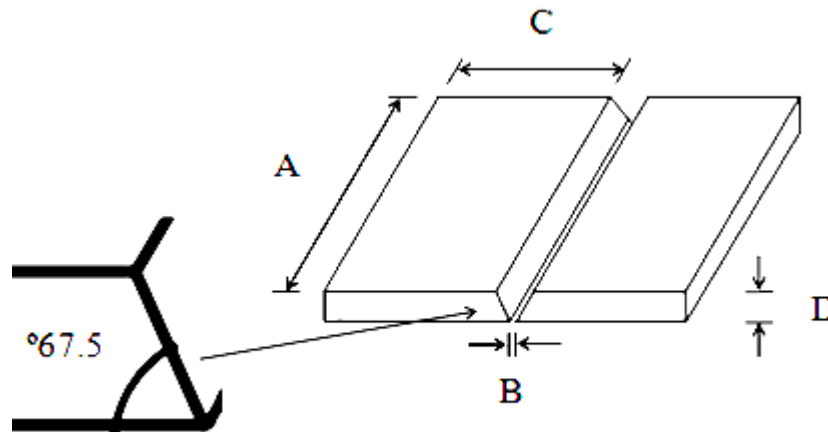
**Figura 3.3** Máquina de pruebas de impacto con temperatura controlada.

## 3.2. HABILITADO DE LOS CUPONES.

El diseño de los cupones de soldadura submarina húmeda fue propuesto con las siguientes características debido a las dimensiones del material que nos fue proporcionado por una empresa de la región:

Las dimensiones de los cupones fueron, 0.1778 x 0.2032 x 0.0112m de largo (C), ancho (A) y espesor (D) respectivamente. La preparación de la junta fue con bisel de inclinación 67.5° y una apertura de raíz (B) de 0.00158m.

El esquema de los cupones de soldadura antes de ser aplicado el proceso MMAW es mostrado en la figura 3.4



**Figura 3.4** Esquema de los cupones de soldadura aplicados en el proceso MMAW.

El electrodo que se utilizó para soldar los cupones fue del tipo rutílico E7018 de 1/8" de diámetro de la marca BROCO, recomendado para la soldadura de este tipo de material. Estos electrodos poseen una alta tasa de deposición y se utiliza comúnmente en soldadura submarina húmeda.

### 3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el alcance del objetivo del proyecto se plantearon dos etapas, en la primera corresponde a la parte exploratoria orientada en analizar la región de los parámetros a utilizar, y la segunda parte dirigida al estudio del comportamiento microestructural de uniones de bisel de acero API 5L X52 mediante el proceso MMAW en ambientes marinos a diferentes profundidades.

#### 3.3.1 PARTE EXPLORATORIA

En la Tabla 3.1 se listan los parámetros utilizados en la fabricación de las probetas fabricadas en la etapa experimental unidas mediante MMAW. En el cual se utilizó tres niveles de amperaje, manteniendo la velocidad de avance y

la profundidad constante. El metal de aporte fue del tipo 7018 especial para ambientes húmedos apropiado para aceros con 455 MPa de esfuerzo a la tensión. El equipo que se empleó fue una fuente de poder marca Miller Bobcat 225, el metal base consistió en segmentos de tubería API X52 con dimensiones antes mencionadas, la profundidad de trabajo fue de 1.10m y la temperatura del agua fue de  $22^{\circ}\text{C} \pm 1$ .

**Tabla 3.1 Parámetros utilizados en la parte exploratoria**

<b>Profundidad (m)</b>	<b>1.1</b>		
<b>Amperaje (A)</b>	<b>130</b>	150	160
<b>Velocidad de Avance (m/h)</b>	<b>15.24</b>		

### 3.3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Una vez realizada la parte exploratoria y analizado que los resultados fueron deficientes, se procedió a revisar nuevamente la literatura de la cual se estableció un nuevo diseño experimental en base a la experiencia adquirida en la realización de estas uniones soldadas, así mismo se establecieron parámetros similares utilizados por diferentes autores <sup>[10,20,23,27]</sup>. Una vez propuesto el diseño de experimentos, los rangos apropiados de amperaje, profundidad de trabajo y velocidad de avance, este último propuesto en base a la habilidad del soldador son mostrados en la tabla 3.2.

Este consistió en tres niveles de profundidad de trabajo 5, 10 y 15m tres niveles de amperaje alto, medio y bajo (220, 200 y 180A) y dos velocidades de avance 15.24m/h y 7.62m/h.

**Tabla 3.2** Parámetros aplicados en el diseño experimental.

5(m)						10(m)					
180A		200A		220A		180A		200A		220A	
7.62m/h	15.24m/h	7.62m/h	15.24m/h	7.62m/h	15.24m/h	7.62m/h	15.24m/h	7.62m/h	15.24m/h	7.62m/h	15.24m/h

15(m)					
180A		200A		220A	
7.62m/h	15.24m/h	7.62m/h	15.24m/h	7.62m/h	15.24m/h

### 3.4 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Dentro de los métodos estadísticos son conocidos como experimentos factoriales (EF) aquellos en los que se estudian simultáneamente dos o más factores. Para esta experimentación se utilizaron la profundidad de trabajo, amperaje y velocidad de avance y en donde se forman por la combinación de los diferentes niveles de cada uno de los factores, mencionados anteriormente.

Estos EF y sus correspondientes cálculos de análisis de varianza (ANOVA), son diseños útiles para llegar a conclusiones simultáneas acerca de dos o más factores. Se usa el término factorial porque las condiciones experimentales incluyen todas las combinaciones posibles de factores.

En soldadura un Diseño de Experimentos (DOE) puede ser empleado para evaluar defectos de las variables sobre la calidad de la unión soldada.

Un DOE del tipo factorial multiniveles fue aplicado para el presente trabajo. La secuencia de la realización de las muestras están dadas en forma aleatoria por el programa Minitab, esta secuencia se respeta con la finalidad de realizar un buen diseño de experimentos y que este nos arrojará información de

gran valor, la cual se pudiera analizar posteriormente, en la tabla 3.3 se puede observar la forma del desarrollo de esta experimentación.

**Tabla 3.3** Parámetros propuestos por el DOE en la unión de secciones de tubería API 5L X52 soldados por el proceso MMAW.

Muestra	Orden del Estándar	Amperaje (A)	Velocidad de Avance (m/h)	Profundidad de trabajo (m)
S1	12	220	15.24	10
S2	3	200	7.62	5
S3	14	180	15.24	15
S4	5	220	7.62	5
S5	4	200	15.24	5
S6	9	200	7.62	10
S7	8	180	15.24	10
S8	15	200	7.62	15
S9	18	220	15.24	15
S10	1	180	7.62	5
S11	7	180	7.62	10
S12	17	220	7.62	15
S13	11	220	7.62	10
S14	6	220	15.24	5
S15	13	180	7.62	15
S16	16	200	15.24	15
S17	10	200	15.24	10
S18	2	180	15.24	5

### 3.5 COMPORTAMIENTO DE LOS TIEMPOS DE ENFRIAMIENTO DE LOS CUPONES DE SOLDADURA A DIFERENTES PARÁMETROS

Mediante el programa utilizado Welding Calculation por Yurioka <sup>[28]</sup> se analizaron los tiempos de enfriamiento que se presentaron en las soldaduras realizadas por el proceso MMAW en condiciones húmedas este programa realiza los cálculos que se basa en la ecuación original de Rosenthal (ecuación 3.1) y considera los efectos de espesor de la placa y transferencia de calor en la superficie de la misma.

$$T = T_{\infty} + T_w * \exp [(-\alpha_1/\rho c) * (2t/h)] + (T_{ph} - T_{\infty}) * \exp [(-\alpha_2/\rho c) * (2t/h)] \quad (3.1)$$

Donde:

$$T_w = \frac{Q_p}{(2\pi\lambda)} * \exp(-vw/2K) * \left[ \frac{\exp(-vR/2K)}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} r^n \left( \frac{\exp\left(-\frac{vRn}{2K}\right)}{Rn} + \exp\left(-\frac{vR'n}{2K}\right)/R'n \right) \right]$$

Y

T= Temperatura (°C)

T<sub>ph</sub>= Precalentamiento y temperatura entre pasos (°C)

T<sub>∞</sub>= Temperatura ambiente (°C)

T<sub>w</sub>= Incremento de temperatura durante el movimiento puntual de la fuente de calor

X= Coordenada en la dirección de la soldadura (cm)

Y= Coordenada en dirección perpendicular a la trayectoria de la soldadura (cm)

Z= Coordenada en dirección del espesor de la placa (cm)

W= Movimiento de la coordenada en dirección de la soldadura, W = x-v\*t

V= Velocidad de la soldadura (cm/s)

t= Tiempo transcurrido después de la fuente de calor pasado el punto de coordenadas del origen

$$R = \sqrt{w^2 + y^2 + Z^2}$$

donde R= distancia radial

$$Rn = \sqrt{w^2 + y^2 + (2nh - z)^2}$$

donde Rn= distancia radial considerando h

$$Q_p = 0.24\eta AV(\text{cal/s})$$

donde Q<sub>p</sub> = Energía de la fuente de calor

A= Amperaje

V= Voltaje

h= Espesor de la placa (cm)

η= Eficiencia térmica del arco, η=0.8 (MMAW)

α<sub>1</sub>/ρc = Coeficiente de transferencia de calor de la superficie de la placa = 0.0020 cm/s (MMAW)



$\alpha_2/\rho c$  = Coeficiente de transferencia de calor de la superficie excepto en la parte de la soldadura =0.80 (MMAW)

$r$  = Velocidad del calor de reflexión de la superficie de la placa = 0.8 (MMAW)

$\lambda$  = Conductividad térmica =  $0.06 + 0.000012 * HI$  (cal/cm\*s)

$K$  = Difusividad térmica =  $0.042 + 0.000016 * HI$  (cm cm/s)

HI = Calor de entrada (J/cm) (siglas del inglés Heat Input)

### **3.6 ANÁLISIS TÉRMICO DE LAS UNIONES SOLDADAS POR EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO**

El estudio de los ciclos térmicos en las uniones soldadas en el caso de la soldadura submarina húmeda se hace difícil, considerando en primer lugar por las características del proceso de enfriamiento producto del medio circundante (agua) además de las condiciones de ejecución de los trabajos. Es de destacar que el empleo de termopares e instalaciones sensibles para la adquisición de datos que requieren precisión es en extremo difícil.

Por otro lado existe una gran limitante para la reproducción de las condiciones de aplicación de la soldadura submarina entre ellas: la preparación de soldadura especial los costos elevados para realizar el trabajo experimental, y la profundidad superior a los 20 metros. Hay que soldar para evaluar diferentes condiciones de temperatura o probetas que garanticen los ciclos térmicos de la unión, con un comportamiento similar al que presenta la pieza durante la soldadura o la reparación.

Una vía para obtener lo referido al comportamiento de los ciclos térmicos en la unión soldada es la modelación, a partir del método de elementos finitos (MEF) <sup>[36]</sup>.

Con el empleo del MEF se evaluarán los ciclos térmicos para la soldadura por el proceso MMAW con idénticos niveles de aporte térmico, para el caso la soldadura submarina húmeda.

### **3.6.1 CONSIDERACIONES PARA LA REALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN**

Comúnmente en la modelación de los fenómenos térmicos se consideran un conjunto de simplificaciones con el objetivo de reducir la complejidad del fenómeno de la transferencia de calor facilitándose la realización del trabajo.

Recientemente, García <sup>[29]</sup>, Martínez y Ramón <sup>[30]</sup>, reportan en trabajos relacionados con el cálculo de los ciclos térmicos de soldadura su influencia en los estados de tensión para la obtención de procedimientos de reparación de cascajos agrietados han tenido también en consideración para la modelación las características de la fuente de calor resultante del arco de soldadura. Los resultados obtenidos en este caso, mediante la modelación por MEF en comparación con los datos experimentales no sobrepasan el 5 % de error.

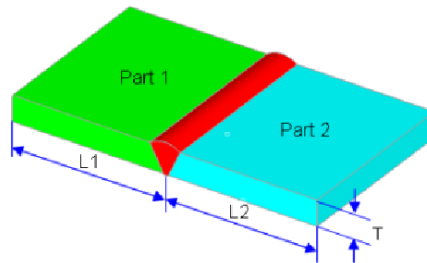
### **3.6.2 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA GENERACIÓN DEL CALOR APORTADO POR EL ARCO DE SOLDADURA**

Existen diversas formas de simular la generación de calor en el proceso de soldadura, una de ellas es por el modelo de John Goldak de doble Elipsoide <sup>[31]</sup>, empleado por Esser <sup>[32]</sup>. Este modelo considera que el voltaje y la corriente eléctrica entregan la potencia calorífica necesaria para fundir el material de aporte y parte del material base, donde las pérdidas de calor serán consecuencia de la eficiencia del proceso es decir por la perdidas por evaporación, convección y radiación además se tiene en cuenta la pérdida de calor por conducción lo que acentúa enfriamiento rápido producto del agua circundante. En este trabajo se ha empleado el software desarrollado por la EDISON WELDING INSTITUTE (EWI) WELDING PREDICTOR <sup>[33]</sup> el cual considera los aspectos planteados anteriormente, razones que justifican su aplicación para resolver problemas no lineales por elemento finito.

### 3.6.3 ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES PARA LA INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA, PARA LA MODELACIÓN POR MEF, EN LA SOLDADURA SUBMARINA HÚMEDA

De acuerdo al programa seleccionado, EWI Welding Predictor, y la experiencia adquirida. A continuación se presentan los diferentes datos necesarios y la forma de introducirlos para la evaluación correspondiente.

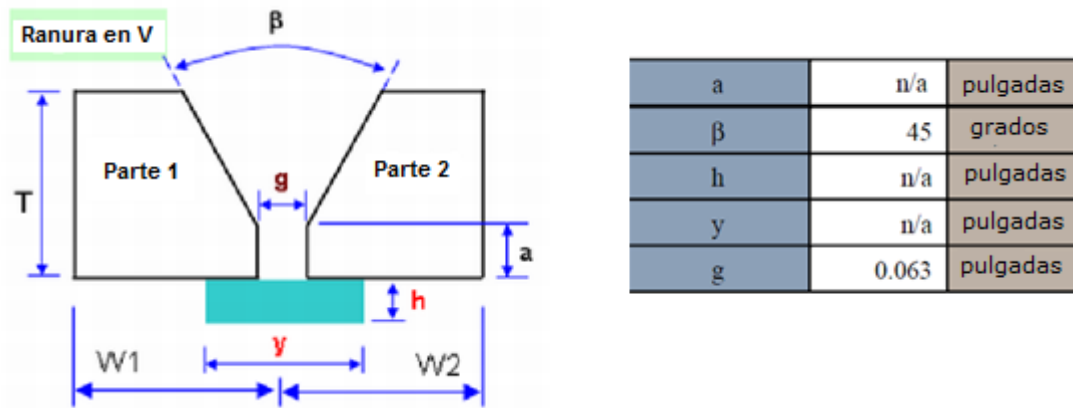
La selección de dimensiones en este punto se requiere especificar las dimensiones de las placas a unir como se muestra en la figura 3.5 posteriormente especificar el diseño de la junta así como la composición del metal base de ambas placas y el tipo de metal de aporte mostrados en la figura 3.6.



**Figura 3.5** Dimensiones específicas de las placas conforme al diseño de experimentos realizado.

Posteriormente especificar detalladamente el procedimiento de soldadura aquí es importante considerar la temperatura de precalentamiento y la temperatura entre pasos así como la especificación de amperaje, voltaje, velocidad de avance y calor de entrada, a continuación se definieron la localización de los cordones de soldadura conforme a los cupones obtenidos bajo el agua de tal manera que se reprodujeran las condiciones reales de la unión, lo más posible a la realidad 7 cordones de soldadura fueron aplicados a la junta dentro de las condiciones iniciales también se considero un enfriamiento forzado con agua en la parte superior e inferior de la placa (part 1) y de la placa

(part 2) mostradas anteriormente en la Figura 3.5 consideradas como metal base.



**Figura 3.6** Diseño de la junta correspondiente al DOE realizado.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL METAL BASE

#### 4.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL METAL BASE

La composición química del metal base (tabla 4.1) se obtuvo por espectrometría de emisión óptica (OES). La cual corresponde a un acero API 5L X52. Mismo que se corroboró con las propiedades de dureza y microestructura que a continuación se presentan.

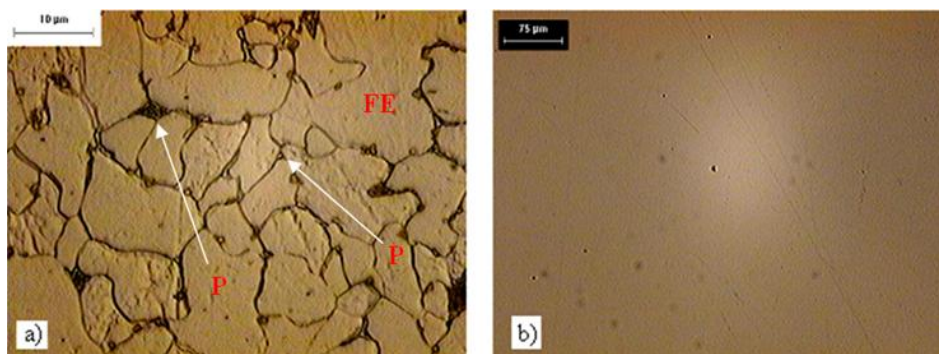
**Tabla 4.1** Análisis Químico del metal base

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
0.08	0.248	1.097	0.002	0.004	0.017	0.031	0.020
<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Pb</b>	<b>Al</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>
0.038	0.040	0.051	0.005	0.041	0.004	0.019	98.30

#### 4.1.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO

En la Figura 4.1 se muestra la estructura típica obtenida de las secciones de tubería API 5L X52 con y sin ataque químico, a y b respectivamente. La microestructura consiste en ferrita equiaxial (FE) con

trazas de perlita (P) Figura 4.1a y la Figura 4.1b el estado inclusionario del metal base consiste en inclusiones del tipo sulfuro de manganeso A ½ d y D1d tipo óxido. Lo anterior corresponde de acuerdo a una estructura de un acero API 5L.



**Figura 4.1** A) Microestructura correspondiente a un Acero API 5L X52 B) Inclusiones no metálicas del tipo sulfuro de manganeso A ½ d y D1d tipo Oxido

#### 4.1.3 DUREZA DEL METAL BASE

En la Tabla 4.2 es mostrada la microdureza obtenida en el metal base:

**Tabla 4.2** Resultados del ensayo de dureza del acero API 5L X52

Lecturas (Hv, 500gr)						Promedio
180	179	180	180	179	179	179.5

Los resultados obtenidos coinciden con los reportados en la literatura <sup>[40]</sup>.

#### 4.1.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL METAL DE APORTE

La composición química del metal de aporte (Tabla 4.3) es proporcionada por el fabricante BROCO, es especial para ambientes húmedos, con una composición equivalente a un electrodo E-7018 común para soldar en

ambientes secos por lo que su resistencia mínima es de 70,000 PSI lo cual es mucho mayor que la del metal base.

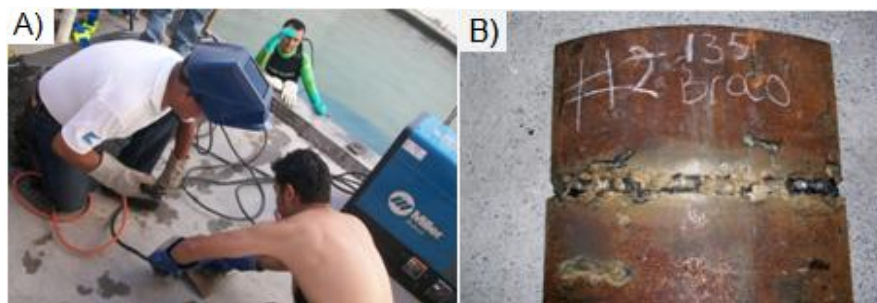
**Tabla 4.3** Composición química del metal de aporte

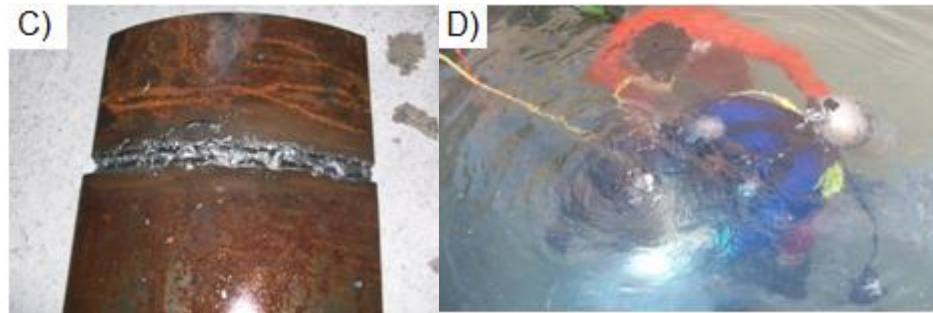
C	Si	Mn	Mo
0.08	0.3	0.55	0.5

## 4.2 RESULTADOS DE LA PARTE EXPLORATORIA

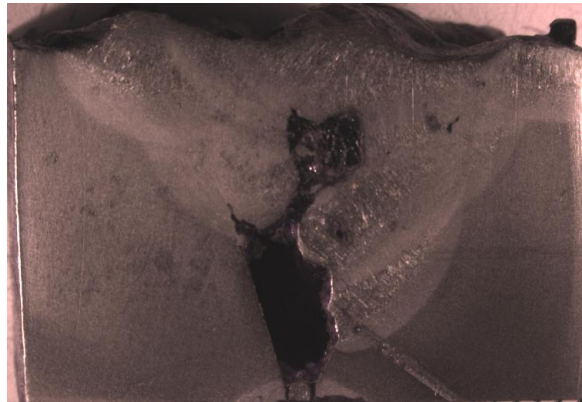
Los resultados obtenidos en la presente etapa no fueron satisfactorios, la inspección visual de los cordones mostro que la soldadura no fue homogénea. Bajo las condiciones establecidas, la falta de fusión en la parte de la raíz de la soldadura así como la escoria atrapada fueron defectos comunes en estos cupones.

En la Figura 4.2a se observa como el soldador ajusta los parámetros antes de iniciar las pruebas, el aspecto visual de los cupones de soldadura es mostrado en las Figuras 4.2b y 4.2c, y en la Figura 4.2d se muestra una imagen panorámica tomada durante la aplicación de la soldadura en las placas dentro del agua. En la Figura 4.3 se muestra una imagen de la preparación metalográfica de la zona perpendicular de la soldadura donde se observa la falta de fusión en la raíz de la soldadura.





**Figura 4.2** Experimentación previa utilizando parámetros fuera de rango (130A, 140A, 150A) a) Soldador ajustando parámetros a utilizar b) Soldadura aplicada a 135A c) soldadura realizada a 150A mostrando una mala calidad de penetración y aspecto visual d) realización de soldadura MMAW a 1.10m de profundidad de trabajo.



**Figura 4.3** Macrografía correspondiente a pruebas realizadas en la parte exploratoria

Los valores de dureza evaluados para 1.1m de profundidad de trabajo se especifican En la Tabla 4.4, es importante destacar los valores correspondientes a la zona afectada por el calor (ZAC); dichos valores se atribuyen al rápido enfriamiento a que está sometida la soldadura (SOL) por lo que se pueden encontrar estructuras frágiles del tipo Widmanstätten y Alotriomórficas, así mismo la entrada de calor en los cupones de soldadura influye en las transformaciones fases de estas.

Los valores de dureza en la soldadura no tienden a incrementarse debido a que el contenido de carbono del metal base (MB) como del metal de aporte es bajo.



**Tabla 4.4** Valores de dureza Hv 500gr correspondientes a 5 muestras

MUESTRA	1	2	3	4	5
MB	181.3	179.5	194.4	191.9	193.3
MB	183.1	176.4	194.7	178.8	186.5
ZAC	208.4	<b>230</b>	216.4	209.3	218.4
ZAC	<b>217.7</b>	<b>235.1</b>	205.6	210.6	<b>220.4</b>
SOL	180.6	182.1	179.6	200.5	213.5
SOL	200.5	184.1	177.1	203.8	203.5
SOL	202.3	189.2	186.3	202.9	200.6
ZAC	205.9	196.4	208.7	188.6	210.1
ZAC	<b>215.7</b>	210.6	214.1	196.4	<b>225.3</b>
MB	181.9	186.5	193.7	189.3	186.5

La figura 4.4a y 4.4b pertenecen a la región de soldadura, se puede observar que debido a los rápidos enfriamientos de solidificación del metal de soldadura se forman ferritas alotriomórficas, y ferritas widmanstätten, en la figura 4.4c se puede ver como las fases anteriormente mencionadas tienden a recrystalizar y formar nuevamente granos de ferrita equiaxial con perlita debido al revenido, esto por la entrada de calor que ocurre con la deposición de los cordones subsecuentes. Por lo que respecta a la dureza las regiones más duras se presentan en la zona afectada térmicamente.

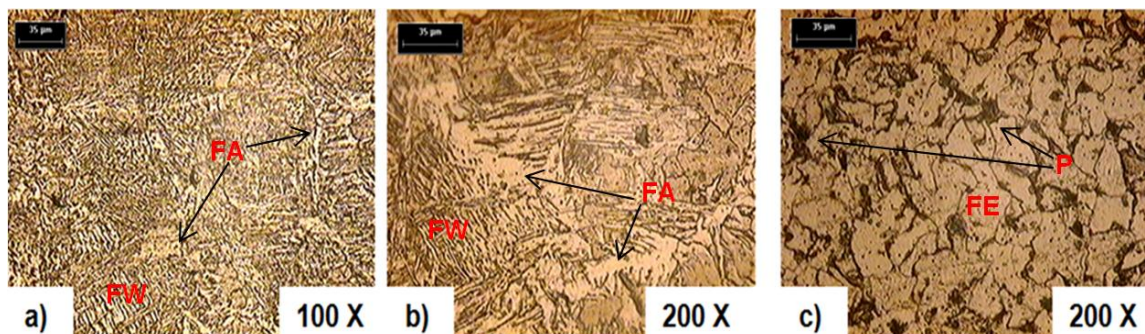
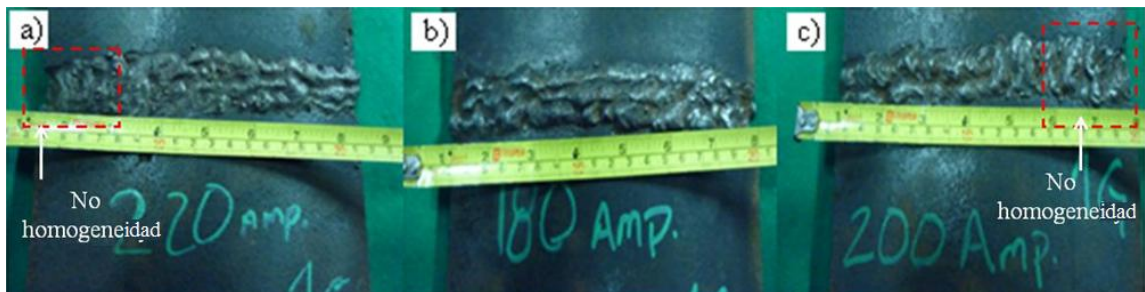


Figura 4.4 Micrografías correspondientes a) zona afectada por el calor b) soldadura c) soldadura

### 4.3 PARTE EXPERIMENTAL

Derivado del desarrollo de la segunda parte experimental, las probetas de manera general presentaron un mejor aspecto visual en las uniones soldadas como se muestra en la figura 4.5.

Se observa que no existe homogeneidad entre el principio y fin de las placas soldadas por lo que al momento de realizar las pruebas metalográficas y mecánicas se considero descartar una pulgada al inicio como del final de la soldadura con el propósito de obtener resultados más representativos de los parámetros usados en la aplicación de los cordones de soldadura.

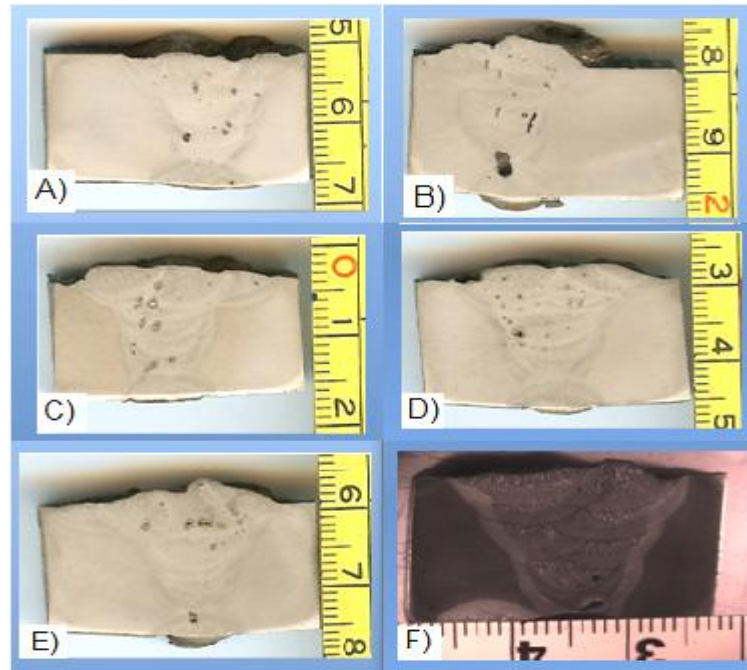


**Figura 4.5** Aspecto general de los cupones de soldadura unidos a diferentes parámetros a) S4, b) S3 c) S2.

### 4.4 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LAS UNIONES SOLDADAS

Para el análisis microestructural en las uniones soldadas fue necesario presentar una macroestructura realizada con parámetros S17 según la identificación del orden del diseño de experimentos con la finalidad de poder mostrar las diferentes zonas evaluadas de la unión, y poder tener una idea clara de las regiones que se están analizando. En la figura 4.6 se presentan

macroataques de uniones realizadas por el proceso MMAW a diferentes parámetros.



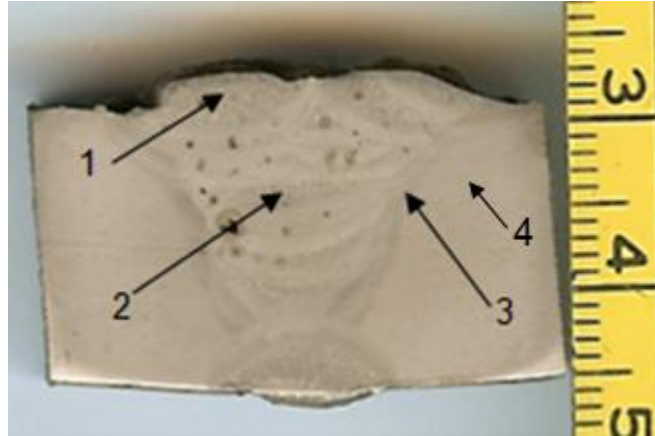
**Figura 4.6** Macrografías soldadas a diferentes parámetros a) S5 b) S18 c) S7 d) S17 e) S1 f) S9.

En la Figura 4.6 se puede observar la presencia de porosidad aun variando los parámetros de operación, además de analizar cada una de las 18 muestras se pudo constatar que la microestructura no presentaba grandes variaciones en la soldadura, zona afectada por el calor y en el metal base.

En la región de la zona afectada térmicamente presentó cambios notorios es decir en algunas muestras se presentó una región más amplia que en otras.

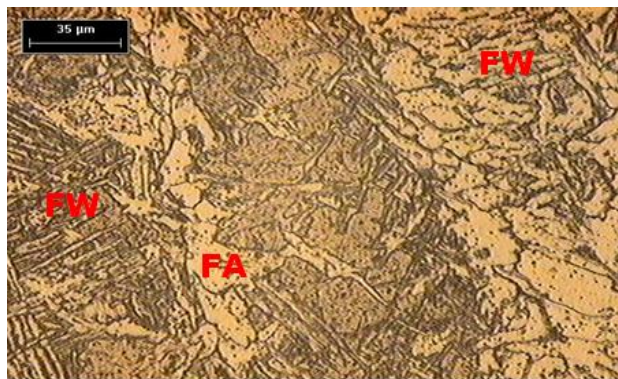
La Figura 4.7 muestra las áreas de la macroestructura de una de las muestras analizadas. En general todas las muestras presentaron microestructuras similares en las zonas indicadas como 1, 2, 3 y 4 las cuales corresponden a soldadura superficie, soldadura centro, zona afectada por el calor y metal base respectivamente. La Figura 4.8 muestra la microestructura de la zona 1 la cual consiste en granos de tipo columnar que nuclean de forma epitaxial a partir del metal base, con ferrita de tipo alotriomórfica en los límites

de grano y ferrita Widmanstätten con bajos contenidos de perlita alrededor de ella, típicamente encontrada en condiciones de rápido enfriamiento.



**Figura 4.7** Macroataque de la sección transversal de la muestra S17, mostrando los diferentes cambios microestructurales presentes en la soldadura.

En la Figura 4.9 se muestra la microestructura de la zona 2, esta consiste en granos de ferrita equiaxial y perlita recristalizada lo cual es muy parecido a la microestructura del metal base. Esto se logra debido al efecto del revenido de los cordones generados por la subsecuente deposición de metal posterior sobre el cordón de soldadura, logrando así un refinamiento del grano.



**Figura 4.8** Micrografía de la muestra S17 obtenida a 500X se revelan granos columnares de ferrita, ferrita alotriomórfica (FA) ferrita Widmanstätten (FW).

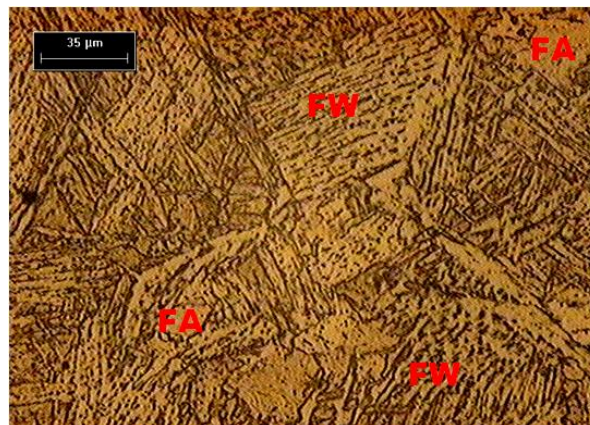
En la Figura 4.10 se muestra la microestructura de la zona 3 (afectada por el calor), la cual consiste principalmente de ferrita widmanstätten y

alotriomórfica con bajos contenidos de perlita alrededor de ella, típicamente encontrada en condiciones de rápido enfriamiento.



**Figura 4.9** Micrografía obtenida a 500X de la probeta S17 constituida por ferrita equiaxial y perlita.

Finalmente en la figura 4.11 se muestra la zona 4 correspondiente al metal base de la unión soldada con una estructura constituida de ferrita-perlita.



**Figura 4.10** Micrografía obtenida a 200X de la probeta S17 cuyo constituyente principal es ferrita Widmanstätten (FW) y ferrita alotriomórfica (FA).

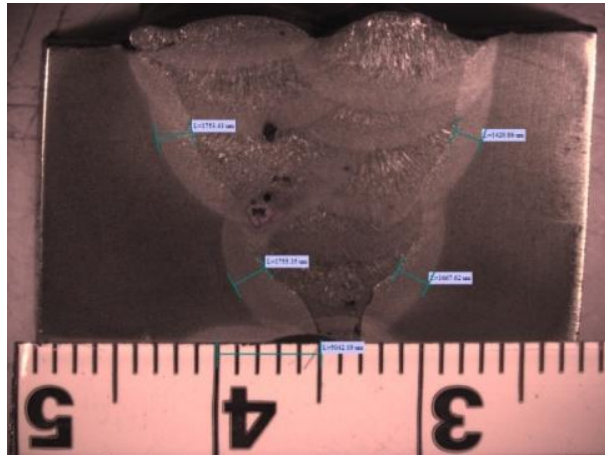


**Figura 4.11** Micrografía obtenida a 500X de la probeta S17 cuyo principal constituyente es ferrita equiaxial con trazas de perlita.

#### **4.5 MEDICIÓN DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR**

Como se mencionó anteriormente el comportamiento microestructural de las muestras soldadas por el proceso MMAW a diferentes parámetros no presento una variación significativa debido a la composición química del metal base, ya que por el contenido de carbono no es posible llegar a formar precipitación de carburos, pero si un notorio cambio de la zona afectada por el calor ya que en algunas muestras la presencia de la ZAC fue mayor que en otras por lo cual se procedió a medir el espesor de cada una de ellas, para poder realizar las mediciones se tomaron lecturas de cuatro diferentes regiones y se promediaron con el fin de obtener un valor que se pudiera comparar con el resto de las muestras en la figura 4.12 se pueden observar las zonas en donde se obtuvieron las lecturas.

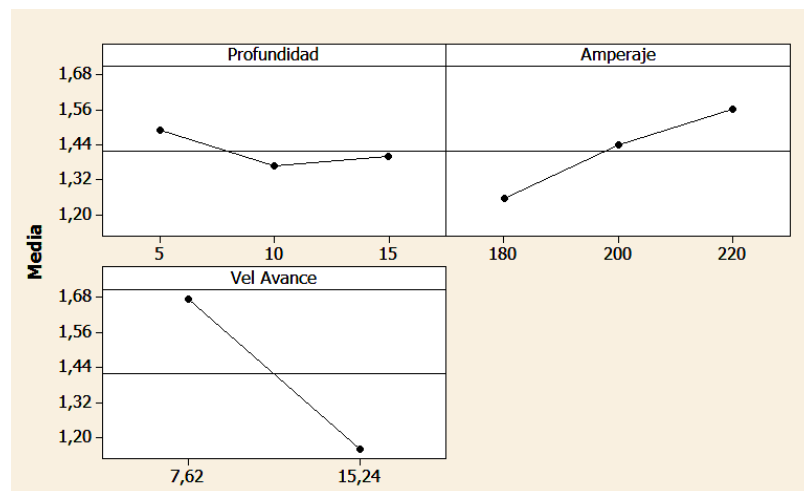
Una vez obtenidos los datos de las muestras se procedió a utilizar la información en Minitab con el fin de encontrar una relación que mostrara la influencia de los parámetros.



**Figura 4.12** Muestra S5 macrografía evaluando cuatro puntos de la zona afectada por el calor.

En la gráfica 4.13 se observa que la velocidad de avance presenta mayor efecto en el espesor de la zona afectada por el calor, el rango de espesor de la ZAC está dado en mm y oscila entre 1.10 y 1.68mm, lo cual tiene relación con el calor de entrada, además de su microestructura generada por el rápido enfriamiento que sufre la unión soldada.

El análisis de varianza correspondiente al diseño experimental, se aprecia en la Tabla 4.5 donde el efecto principal es la velocidad de avance, seguida del amperaje, estas dos variables son estadísticamente significativas con un valor de  $p < 0.005$  lo que indica que manipular la velocidad de avance tiene un mayor efecto sobre el crecimiento de la zona afectada por el calor.



**Figura 4.13** Gráfica de efectos principales para ZAC (mm)

**Tabla 4.5** Análisis de varianza correspondiente al diseño experimental para la ZAC (mm)

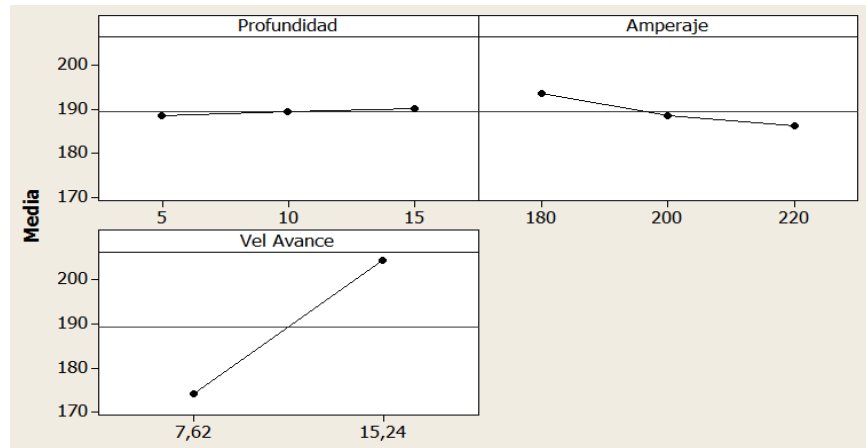
Análisis de varianza para Zac (mm), utilizando SC ajustada para pruebas						
Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Profundidad	2	0,04848	0,04848	0,02424	1,26	0,377
Amperaje	2	0,28288	0,28288	0,14144	7,33	0,046
Vel Avance	1	1,20642	1,20642	1,20642	62,54	0,001
Profundidad*Amperaje	4	0,02356	0,02356	0,00589	0,31	0,861
Profundidad*Vel Avance	2	0,05001	0,05001	0,02501	1,30	0,368
Amperaje*Vel Avance	2	0,00781	0,00781	0,00391	0,20	0,825
Error	4	0,07716	0,07716	0,01929		
Total	17	1,69631				
S = 0,138884    R-cuad. = 95,45%    R-cuad. (ajustado) = 80,67%						

Nótese en la tabla 4.5 que el valor de P para la variable de la Velocidad de avance es de 0.001 la cual es la que tiene mayor influencia en el ancho de la zona afectada por el calor seguida por el amperaje con 0.04 en el valor de P y finalmente la profundidad con 0.377 por lo que se puede asegurar que el modelo se ajusta adecuadamente con los valores de R-cuadrada en 95.45% y el R-cuadrada ajustada en 80.67%.

## 4.6 MICRODUREZA

Para evaluar el efecto de la dureza de la zona afectada por el calor. Se procedió a alimentar las durezas promedio encontradas en la ZAC, en el DOE y se encontró que la variable que más influye es la velocidad de avance, seguida por el amperaje y que la profundidad de trabajo no es una variable que muestre influencia en la dureza de la ZAC, en la gráfica 4.14, se observa el comportamiento de la dureza al variar los parámetros de soldadura.





**Figura 4.14** Gráfica de efectos principales para la microdureza Hv, 500gr en la zona afectada por el calor.

De igual modo se analizó su ANOVA y los resultados se muestran en la Tabla 4.6 donde se observa notoriamente que nuevamente la velocidad de avance es el parámetro que más influye sobre la dureza generada en la zona afectada por el calor, esta se presenta en el rango de 85HRB a 93.5HRB con 8.5 puntos de diferencia, seguido por el parámetro del amperaje con un rango de 90 a 92.5HRB, 2.5 puntos de diferencia y que la profundidad de trabajo no presenta cambios notorios en la dureza de la zona afectada por el calor.

**Tabla 4.6** Análisis de varianza correspondiente al diseño experimental para la dureza Hv, 500gr en la ZAC.

Análisis de varianza para Microdureza Hv 500gr, utilizando SC ajustada para pruebas						
Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Profundidad	2	7,69	7,69	3,85	1,27	0,373
Amperaje	2	169,05	169,05	84,53	27,98	0,004
Vel Avance	1	4116,27	4116,27	4116,27	1362,75	0,000
Profundidad*Amperaje	4	7,79	7,79	1,95	0,64	0,660
Profundidad*Vel Avance	2	6,70	6,70	3,35	1,11	0,414
Amperaje*Vel Avance	2	26,26	26,26	13,13	4,35	0,099
Error	4	12,08	12,08	3,02		
Total	17	4345,84				

S = 1,73797    R-cuad. = 99,72%    R-cuad. (ajustado) = 98,82%

Nuevamente, analizando resultados, los valores de P para la velocidad de avance son prácticamente 0.0. Seguido por el amperaje con 0.004 y por

último la profundidad con 0.3 lo que indica que en ese orden son las variables que más influyen en la dureza de la ZAC, este modelo ajusta en 99.72% y 98.82% en su R-cuadrada y R-cuadrada (ajustada) respectivamente. El comportamiento de la predicción es bueno y se puede adecuar para utilizar mediante la fórmula de la predicción Ec 4.1.

$$\gamma_{\text{Microdureza}} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (4.1)$$

Siendo los valores:

$$\beta_0 = 179$$

$$\beta_1 X_1 = 0.6 * [\text{profundidad (m)}]$$

$$\beta_2 X_2 = -0.184 * [\text{Amperaje (A)}]$$

$$\beta_3 X_3 = 3.97 * [\text{Velocidad de avance (m/h)}]$$

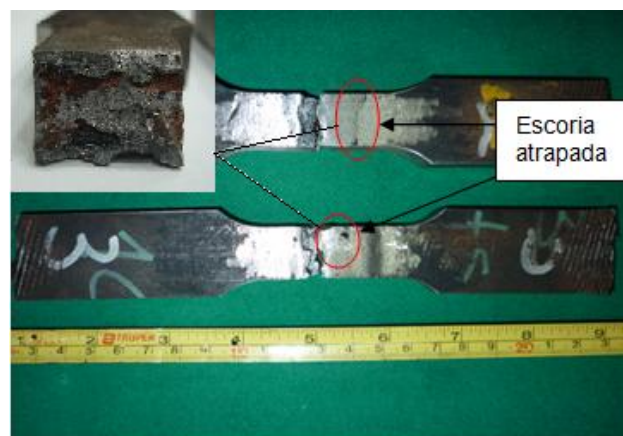
## 4.7 PRUEBAS DE TENSIÓN

Los resultados de las pruebas de tensión se listan en la Tabla 4.7

**Tabla 4.7** Resultados de la prueba de tensión

Muestra	Profundidad	Amperaje	Vel. Avance	Tensión (PSI)
S1	10	220	15,24	68439
S2	5	200	7,62	66559
S3	15	180	15,24	57892
S4	5	220	7,62	55432
S5	5	200	15,24	68349
S6	10	200	7,62	47322
S7	10	180	15,24	47322
S8	15	200	7,62	54583
S9	15	220	15,24	67945
S10	5	180	7,62	48699
S11	10	180	7,62	69068
S12	15	220	7,62	54583
S13	10	220	7,62	54584
S14	5	220	15,24	66569
S15	15	180	7,62	63587
S16	15	200	15,24	65421
S17	10	200	15,24	66568
S18	5	180	15,24	21181

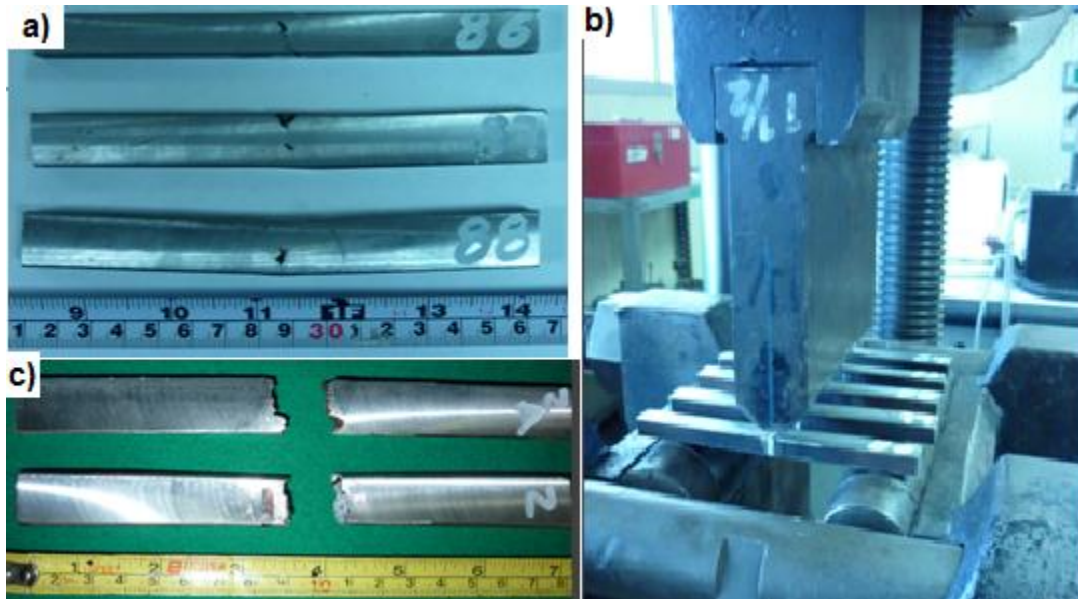
Para efectos estadísticos no se pudieron analizar los datos debido a que el principal defecto en las uniones soldadas fue el atrapamiento de escoria que es inherente al proceso y al no contar con medios mecanizados para ambientes húmedos, para poder remover la escoria entre pasos de cordones fue la principal causa para que las probetas fallaran en soldadura y no alcanzaran la resistencia mínima a la tensión del metal base que es de 66000 PSI de acuerdo a las normas API 5L <sup>[40]</sup>, un total de 7 muestras pasaron las pruebas de tensión de 18 en total con un porcentaje del 38.8%. En la figura 4.15 se puede observar en la sección reducida de la probeta indicios de atrapamiento de escoria.



**Figura 4.15** Probeta de Tensión

## 4.8 PRUEBAS DE DOBLEZ

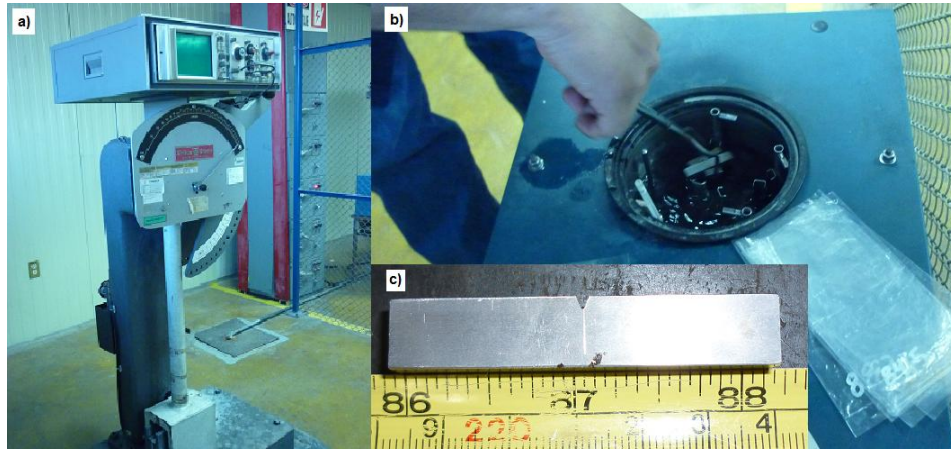
Los resultados de la prueba de doblez no fueron satisfactorios debido nuevamente al atrapamiento de escoria en el metal de soldadura, por lo que todas las pruebas fallaron. En la figura 4.16 se muestran al momento de estar realizando la prueba, el aspecto físico antes y después de la prueba.



**Figura 4.16** a) Aspecto físico de las probetas de doblez, b) punzón de 1 ½” de espesor sometiendo las probetas al doblez, c) probetas con atrapamiento de escoria en la fractura de la soldadura.

## 4.9 PRUEBAS DE IMPACTO

Las pruebas de impacto tendieron a no alcanzar los valores mínimos requeridos del metal base por la presencia de escoria atrapada en los especímenes, según la norma API 5L indica valores de 27Joules a cero grados centígrados para este material; en la figura 4.17 se observa como las piezas se sometieron al criogénico a fin de alcanzar los 32F<sup>o</sup> y/o 0°C antes de realizar el impacto como lo marca la norma, dimensiones de los especímenes y la máquina de ensayo de impacto.



**Figura 4.17** a) Máquina de ensayo Charpy (Laboratorio de pruebas Mecánicas COMIMSA 2010) b) Criogénico sometiendo a los especímenes a 0° C o 32° F c) dimensiones de las probetas de impacto.

#### 4.10 COMPORTAMIENTO DE LOS TIEMPOS DE ENFRIAMIENTO DE LOS CUPONES DE SOLDADURA A DIFERENTES PARÁMETROS

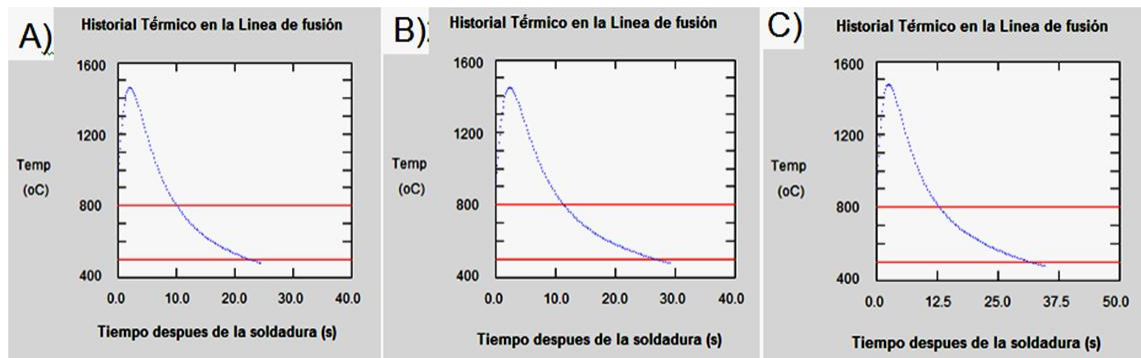
Si consideramos a una velocidad de avance constante de 7.62m/h se puede observar en la figura 4.18 que los tiempos de enfriamiento oscilan entre 11.45 y 14.61s a tres distintos parámetros de soldadura que van en el rango desde los 1525°C a los 400°C aproximadamente este fenómeno es atribuido a la ecuación 4.2 donde, mientras más incrementa la relación  $[E/I/V]$  la velocidad de enfriamiento decrece <sup>[37]</sup> siendo E el voltaje, I el amperaje y V la velocidad de avance, esto se debe a que la entrada de calor en las placas es mayor mientras el soldador aplica el cordón a dicha velocidad por lo que la velocidad de enfriamiento disminuye.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_x = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_t \left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_T = -2\pi kV \frac{\Delta T^2}{Q} \quad \text{Ec 4.2}$$

Siendo  $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_x = V$

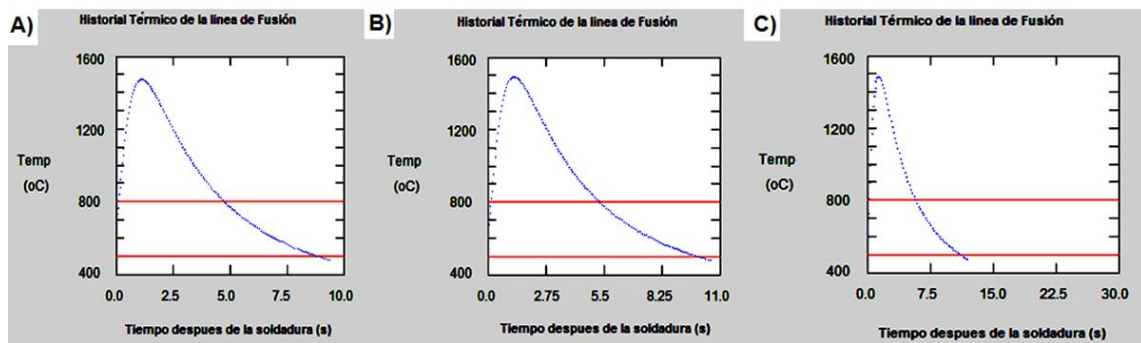
$K$ = la conductividad del material

$Q$ = calor de entrada



**Figura 4.18** Parámetros del DOE A) S11 Tiempo de enfriamiento 11.45 s B) S6 Tiempo de enfriamiento 12.95 s C) S13 Tiempo de enfriamiento 14.61 s

Mientras que a una velocidad de avance mayor de 15.24m/h el tiempo de enfriamiento es menor debido a que el calor de entrada que se está ingresando a la placa es también menor porque el tiempo de permanencia del arco de soldadura que está en contacto con la placa también es menor, se puede observar en la figura 4.19 que los rangos de enfriamiento están entre 4.029s y 5.28s.



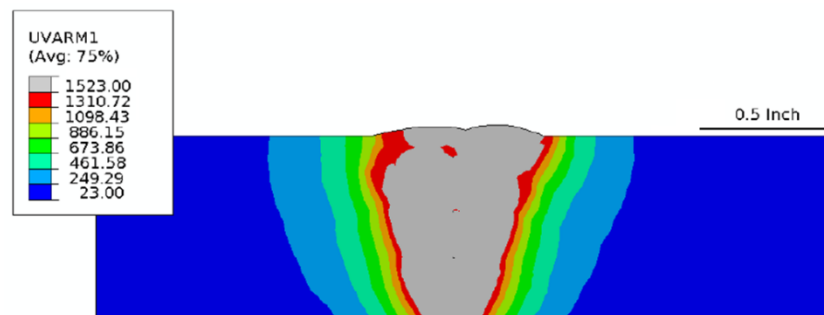
**Figura. 4.19** Parámetros del DOE A) S7 Tiempo de enfriamiento 4.029 s B) S17 Tiempo de enfriamiento 4.64 s C) S1 Tiempo de enfriamiento 5.28 s

Se puede ver que al soldar en estos ambientes los enfriamientos son rápidos debido a que están siendo forzados a un enfriamiento por agua y por lo tanto esto va muy relacionado con las microestructuras obtenidas que tienden a ser estructuras del tipo frágiles, incrementando la dureza en la soldadura y zona afectada por el calor pudiendo propiciar al agrietamiento en la unión.

## 4.11 RESULTADOS DEL ANÁLISIS TÉRMICO Y MICROESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA

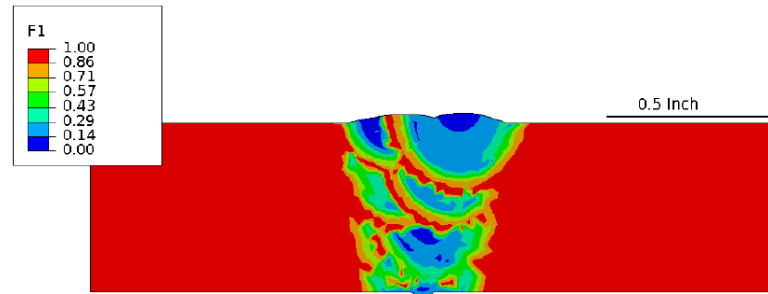
Con el programa *EWI Welding Predictor* [33] se obtuvo el perfil de temperatura del objeto de estudio (figura 4.20), también permite predecir el análisis microestructural de la unión soldada (figuras 4.21, 4.22 y 4.23), y finalmente la dureza presente en la región de la soldadura y zona afectada por el calor mostrada en la figura 4.24

En la figura 4.20, la distribución de temperatura es puntual por lo que se puede decir que la temperatura máxima alcanzada es de 1523° C y llega a enfriarse a menos de 400°C en un tiempo de 4 a 5 seg. Con la velocidad de avance de 15.24 m/h por lo que se considera que el enfriamiento es severo debido al gradiente térmico elevado que existe del metal, la única ventaja es que debido a los porcentajes de carbono que tenemos en el metal base no es posible llegar a obtener fases frágiles como lo es la martensita.



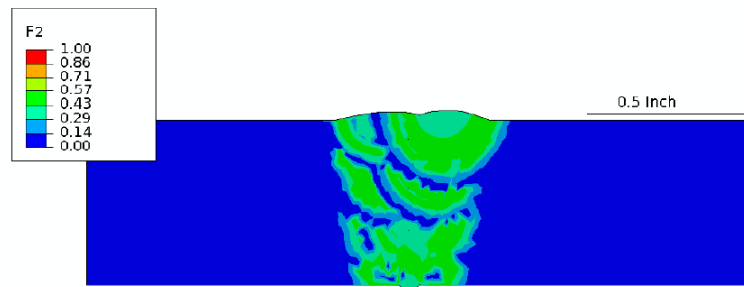
**Figura 4.20** Distribución de picos de temperatura (°C)

En la figura 4.21 se presenta la distribución de la ferrita equiaxial (FE) como se puede ver la parte de color rojo corresponde a un contenido del 100% de la fase FE, así mismo esta fase está presente por debajo de los cordones de soldadura por el efecto de revenido y la entrada de calor, lo cual es por el efecto de la recristalización de nuevos granos en la soldadura.



**Figura 4.21** Distribución de Ferrita Equiaxial (F1)

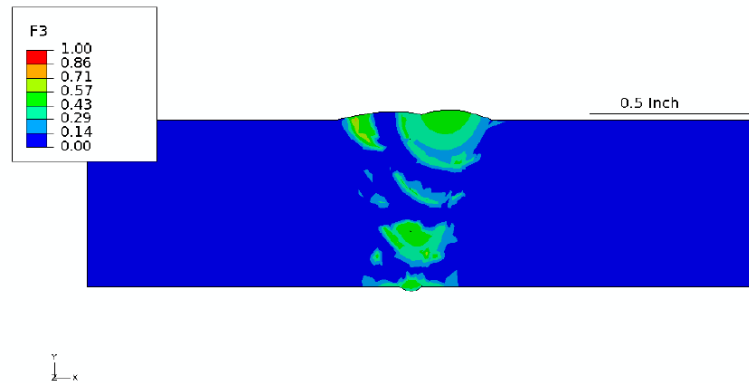
En la figura 4.22 se presenta la distribución de la fase de la ferrita Alotriomórfica con mayor proporción dentro del área de la soldadura pero en un contenido aproximadamente entre 43 a 57%.



**Figura 4.22** Distribución de Ferrita Alotriomórfica (F2)

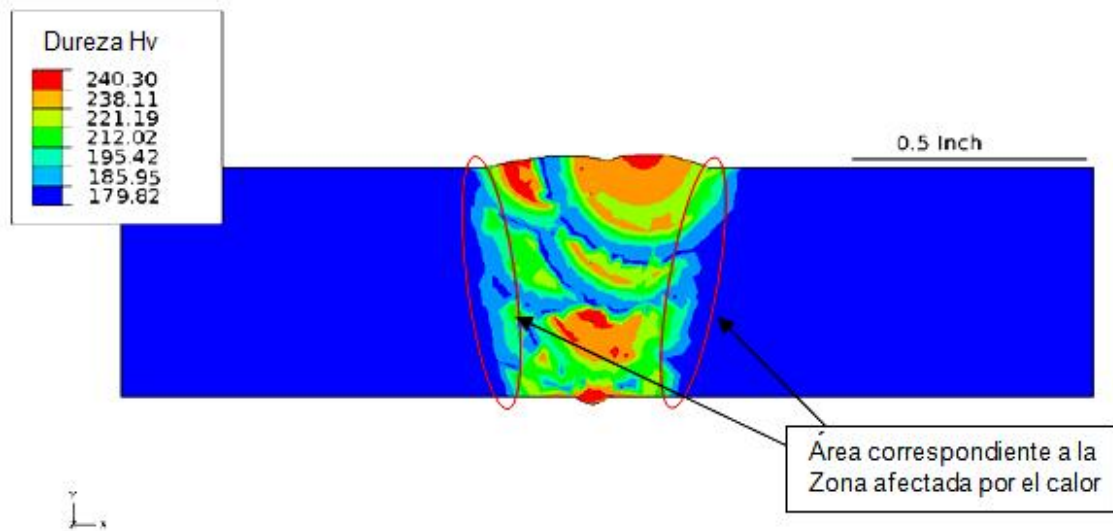
Finalmente la presencia de la ferrita Widmanstätten (figura 4.23) se encuentra presente principalmente en las áreas de las partes superior e inferior de las soldaduras debido a que en las condiciones iniciales se asumió un enfriamiento forzado con agua en las paredes del metal base, esta fase está distribuida entre 14 a los 57% en las áreas marcadas.





**Figura 4.23** Distribución de Ferrita Widmanstatten (F3)

Con respecto a la estimación de la distribución de temperatura se puede observar que la región estudiada en la parte del diseño de experimentos el rango de durezas encontrado concuerda con la parte simulada, trabajando con rangos de 179 – 212 Hv 500 gr como es mostrado en la figura 4.24, por otra parte cuando se realizó la parte exploratoria se obtuvieron durezas en distintas regiones de soldadura que corresponden al rango de durezas calculado en esta simulación.



**Figura 4.24** Distribución de la dureza en Hv, 500gr en la región de la soldadura y zona afectada por el calor

# CONCLUSIONES

- Las microestructuras presentes en la zona de soldadura unida por el proceso MMAW consiste principalmente en fases de ferrita alotrópica (FA) ferrita Widmanstätten FW y Ferrita equiaxial (FE) las dos primeras se relacionan con la alta velocidad de enfriamiento y una rápida solidificación además por la presencia de elementos de aleación (Ti y V) que favorecen a la formación de estas fases, la (FE) está asociada con el efecto del revenido de las microestructuras por la deposición subsecuente de los cordones de soldadura posteriores.
- No existe una importante variación microestructural al modificar los parámetros de Amperaje, Velocidad de Avance y Profundidad a excepción de la variación del espesor de la zona afectada por el calor.
- Los parámetros que más influyen en la microdureza de la zona afectada por el calor son la velocidad de avance y el amperaje.
- El parámetro de profundidad en el proceso MMAW no es un factor importante con respecto a la microdureza obtenida en la zona afectada por el calor, pero si es de suma importancia en la generación de porosidad.
- Con relación a los resultados mostrados en la modelación microestructural y durezas de la soldadura, estos se asemejan a los obtenidos en las muestras realizadas por el DOE.

## BIBLIOGRAFIA

1. Juan M. Medina, Corte y soldadura subacuática pp.1-5, 46-47, 52-56, 61, 68-69.
2. J. Łabanowski, D. Fydrych, G. Rogalski Underwater welding a review, Department of Materials Technology and Welding, DOI: 10.2478/v10077-008-0040-3
3. Underwater welding Amit Mukund Joshi (Mechanical Engineer) Junior Research Fellow Mechanical Engineering Department, Abril del 2000, Indian Institute of Technology I.I.T – Bombay.
4. Grubbs C. E., Reynolds T. J.: Underwater welding: seeking high quality at greater depths. *Welding Journal* 9/1998.
5. Kononenko V. Ya.: Technologies of underwater wet welding and cutting. E. O. Paton Electric Welding Institute, Kiev, Ukraine 2000.
6. Grubbs C. E., Reynolds T. J.: State-of-the-art underwater wet welding – offshore oil fields. *World Oil* 8/1998.
7. Ibarra S., Grubbs C. E., Liu S.: State of the art and practice of underwater wet welding of steel. International workshop on underwater welding of marine structures. New Orleans, USA, 1994.
8. Chigariiev V. V., Ustinov A. V.: Design-experimental estimation of the possibility of reduction of the HAZ metal cooling rate in wet underwater welding. *The Paton Welding Journal* 5/2000.
9. Rowe M., Liu S.: Final report MT-CWJCR-099-032. Global Industries, 1999.
10. Liu S., Pope A., Daemen R.: Welding consumables and weldability. International workshop on underwater welding of marine structures. New Orleans, USA, 1994.
11. Pessoa E., Bracarense A., Zica E., Liu S., Guerrero F.: Porosity variation along multipass underwater wet welds and its influence on mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology* 179/2006.
12. Rowe M., Liu S., Reynolds T. J.: The effect of ferro-alloy additions and depth on the quality of underwater wet welds. *Welding Journal* 08/2002.

13. Special Welds [Internet] [consultado 2010 Abril 16] Disponible: [www.specialwelds.com](http://www.specialwelds.com).
14. [Internet] [consultado 2010 Mayo 12] Disponible: [www.pommec.com](http://www.pommec.com)
15. Zhang X., Ashida E., Shono S., Matsuda F.: Effect of shielding conditions of local dry cavity on weld quality in underwater Nd:YAG laser welding. Journal of Materials Processing Technology 174/2006.
16. Szelagowski P., Pachniuk I.: State of the art and practice of underwater hyperbaric dry welding. International workshop on underwater welding of marine structures. New Orleans, USA, 1994.
17. Johnsen M. R.: Keeping shipshape through underwater welding. Welding Journal 11/2001.
18. Łabanowski, D. Fydrych, G. Rogalski Gdańsk University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Materials Technology and Welding, Gdańsk, Poland, DOI: 10.2478/v10077-008-0040-3
19. D.J Keats, Enero de 2004, Underwater Wet Welding: A Welder's Mate, Woodhead Publishing Limited, West Yorkshire, UK.
20. United States Navy, junio 2002, U.S Navy Underwater Cutting and Welding Manual, Naval Sea Systems Command, USA.
21. American Welding Society, 1981, Underwater Welding of Offshore Platforms and Pipelines, American Welding Society Education Department, Louisiana USA.
22. New Electrode Advances, Underwater Welding Technology. Un nuevo electrodo para soldadura bajo el agua introducido por el investigador del "Ohio Sea Grant", Dr. Chon Tsai que disminuye la magnitud del efecto del agua sobre el material soldado.  
<http://www.sg.ohio-state.edu/publications/water/tl-0199welding.html>
23. Electrodo especial [Internet] "Black Beauty" [consultado 2010 junio 18] Disponible: <http://www.seagrantnews.org/news/ohwelding.html>
24. Fosca, Carlos. Soldabilidad de los aceros. Pontificia Universidad Católica de Peru, 2002.
25. Ibarra, S, Grubbs, C, Olson, D, 1987, The nature of metallurgical reactions in underwater wet welding 19<sup>th</sup> Annual offshore Technology conference Report OTC 5388. Houston

26. Snyder, J.P. Pense, A.W. 1982, The effects of titanium on submerged arc welding metal. *Welding journal*. 61(7)pp. 201,211.
27. Suga, Y., Hasui, A., 1986, On formation of porosity in underwater wet weld metal, (The first report). *Transactions of the Japan welding society*. 17 (1):58-64.
28. Determination of necessary minimum preheating temperature [Internet] N. Yurioka et. al. , "Prediction of HAZ hardness of ferritic steels" [consultado 2010 Oct 10]. Disponible en: <http://homepage3.nifty.com/yurioka/exp.html>
29. García, Y. "Condiciones de embridamiento en estructuras soldadas de alto peso y rigidez. Grietas y reparación". Tesis doctoral. 2005
30. Martínez García Ramón C. "Obtención del valor de las variables del proceso de soldadura automática por arco sumergido (SAW) en la recuperación de árboles de molinos de caña de acero 30r (guijos) agrietados". Tesis Doctoral. 2006
31. Nguyen N. T., Y.-W. Mai, S. Simpson, And A. Ohta "Analytical approximate solutions for double ellipsoidal heat sources in finite thick plate have been derived and calibrated with the experimental data". *Welding Research. Supplement. Welding Journal*, MARCH 2004
32. Essers, W. G., and Walter, R.. "Heat transfer and penetration mechanisms with GMA and plasma-GMA welding". *Welding Journal* 60(2): 37-s to 42-s. (1991)
33. EWI [Internet] Welding Predictor [consultado 2010 Nov 03] Disponible: <http://www.ewi.org/>
34. Rafael Quintana Puchol; Lorenzo Perdomo González; Alejandro Duffus Scott; Alexandre Queiroz Bracarense and Ezequiel Caires Pereira Pessoa; Abr/Jun 2009; Consideraciones Termodinámicas Entre la Formación de Poros y la Presión Hidrostática Durante la Soldadura Subacuática Mojada; *Soldagem Insp. São Paulo*, Vol. 14, No. 2, p.161-169.
35. Ando, S., Asahani, T. A. Study on the Metallurgical Properties of Steel Welds with Underwater Gravity Welding.
36. Martínez García, Modelación de ciclos térmicos en la soldadura subacuática mojada, VI Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica COMEC 2010.

37. Sindou Kou. Welding Metallurgy. Second. Edition. A Jhon Wiley & sons, Inc., Publication.
38. Sanchez-Osio, A. and S. Liu "Influence of consumable composition and solidification on Inclusion Formulation and Growth in Low Carbon Steel Underwater Welds", Welding Research Council Bulletin, no 339, pp 1-59, February 1995.
39. Turkdogan, E.T. 1983 Physiochemical Properties of Molten Slags and Glasses, The Metals Society. London pp. 70-75
40. Welding of Pipelines and Related Facilities, 20th Ed., API Standard 1104, American Petroleum Institute, Washington D.C., 2005, pp. 43-50

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Proceso de soldadura por MMAW en pierna de plataforma	4
<b>Figura 2.1</b>	Técnicas utilizadas en la actualidad de soldadura marina	11
<b>Figura 2.2</b>	Soldadura húmeda de ranura en V depositada a 100m de profundidad (a) su imagen en radiografía imagen (b)	12
<b>Figura 2.3</b>	Método de soldadura local (1) tobera de soldadura, (2) electrodo, (3) gas de protección, (4) boquilla exterior, (5) agua, (6) cubierta elástica, (7) burbujas de gas, (8) elemento soldado, (9) arco, (10) soldadura.	13
<b>Figura 2.4</b>	Soldaduras obtenidas por el método de soldadura de cavidad local.	14
<b>Figura 2.5</b>	Soldadura submarina en condición seca	15
<b>Figura 2.6</b>	Componentes del proceso de soldadura manual por arco	17
<b>Figura 2.7</b>	Clasificación AWS de los electrodos.	21
<b>Figura 2.8</b>	Zona afectada por el calor.	26
<b>Figura 2.9</b>	Microestructuras de un mismo acero de bajo %C, sometido a diferentes Microestructuras de un mismo acero de bajo %C, sometido a diferentes Microestructuras de un mismo acero de bajo %C, sometido a diferentes tratamiento s térmicos. a) estructura bainítica b) estructura martensítica.	27
<b>Figura 2.10</b>	Porosidad en función a la profundidad del agua.	31
<b>Figura 2.11</b>	Contenido de oxígeno en función a la profundidad.	32
<b>Figura 2.12</b>	Contenido de carbono en función a la profundidad.	32
<b>Figura 2.13</b>	Efecto de la profundidad del agua en la composición química.	34
<b>Figura 2.14</b>	Efecto del contenido de oxígeno en el metal de soldadura con el % de volumen de inclusiones.	35
<b>Figura 2.15</b>	Efecto de la presión ejercida por el agua con respecto a la porosidad encontrada en distintos cupones.	36
<b>Figura 2.16</b>	Micrografía de una grieta en frío con una estructura bainítica de la zona afectada por el calor.	39
<b>Figura 2.17</b>	Técnica de autoconsumo para soldadura MMAW.	45
<b>Figura 2.18</b>	Arco eléctrico de soldadura submarina.	49
<b>Figura 3.1</b>	Desarrollo Experimental.	56
<b>Figura 3.2</b>	Máquina de tensión marca TINIUS-OLSEN y probetas realizadas a partir de las secciones de tubería API 5L X 52.	58

<b>Figura 3.3</b>	Máquina de pruebas de impacto con temperatura controlada.	59
<b>Figura 3.4</b>	Esquema de los cupones de soldadura aplicados en el proceso MMAW.	60
<b>Figura 3.5</b>	Dimensiones específicas de las placas conforme al diseño de experimentos realizado.	67
<b>Figura 3.6</b>	Diseño de la junta correspondiente al DOE realizado.	68
<b>Figura 4.1</b>	A) Microestructura correspondiente a un Acero API 5L X52 B) Inclusiones no metálicas del tipo sulfuro de manganeso A ½ d y D1d tipo Oxido.	70
<b>Figura 4.2</b>	Experimentación previa utilizando parámetros fuera de rango (130A, 140A, 150A) a) Soldador ajustando parámetros a utilizar b) Soldadura aplicada a 135A c) soldadura realizada a 150A mostrando una mala calidad de penetración y aspecto visual d) realización de soldadura MMAW a 1.10m de profundidad de trabajo.	71 - 72
<b>Figura 4.3</b>	Macrografía correspondiente a pruebas realizadas en la parte exploratoria.	72
<b>Figura 4.4</b>	Micrografías correspondientes a) Zona afectada por el calor b) soldadura c) soldadura.	73
<b>Figura 4.5</b>	Aspecto general de los cupones de soldadura unidos a diferentes parámetros a) S4, b) S3 c) S2.	74
<b>Figura 4.6</b>	Macrografías soldadas a diferentes parámetros a) S5 b) S18 c) S7 d) S17 e) S1 f) S9.	75
<b>Figura 4.7</b>	Macroataque de la sección transversal, de la muestra S17, mostrando los diferentes cambios microestructurales presentes en la soldadura.	76
<b>Figura 4.8</b>	Micrografía de la muestra S17 obtenida a 500X se revelan granos columnares de ferrita alotriomórfica (FA) Widmanstatten (FW).	76
<b>Figura 4.9</b>	Micrografía obtenida a 500X de la probeta S17 constituida por ferrita equiaxial y perlita.	77
<b>Figura 4.10</b>	Micrografía obtenida a 200X de la probeta S17 cuyo constituyente principal es ferrita Widmanstatten (FW) y ferrita alotriomórfica (FA).	77
<b>Figura 4.11</b>	Micrografía obtenida a 500X de la probeta S17 cuyo principal constituyente es ferrita equiaxial con trazas de perlita.	78
<b>Figura 4.12</b>	Muestra S5 macrografía evaluando 4 puntos de la zona afectada por el calor.	79



<b>Figura 4.13</b>	Gráfica de efectos principales para ZAC (mm).	79
<b>Figura 4.14</b>	Gráfica de efectos principales para la microdureza Hv, 5gr en la zona afectada por el calor.	81
<b>Figura 4.15</b>	Probeta de Tensión.	83
<b>Figura 4.16</b>	a) Aspecto físico de las probetas de doblez, b) punzón de 1 ½" de espesor sometiendo las probetas a doblez, c) probetas con atrapamiento de escoria en la fractura de la soldadura.	84
<b>Figura 4.17</b>	Máquina de ensayo Charpy (Laboratorio de pruebas Mecánicas COMIMSA 2010) b) Criogénico sometiendo los especímenes a 0°C o 32°F c) dimensiones de las probetas de impacto.	85
<b>Figura 4.18</b>	Parámetros del DOE a) S11 Tiempo de enfriamiento 11.45 s b) S6 Tiempo de enfriamiento 12.95 s c) S13 Tiempo de enfriamiento 14.61 s.	86
<b>Figura 4.29</b>	Parámetros del DOE A) S7 Tiempo de enfriamiento 4.029 s B) S17 Tiempo de enfriamiento 4.64 s C) S1 Tiempo de enfriamiento 5.28 s.	86
<b>Figura 4.20</b>	Distribución de picos de temperatura (°C).	87
<b>Figura 4.21</b>	Distribución de Ferrita Equiaxial (F1).	88
<b>Figura 4.22</b>	Distribución de Ferrita Alotriomórfica (F2).	88
<b>Figura 4.23</b>	Distribución de Ferrita Widmanstätten (F3).	89
<b>Figura 4.24</b>	Distribución de la dureza en Hv, 500gr en la región de la soldadura y zona afectada por el calor.	89

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b>	Ajuste de corriente para soldaduras bajo el agua.	46
<b>Tabla 2.2</b>	Electrodos de soldadura seca adecuados para soldadura bajo el agua.	53
<b>Tabla 3.1</b>	Parámetros utilizados en la parte exploratoria	61
<b>Tabla 3.2</b>	Parámetros aplicados en el desarrollo experimental.	62
<b>Tabla 3.3</b>	Parámetros propuestos por el DOE en la unión de secciones de tubería API 5L X52 soldados por el proceso MMAW.	63
<b>Tabla 4.1</b>	Análisis Químico del metal base.	69
<b>Tabla 4.2</b>	Resultados del ensayo de dureza del acero API 5L X52.	70
<b>Tabla 4.3</b>	Composición química del metal de aporte.	71
<b>Tabla 4.4</b>	Valores de dureza Hv, 500gr correspondientes a 5 muestras.	73
<b>Tabla 4.5</b>	Análisis de varianza correspondiente al diseño experimental para la ZAC (mm).	80
<b>Tabla 4.6</b>	Análisis de varianza correspondiente al diseño experimental para la dureza Hv, 500gr en la ZAC.	81
<b>Tabla 4.7</b>	Resultados de la prueba de tensión.	82

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

<b>Nombre</b>	<b>Pedro Hernández Gutiérrez</b>
<b>Grado a obtener</b>	Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial
<b>Título de Tesis</b>	Comportamiento microestructural de un acero API-5L - X52 soldado por el proceso MMAW en ambientes marinos
<b>Títulos obtenidos</b>	Especialista en Tecnología de la soldadura Industrial Ingeniero en Materiales
<b>Universidades</b>	Corporación Mexicana de Investigación en Materiales Instituto Tecnológico de Saltillo
<b>Campo profesional</b>	Producción, Calidad y Procesos
<b>Experiencia profesional</b>	COMIMSA S.A de C.V. Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial  Zf Sachs Automotive México S.A. de CV. Calidad Laboratorio Metalúrgico  Sealed Power Autopartes S.A de CV. Supervisor de Producción  Termimex S.A de CV Ingeniero de Proyectos  San Luis Rassini División Frenos S.A de CV Supervisor de Producción  Altos Hornos de México S.A de CV Analista Físico e Ing. de Procesos
<b>Lugar y fecha de nacimiento</b>	Puebla, Puebla, 04 de Marzo de 1979
<b>Nombre de padres</b>	Pedro Filiberto Hernández Y López Concepción Gutiérrez García