

T
671.52
MOS



CIB-ESPOL



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencia de la

Producción

**“APLICACIÓN DE SOLDADURA HÚMEDA, MEDIANTE
SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE ELECTRODO REVESTIDO
BAJO AGUA”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Paul Aníbal Mosquera Martínez



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

GUAYAQUIL-ECUADOR

AÑO 2005

AGRADECIMIENTO



CIB-ESPOL

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente al Ing. Julián Peña Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA



CIB-ESPOL

A MIS PADRES

TRIBUNAL DE GRADUACION



Ing. Eduardo Rivadeneira P.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



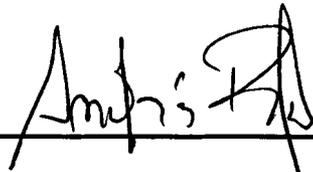
Ing. Julián Peña E.
DIRECTOR DE TESIS



CIB-ESPOL



Ing. Omar Serrano V.
VOCAL



Ing. Andrés Rigail C.
VOCAL

DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”



CIB-ESPOL

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Sr Paul Mosquera Martínez

RESUMEN

El tema a continuación trata sobre la soldadura húmeda mediante el proceso de electrodo revestido (SMAW), que aunque ha sido muy utilizado en los diferentes trabajos submarinos, ha visto limitado su desarrollo debido a que esta se ejecuta en un medio tan perjudicial para la soldadura como lo es el agua, al igual que a las condiciones adversas en la que por lo general deben ser realizados estos trabajos. Sin embargo desde hace pocos años la soldadura húmeda ha evidenciado un creciente desarrollo, producto del estudio de aquellos fabricantes responsables en la elaboración de dichos electrodos, como también de la participación activa de los diferentes centros de buceo que se encargan de la preparación de los buzos /soldadores y de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS).

El presente estudio está conformado por cuatro capítulos, el primero abarca todo lo concerniente a los fundamentos de la soldadura húmeda, aquí conoceremos de manera más detallada el principio de la misma, así como también los equipos requeridos y consumibles necesarios para este tipo de trabajos; adicionalmente se analizarán algunos aspectos metalúrgicos



inherente a la soldadura húmeda, así como los defectos más propensos que han hecho realmente complicado su desarrollo, de igual manera se procede a realizar una breve iniciación para conocer de mejor forma el código AWS D3.6M "Especificación de soldadura bajo agua" el mismo que es muy utilizado en este campo, todo esto acompañado por las recomendaciones de seguridad que son importantes considerar cuando un proceso de soldadura como el electrodo revestido es ejecutado en un medio submarino.

El capítulo dos abarca propiamente la parte experimental donde se describe los materiales y equipos a utilizarse al igual que la selección de parámetros y condiciones en la que se efectuará la práctica, es así que se procederá entonces a soldar 6 probetas de 9 mm de espesor de un acero de bajo carbono en junta a tope y con bisel, la soldadura a utilizar corresponde a la marca Hydroweld, empresa líder en el desarrollo de electrodos para soldadura húmeda; la posición a soldar es la 1G (plano); por ser el agua un medio desfavorable para la soldadura no se procederá a realizar una variación planificada ni del amperaje, ni de la velocidad de avance para estudiar el comportamiento de esta, más bien se buscará trabajar con los parámetros más óptimos de tal forma de asegurar la calidad de la misma, y que sean estas ligeras variaciones las que nos permitan desarrollar un estudio. Luego de esto se elaborará la respectiva tabla de datos que estará conformada por la información recabada en la práctica, de igual forma los

resultados que brindarán los ensayos realizados para el mejor entendimiento de la soldadura húmeda son también encuadrados en una tabla que se le llamará tabla de resultados.

Todo lo anterior se convertirá en una herramienta de información que nos brindará en el capítulo tres la oportunidad de desarrollar diferentes cuadros y gráficos de algunos de estos datos y resultados en comparación con otros, de tal manera de analizar lo obtenido hasta el momento.

En la parte final del presente trabajo, esto es en el capítulo cuatro, se emitirán conclusiones sobre la práctica que en definitiva permitirá conocer de mejor manera el comportamiento de la soldadura húmeda, luego de aquello se elaborarán las recomendaciones que aportarán con más ideas orientadas a brindar mayor información que esperamos sirvan de ayuda para futuros trabajos en el campo de la soldadura húmeda.



CIB-ESPOL

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
INTRODUCCIÓN.....	1
 CAPITULO I	
1. PRINCIPIOS DE LA SOLDADURA HÚMEDA.....	4
1.1 ANTECEDENTES DE LA SOLDADURA HÚMEDA	4
1.2 PRINCIPIOS DE ESTE PROCESO.....	11
1.3 EQUIPOS Y CONSUMIBLES.....	17
1.3.1 EQUIPOS Y ACCESORIOS.....	17
1.3.2 ELECTRODOS CONVENCIONALES.....	36
1.3.3 ELECTRODOS PARA SOLDADURA HÚMEDA.....	39
1.4 ASPECTOS METALÚRGICOS.....	48
1.4.1 MICROESTRUCTURA DE LA JUNTA SOLDADA.....	48
1.4.2 DEFECTOS DE SOLDADURA.....	58
1.5 INICIACIÓN Y ASPECTOS RELACIONADOS CON EL CÓDIGO AWS D 3.6 M " ESPECIFICACIÓN DE SOLDADURA BAJO AGUA".....	71
1.6 SEGURIDAD BAJO EL AGUA.....	87
1.7 METODOLOGÍA Y SELECCIÓN DE VARIABLES.....	93

CAPITULO 2

2. EJECUCIÓN EXPERIMENTAL DE LA SOLDADURA	107
2.1 MATERIAL A UTILIZAR.....	110
2.1.1 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS.....	110
2.1.2 PROPIEDADES DEL MATERIAL BASE.....	117
2.1.3 SOLDABILIDAD.....	119
2.1.4 MATERIAL DE APORTE.....	121
2.2 SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE SOLDADURA.....	123
2.3 ENSAYOS DE SOLDADURA.....	136
2.3.1 INSPECCION VISUAL.....	136
2.3.2 INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA.....	136
2.3.3 ANÁLISIS METALOGRÁFICO.....	138
2.3.4 DILUCIÓN.....	143
2.3.5 ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	146
2.3.6 ENSAYOS DE DOBLADO.....	151
2.3.7 ENSAYO DE DUREZA.....	153

**CAPITULO 3**

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	156
--	-----

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	174
--	-----

APÉNDICES	179
------------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	181
---------------------------	-----

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1	Equipos de buzos de La Segunda Guerra Mundial. Pág.	5
Fig. 1.2	Reparación de Plataforma Petrolífera década '60.....	6
Fig. 1.3	Plataforma Petrolífera.....	8
Fig. 1.4	Desarrollo de una soldadura seca en tubería.....	12
Fig. 1.5	Trabajos de soldadura húmeda en una brida.....	14
Fig. 1.6	Trabajos de soldadura húmeda en casco de buque	14
Fig. 1.7	Circuito del proceso en polaridad directa.....	17
Fig. 1.8	Fuente de poder de corriente constante.....	20
Fig. 1.9	Esquema del circuito de corriente de soldadura.....	22
Fig. 1.10	Porta-electrodo para soldadura húmeda.....	24
Fig. 1.11	Porta- electrodo para soldadura húmeda	24
Fig. 1.12	Interruptor de seguridad.....	26
Fig. 1.13	Cables eléctricos para soldadura húmeda.....	27
Fig. 1.14	Pinza de tierra para soldadura húmeda.....	29
Fig. 1.15	Cables umbilicales.....	30
Fig. 1.16	Traje de buzo.....	34
Fig. 1.17	Casco y lentes oscuros de protección.....	35
Fig. 1.18	Electrodo convencional.....	39



Fig. 1.19	Electrodo para soldadura húmeda.....	47
Fig. 1.20	Velocidades de enfriamiento del acero en diferentes medios	50
Fig. 1.21	Proceso de solidificación de la soldadura.....	52
Fig. 1.22	Célula dendrítica del metal soldado.....	53
Fig. 1.23	Diagrama Hierro – Carbono y temperatura en diferentes puntos de la junta soldadas.....	56
Fig. 1.24	Ilustración de la Zona soldada, ZAC y material base....	57
Fig. 1.25	Sobre-espesor en junta soldada.....	60
Fig. 1.26	Comportamiento de esfuerzos residuales.....	62
Fig. 1.27	Porosidad dispersa.....	65
Fig. 1.28	Falta de penetración.....	65
Fig. 1.29	Socavado lateral en filete.....	66
Fig. 1.30	Curva de solubilidad del hidrógeno.....	69
Fig. 1.31	Fisuración asistida por hidrógeno.....	71
Fig. 1.32	Supervisión y seguridad en superficie.....	92
Fig. 2.1	Recipiente diseñado para la práctica en Taller.....	109
Fig. 2.2	Traje de buzo de Neopreno.....	110
Fig. 2.3	Máquina de soldar Lincoln.....	112
Fig. 2.4	Interruptor de seguridad.....	113
Fig. 2.5	Compresor de pistones.....	114

Fig. 2.6	Posicionador de probeta para piscina.....	115
Fig. 2.7	Recipiente posicionador de taller.....	116
Fig. 2.8	Adecuando la posición a trabajar y conectando la pieza de tierra.....	124
Fig. 2.9	Buzo /soldador se prepara a ejecutar soldadura.....	124
Fig. 2.10	Vista lateral de ejecución de soldadura.....	125
Fig. 2.11	Inicio de arco vista posterior.....	125
Fig. 2.12	Ejecución de la soldadura vista desde superficie... ..	126
Fig. 2.13	Desarrollo de la soldadura desde otra vista.....	126
Fig. 2.14	Retiro del posicionador una vez ejecutada la soldadura.....	127
Fig. 2.15	Diseño de junta.....	129
Fig. 2.16	Probeta 3, ejecutada en taller.....	130
Fig. 2.17	Probeta 4, ejecutada en taller.....	131
Fig. 2.18	Probeta 5, ejecutada en taller.....	131
Fig. 2.19	Probeta 6, ejecutada en taller.....	132
Fig. 2.20	Probeta 7, ejecutada en taller.....	132
Fig. 2.21	Probeta 8, ejecutada en taller.....	133
Fig. 2.22	Muestra de probeta 5.....	140
Fig. 2.23	Muestra de probeta 7.....	140
Fig. 2.24	Muestra de probeta 8.....	141

Fig. 2.25 Micrografía de la muestra (probeta 8) aumento de 800 X.....	142
Fig. 2.26 Dilución entre A -B y A-C.....	143
Fig. 2.27 Diagrama Tensión-Deformación.....	148
Fig. 2.28 Geometría de probeta	149
Fig. 2.29 Muestra de tracción de probeta 5.....	149
Fig. 2.30 Muestra de doblado probeta 5.....	151
Fig. 3.1 Probetas de prácticas en piscina (inicio y final).....	157
Fig. 3.2 Probeta 7 ejecutada en taller.....	159
Fig. 3.3 Perfil de soldadura aceptado para junta a tope.....	160
Fig. 3.4 Dilución Vs Calor aportado.....	169
Fig. 3.5 Dureza Vs. Sección transversal de la junta (muestra de probeta 5).....	171
Fig. 3.6 Dureza Vs Sección Transversal de la junta (muestra de probeta 7).....	172
Fig. 3.7 Dureza Vs Sección Transversal de la junta (muestra de probeta 8).....	173



INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Selección del tipo de cable.....	31
Tabla 2	Amperaje utilizado para 6013 y electrodo especial .para soldadura húmeda 1/8".....	48
Tabla 3	Variables de la soldadura húmeda.....	86
Tabla 4	Profundidad límite para calificación de soldadura.....	106
Tabla 5	Soldabilidad de los aceros.....	118
Tabla 6	Composición química del material base.....	119
Tabla 7	Propiedades mecánicas del metal base.....	119
Tabla 8	Datos experimentales en piscina.....	123
Tabla 9	Datos experimentales de taller	133
Tabla10	Procedimiento de revelado de películas.....	138
Tabla11	Porcentaje de dilución y calor aportado.....	145
Tabla12	Resultado de los ensayos de tracción.....	150
Tabla13	Resultado de ensayo de doblado.....	152
Tabla 14	Resultado de ensayo de dureza.....	155
Tabla 15	Resultados promedio de práctica de taller	158
Tabla 16	Resultados de inspección radiográfica.....	163

INTRODUCCIÓN

Los trabajos de soldadura realizados en aquellos materiales que se encuentran bajo el agua han representado siempre para el hombre, un procedimiento altamente costoso que en definitiva ha provocado el encarecimiento del trabajo e incluso la no ejecución de algunos de ellos. Por todo esto los interesados en el tema han volcado su atención a la soldadura húmeda, la misma que permite mayor versatilidad a un costo muy razonable.

La tesis a continuación entonces tratará sobre la soldadura húmeda, la misma que ha sido vista en algunas ocasiones como una soldadura deficiente y pobre con respecto a la soldadura superficial o convencional, debido a la presencia de diferentes tipos de defectos como fisuras y poros, todo esto acompañado de una serie de factores y variables que no están presentes en la soldadura en superficie como lo son la visibilidad, las corrientes marinas, profundidad y el agua; esta es la razón por la que se ha hecho mucho más difícil el desarrollo de cualquier proceso de soldadura en este medio. Sin embargo han existido procesos de soldadura que han ayudado a cumplir, a que los trabajos bajo agua puedan satisfacer las

exigencias requerida por el fabricante, esta es la soldadura seca bajo agua, el inconveniente se presenta entonces en la versatilidad del proceso y en el costo que maneja el mismo.

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 y cañerías. Aún así su alcance se ha visto limitado a las exigencias del fabricante y a los códigos que las norman.



CIB-ESPOL

Sin embargo en años recientes ha existido una apreciable mejora en el proceso SMAW 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 como la soldadura "Sociedad Americana de Soldadura" AWS y la actividad del buceo "Sociedad Americana de Buzos"

Es así que tomando en consideración el nuevo panorama que se le presenta a este proceso en el medio submarino, se ha procedido a realizar en este estudio una práctica experimental en un acero de bajo contenido de carbono de 9 mm de espesor en junta a tope en posición 1G, con la finalidad de que el mismo aporte con mayor información que ayude al entendimiento y estudio de la soldadura húmeda, para esto se ha recabado información de diferentes medios que permitan aportar conclusiones que nos ayuden a comprender de mejor forma el comportamiento de la soldadura húmeda, permitiéndonos tener una idea mucho más clara del verdadero potencial de la misma en nuestro País y sus beneficios en el desarrollo de las diferentes áreas en las que pueda ser aplicada.

CAPITULO 1



CIB-ESPOL

1. PRINCIPIOS DE LA SOLDADURA HÚMEDA

1.1 Antecedentes de la Soldadura Húmeda

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

Sin embargo la soldadura húmeda, siempre ha sido vista como una soldadura pobre en relación con aquellas realizadas en superficie, pero en contradicción con esto la soldadura húmeda

es el proceso más extensamente usado para reparaciones submarinas, su versatilidad, bajo costo y gran efectividad provee una alternativa viable a los métodos tradicionales como un dique seco; los sistemas de soldadura submarinos 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.

Esta actividad fue perfeccionándose desde comienzos del siglo XX, y en la segunda guerra mundial. En la figura 1.1 se realizan reparaciones en buques y puertos con muy buen resultado (Ref 1).

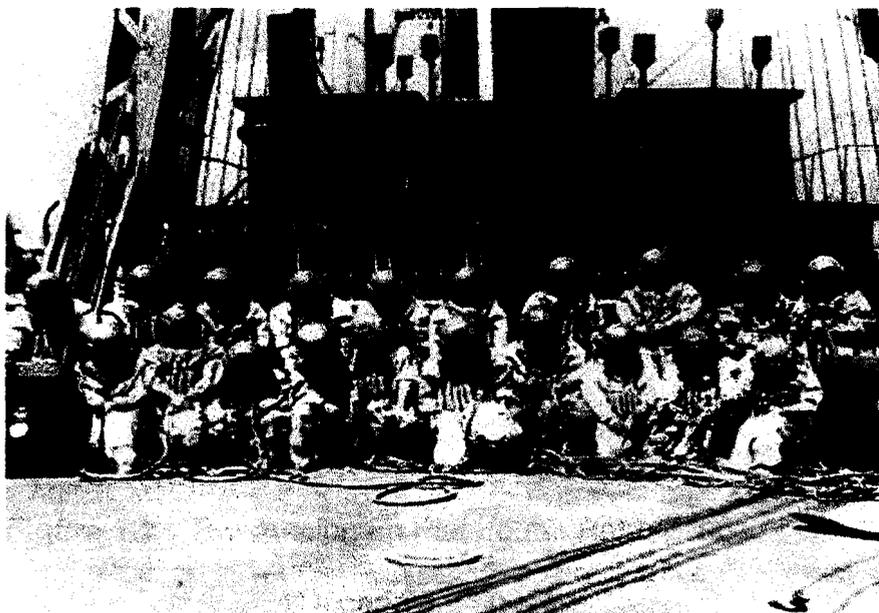
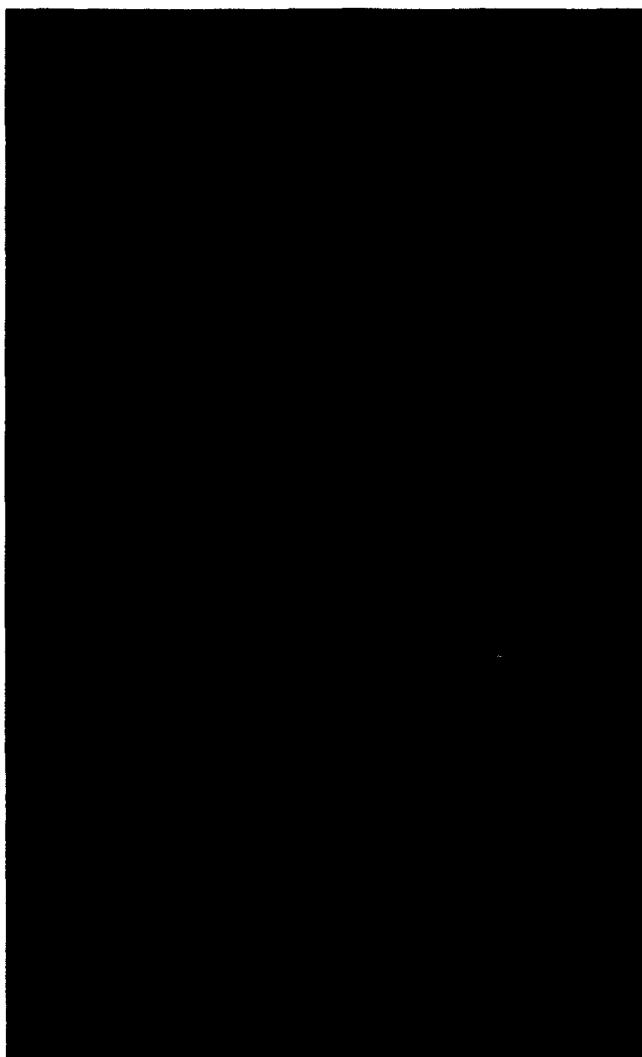


Figura 1.1 Equipos de Buzos de la Segunda Guerra Mundial

Pero su incremento ascendente comienza a partir de la década del '60 debido a la demanda originada por la industria petrolífera en alta mar (Offshore), en estructuras sumergidas con tuberías y cañerías, figura 1.2 (Ref.1)



CIB-ESPOL

Figura 1.2 Reparación en Plataforma Petrolífera.

Década del 60

Desde entonces, casi todas las tareas de soldadura húmeda fueron realizadas por personas que han perfeccionado su aplicación en este medio. En años recientes la Marina de Los Estados Unidos ha ocupado un rol muy importante en el desarrollo de nuevas técnicas de soldadura húmeda, esto ha ocurrido principalmente en respuesta al constante incremento de los costos laborales de astilleros y diques secos. A continuación se mencionará un caso concreto:

La Inactivación del crucero "USS Newport New", a fines de 1975 donde 62 aberturas de un casco fueron obturadas, requiriendo 53 días de trabajo y un equipo de 18 buzos/soldadores; se emplearon 504 horas/hombre de soldadura y se consumieron 500 libras de electrodos; no obstante a esto, se obtuvo un beneficio considerable: el ahorro del 50% de los costos, que aquellos que se hubiesen requerido para completar las mismas tareas en un dique seco (Ref. 1)

Otras aplicaciones para la soldadura húmeda incluyen la reparación y mantenimiento de transportes nucleares; tal como sucedió en el siguiente caso:

En febrero de 1990, se reparó una pequeña filtración en una chapa de la tubería del canal transbasador de combustible localizado en la planta nuclear de "Wolf Creek" en Kansas; se emplearon 2 días de trabajo y el buzo empleó un total de 3 ½ horas en el agua durante la inspección y reparación; si esto se hubiera realizado en la superficie, un equipo de 6 personas hubieran empleado 6

días para secar y descontaminar las piezas, un día para inspeccionar y reparar y 2 días más para rellenar la tubería; de esta forma se logró hacer el trabajo “ahorrando un 80% de los costos estimados de la reparación y se redujeron enormemente los riesgos de exposición del personal (Ref. 1).

Desde 1971 en plataformas petrolíferas, figura 1.3, se han reportado cientos de reparaciones subacuáticas mediante soldadura, sin que se conocieran fallas.



CIB-ESPOL

Si bien la soldadura seca es la técnica predominante, la soldadura submarina es, a veces el único método a emplear para solucionar un problema.



Figura 1.3 Plataforma Petrolífera

Aún así no fue tan fácil conseguir resultados favorables en la soldadura húmeda, esta es la razón por la que la producción de soldadura en este medio no fue vista sino hasta hace poco como una opción valedera, 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: Sociedad Americana de Soldadura AWS, las escuela de Buzos / Soldadores y los fabricantes de soldadura, intercambien información para permitir el desarrollo de este campo que hasta ese momento aún existiendo la necesidad, era muy poco utilizado por lo complicado que era conseguir juntas soldadas que cumplan con las especificaciones requeridas por los clientes en función a los requerimientos de servicio de las juntas a soldar.



Gran parte de esta dificultad por cumplir con dichas especificaciones, era justamente por los inconvenientes que se le presentaba 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 rodeaba al buzo / soldador es muy diferente que aquel 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 pensaba desarrollar el trabajo de soldadura; todo esto llevó a tener un personal mucho más capacitado y el resultado final fue una apreciable mejora en la calidad de la soldadura bajo agua, sin embargo no era 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.

Producto de esta investigación se consiguieron electrodos que facilitaron obtener juntas soldadas mucho más confiables y que cumplieran de mejor forma con los actuales requerimientos.

Actualmente en países como Estados Unidos y Canadá se dictan 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 (Off Shore) (Ref. 1).



1.2 Principios de este Proceso

CIB-ESPOL

La soldadura húmeda como normalmente se la conoce, es aquella soldadura utilizada para realizar trabajos bajo el agua. El término de soldadura húmeda es usado para indicar que el

desarrollo de la misma se efectúa bajo el agua, y que además está directamente expuesta a un medio húmedo.

Esta aclaración es necesaria, ya que también existe aquella soldadura bajo el agua que no tiene un contacto con ésta, la misma que es llamada "Soldadura Seca" como indica la Figura 1.4, ya que este tipo de soldadura requiere que se elimine el agua que rodea al trabajo, normalmente usando un compartimento sobre presionado con atmósfera y presión controlada. El proceso seco es costoso, pero produce soldadura que generalmente es de igual calidad que las que se realizan en superficie (Ref 1).

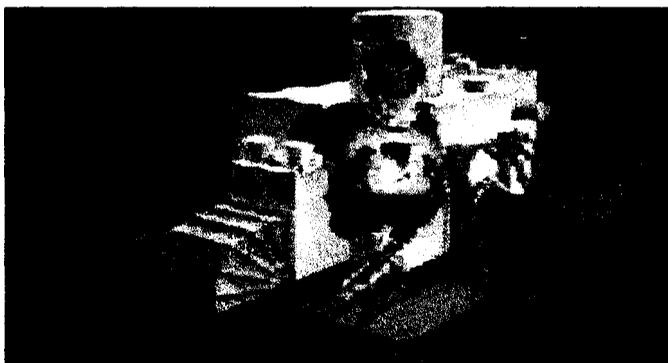


Figura 1.4 Desarrollo de una soldadura seca en tubería

A diferencia de la soldadura seca, la soldadura húmeda se la hace sin ningún cerramiento sobre presionado, existen

entonces dificultades evidentes bajo estas condiciones, ya que la misma esta plagada de rápidas extinciones de arco por efecto de tener como medio circundante el agua y una susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno.

Por lo anteriormente mencionado, el esfuerzo a la tensión y la ductilidad del material tienden a presentar decrecimientos en comparación con aquellas juntas similares hechas en superficie o en aire.

Pese a lo anteriormente expuesto se conoce también que el proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW) en materiales de acero al carbón o acero C-Mn, pueden ser hechos en agua con virtual anulación de la fragilización por hidrógeno de tal forma que elimine también la posibilidad de fisuras, con el uso de electrodos especialmente manufacturado para esta aplicación.

Es importante también mencionar que, en lugares donde la necesidad de reparaciones son mayores, es decir en áreas de agua salada, el éxito de la soldadura húmeda aumenta

enormemente ya que cuanto más alta es la salinidad del agua, mayor es la estabilidad del arco de soldadura, las sales disueltas en el agua aumentan sus cualidades electrolíticas, permitiendo de este modo un arco más caliente y una soldadura más eficiente tal como indican las figuras 1.5 y 1.6 (Ref. 1)

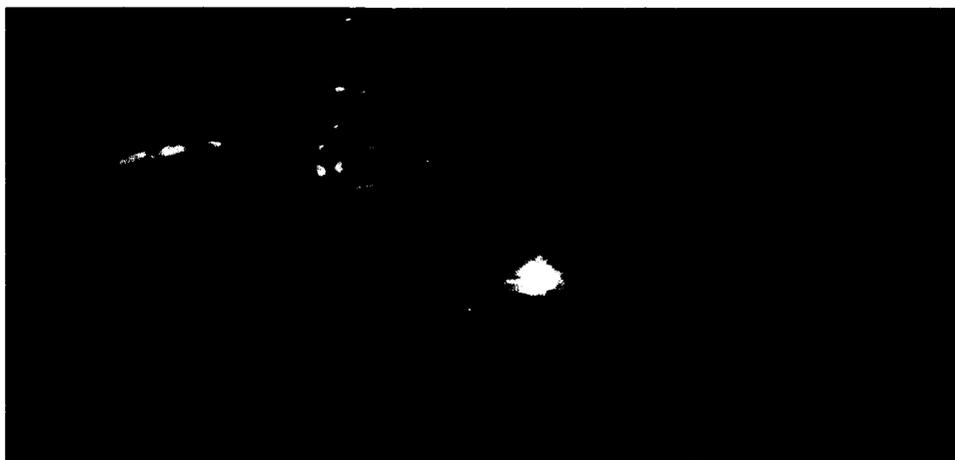


Figura 1.5 Trabajos de soldadura húmeda en una brida



CIB-ESPOL

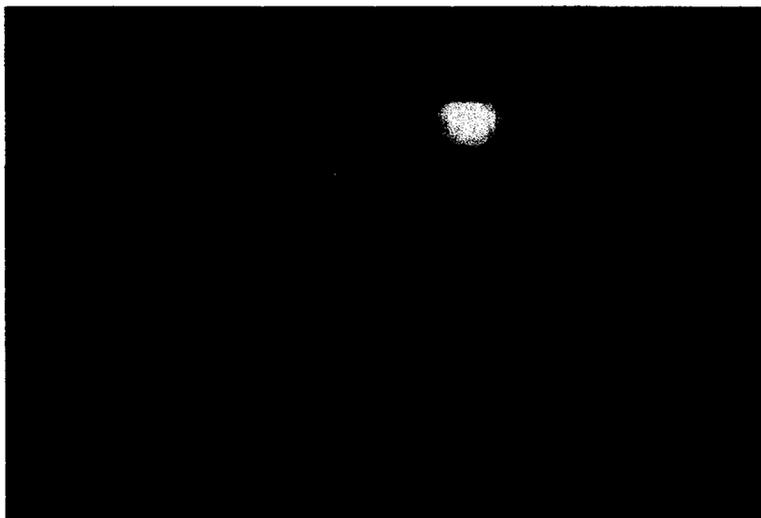


Figura 1.6 Trabajos de soldadura húmeda en casco de buque

El principio de operación de la soldadura húmeda en el proceso de electrodo revestido (SMAW) es exactamente el mismo que aquel realizado en superficie.

La soldadura por arco, es el proceso de unir uno o más metales mediante la coalescencia o junta sobre una cara de contacto por medio del calor del arco eléctrico. En el caso del proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW) se emplea un alambre de metal sólido de material estirado o colado que se denomina núcleo del electrodo el cual se encuentra recubierto por un polvo fundente.



CIB-ESPOL

El circuito de este proceso esta conformado por el material base, una fuente de poder y las conexiones respectivas que logran cerrar a este. Estas son el cable con su porta electrodo que generalmente se encuentra conectado en un extremo al polo positivo de la fuente de poder (POLARIDAD INVERSA), aunque en el caso de la soldadura húmeda lo más aconsejable es que esta conexión sea al polo negativo y un cable de tierra con su respectiva pinza que en un extremo generalmente esta conectado al polo negativo de la fuente de poder, aunque en el

caso de la soldadura húmeda lo aconsejable es que este conectado al polo positivo (POLARIDAD DIRECTA), la pinza de tierra va conectada de manera que asegure un buen contacto con el material a soldar, mientras que el electrodo colocado en su respectivo porta electrodo, permite el cierre del circuito cuando éste se pone en contacto con la pieza de trabajo, produciéndose lo que se conoce como el arco eléctrico tal como indica la figura 1.7

Este arco eléctrico genera entonces calor, que permite que se funda el recubrimiento y el núcleo del electrodo con la pieza de trabajo que se está soldando.



Una vez producido el arco de soldadura, el núcleo del electrodo continuará consumiéndose de manera progresiva aportando material a la junta a soldar mientras que el recubrimiento aportará una parte de lo consumido a la junta y otra parte a la protección gaseosa del baño de soldadura. El proceso entonces continua en avance de la soldadura mediante el movimiento del electrodo en la dirección de la junta que se desea soldar, este movimiento se lo hace al mismo tiempo que se ejerce un

presión en sentido descendente al baño de soldadura en la medida que se consume el electrodo manteniendo una longitud de arco dentro de lo posible constante (Ref.2).

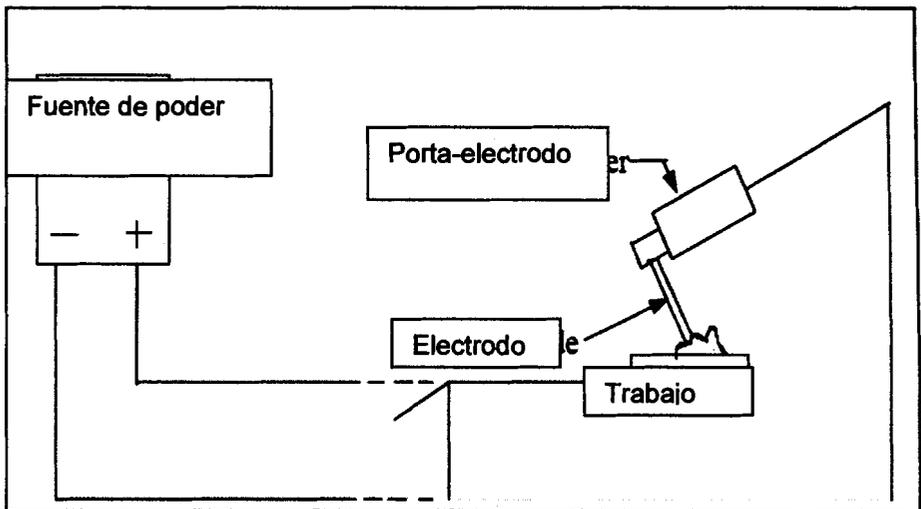


Figura 1.7 Circuito del proceso en polaridad directa

1.3 Equipos y Consumibles

1.3.1 Equipos y Accesorios

Fuente de Poder



CIB-ESPOL

La fuente requerida para formar un arco de soldadura está lejos de poder establecer la demanda de corriente y voltaje que el proceso de soldadura necesita, ya que cuando el arco se forma a causa del contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo, un corto circuito ocurre. La baja resistencia produce un pico repentino de corriente, por lo tanto una fuente de corriente diseñada

para suministrar una corriente constante ayuda a limitar estos picos repentinos eliminando así de mejor manera el excesivo chisporroteo durante la soldadura.

La fuente puede suministrar entonces corriente directa (DC) o corriente alterna (AC) al electrodo. Sin embargo la corriente alterna no es usada en la soldadura húmeda por razones de seguridad y por la dificultad de mantener un arco de soldadura estable bajo el agua.

Los equipos que proporcionan corriente con una intensidad estable, aunque varíe la tensión del arco debido a las variaciones de la longitud del mismo, apenas producirá variaciones de intensidad. De esta forma, tanto el calor de soldadura como la velocidad de fusión del electrodo apenas se verán afectados y el soldador podrá mantener un buen control sobre el baño de fusión.

Los generadores de intensidad constante tienen una característica descendente. La característica voltaje –

intensidad de un generador viene representada por una curva que nos muestra como varía el voltaje al variar la intensidad desde el valor cero (cuando el generador está en vacío y por lo tanto no circula corriente por el circuito de soldeo) hasta el valor de corto circuito (cuando el electrodo se pone en contacto con la pieza de trabajo) Figura 1.8 (Ref.3).

En las operaciones normales de soldadura se suele trabajar con tensión en vacío entre 50 y 100 voltios y con voltaje de arco que oscilan entre 18 y 36 voltios. Cuanto mayor es la tensión en vacío del generador, más fácil resulta el inicio de arco con todo tipo de electrodos. Una vez establecido el arco, el voltaje disminuye hasta el valor designado como voltaje de arco. Este voltaje depende de la longitud de arco y varía al subir o bajar el extremo del electrodo. Cuando la característica es descendente, estas variaciones de voltaje apenas influyen en el valor de la intensidad de corriente.



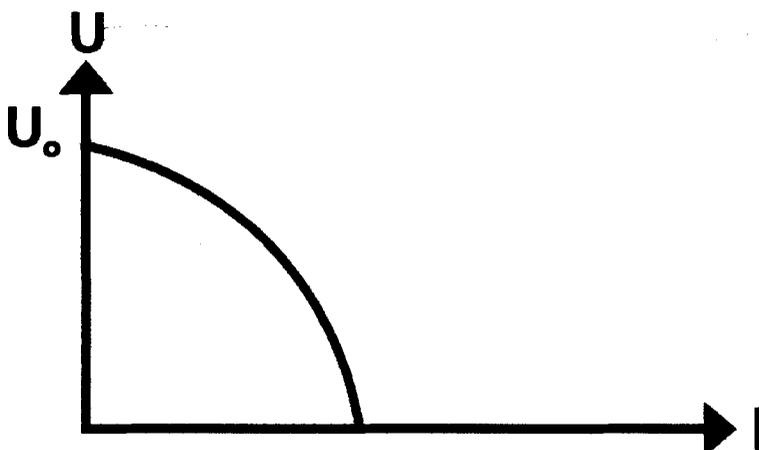


Figura 1.8 Fuente de poder de corriente constante

El valor instantáneo del voltaje de arco varía con la longitud del mismo. Según esto, durante el inicio o arranque del arco, el electrodo se pone en contacto con la pieza. En el momento del contacto (cortocircuito) la intensidad aumenta bruscamente mientras el voltaje cae prácticamente hasta el valor cero. Posteriormente, cuando el electrodo se separa para conseguir el arco, el voltaje aumenta para mantener el arco (voltaje de arco) y la intensidad disminuye hasta alcanzar el valor seleccionado para el trabajo a realizar.

Durante la soldadura si la longitud de arco aumenta, el voltaje aumenta (la intensidad disminuye ligeramente) y

cuando el arco se acorta, la tensión disminuye (la intensidad aumenta ligeramente). Esto permite al soldador variar la aportación de calor jugando con la longitud de arco, figura 1.9 (Ref. 3)

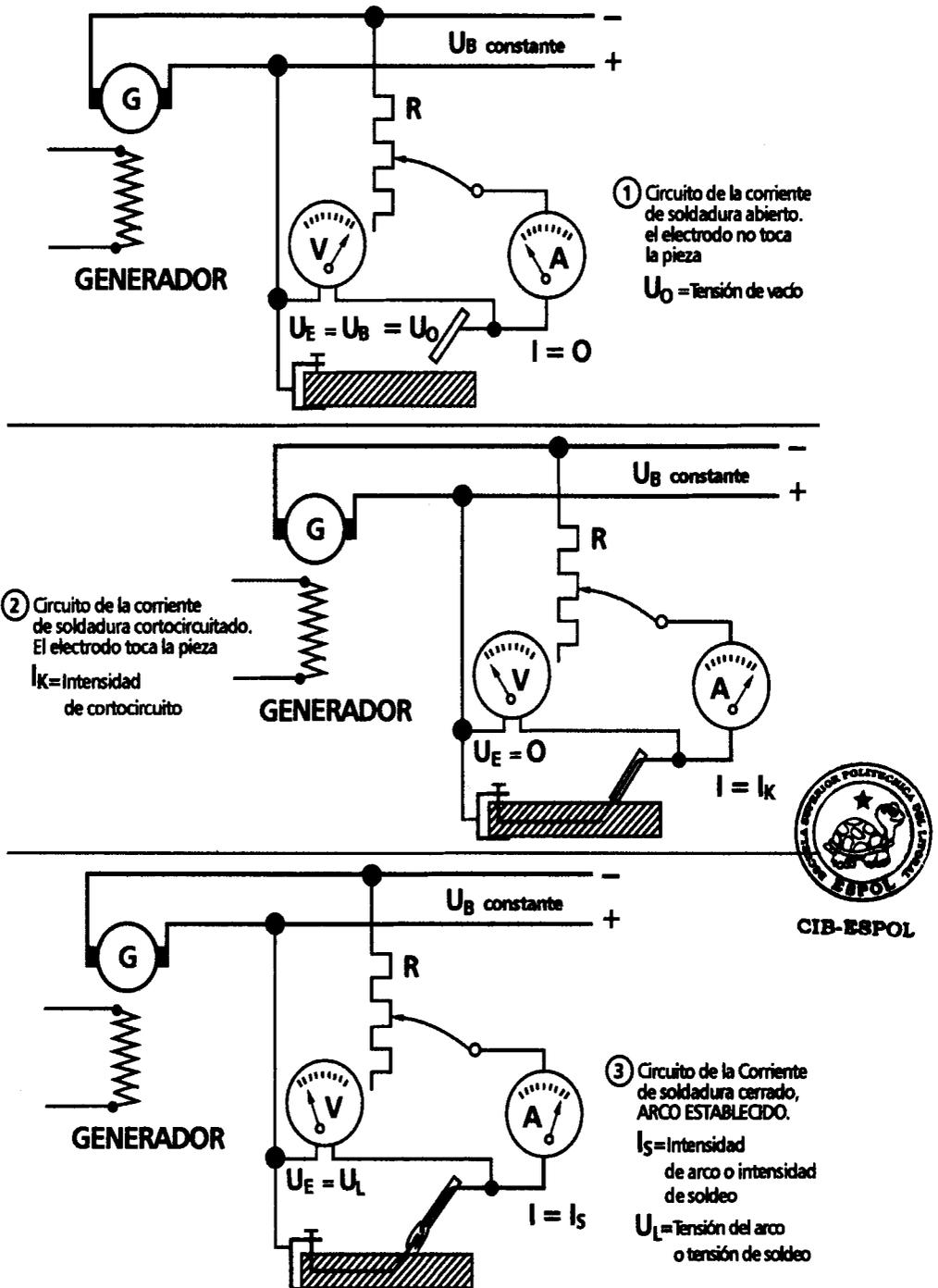


Figura 1.9 Esquema del circuito de corriente de soldadura

Porta Electrodo

Para el uso de un porta electrodo debajo del agua, este debe estar completamente aislado, el mismo que por ser diseñado para trabajar bajo el agua, tienen que poseer ésta característica como algo mandatorio, figura 1.10 y 1.11 (Ref.3).



La durabilidad en altas profundidades y la capacidad de aislamiento, son las 2 características principales que debe tener un porta electrodo al trabajar bajo agua, todo esto acompañado de una facilidad para la reposición del electrodo mediante un leve giro o torcedura en el mismo.

Solo se deben utilizar porta electrodos que han sido diseñados especialmente para trabajar bajo agua, del tal manera que al momento de fluir la corriente todas su partes estén completamente aisladas. Estos tipos de porta electrodos deben ser recomendados siempre que sea posible. Hay que recordar, que al momento de inspeccionar el mismo, se debe estar seguro de que estos no hallan sufrido algún daño en sus partes (Nunca

utilizar portaelectrodos con algún tipo de daños), las piezas dañadas harán peligrar la vida del buzo y deberán ser reemplazadas inmediatamente .



Figura 1.10 Porta-electrodo para soldadura húmeda

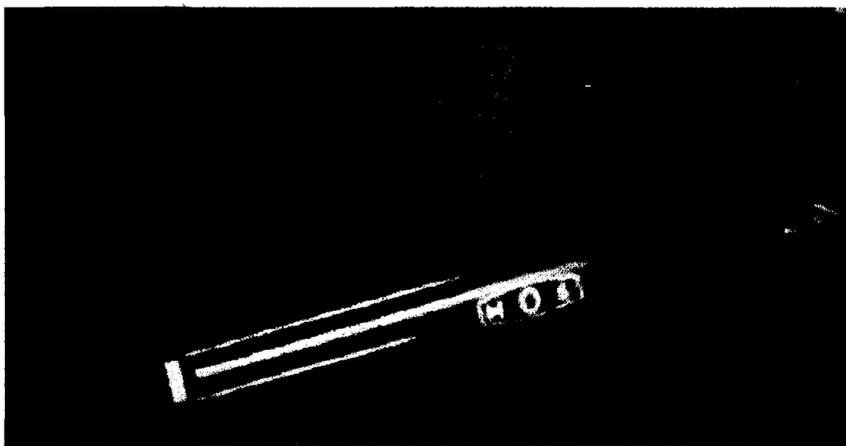


Figura 1.11 Porta-electrodo para soldadura húmeda

Interruptor de Seguridad

En toda operación de corte o soldadura húmeda siempre debe haber un interruptor positivo de desconexión operativa; también conocido como interruptor de cuchillas. Esto protege al buzo puesto que solo permite el paso de corriente en el momento que está cortando o soldando, o cuando tiene el electrodo posicionado y listo, permitiendo el recambio de electrodos usados por nuevos. Es importante especialmente cuando se usa interruptores unipolares, que se controle si el interruptor no está puesto en derivación; se puede tener certeza de esto, verificando que el cable que se encuentra entre la máquina de soldar y el interruptor se halla totalmente aislado en toda su extensión, como se muestra en la figura 1.12 (Ref.1)

Deberá realizarse una inspección periódica para tener seguridad de que el aislamiento no esté deteriorado. Se puede utilizar otro tipo de interruptores de seguridad automáticos, para proporcionar un control de la corriente en el circuito. Cualquiera fuera el tipo de interruptor de desconexión que se use, deberá estar ubicado de tal

manera que la persona a cargo del sistema de comunicación, pueda operar el interruptor y controlar la operación en todo momento cuando el buzo se encuentre debajo de la superficie.

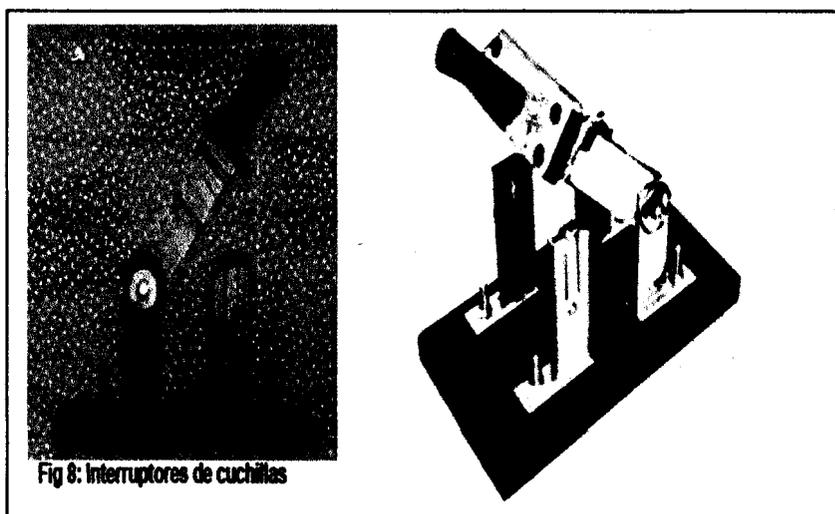


Fig 8: Interruptores de cuchillas

Figura 1.12 Interruptor de Seguridad

Cables Eléctricos

Existen diversas marcas y diámetros. Se usarán cables completamente aislados, aprobados y extra-flexibles. Un cable debe ser capaz de soportar la máxima corriente requerida por el trabajo a realizar. El diámetro adecuado para un cable para una tarea determinada depende de la extensión del circuito, figura 1.13 (Ref. 1)



CIB-ESPOL

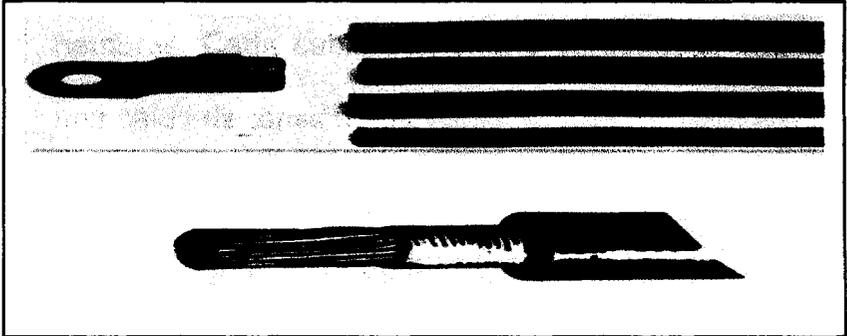


Figura 1.13 Cables eléctricos para soldadura húmeda

Es recomendable el diámetro de 2/0 cuando el trabajo que debe hacerse está a una distancia considerable de la fuente de energía, ya que la caída de tensión es menor por su baja resistencia eléctrica. Ocasionalmente puede utilizarse un cable 3/0 para profundidades extremas. El cable 2/0 debe usarse cuando la extensión total del cable incluyendo el electrodo y conductores a tierra, excede los 100 m.

Si la extensión total supera los 133 m., dos o más cables 1/0 (llamado látigo conductor) pueden ser usados para hacer más manejable para el buzo el porta electrodos.

Los cables deben ser formados en extensiones mínimas de 15m, completamente con conectores y machos hembras. Cada cable adicional y su conector causarán una caída de tensión.

Para compensar esto y mantener el amperaje requerido debe aumentarse la potencia de salida de la fuente de energía para soldar, elevando el voltaje del circuito abierto del generador de corriente continua o aumentando el amperaje si se usa un rectificador de corriente continua o transformador de corriente alterna.

Además de ser un peligro potencial un conector mal aislado bajo el agua este origina un escape de corriente considerable y un rápido deterioro del cable de cobre debido a la electrólisis. Se recomienda que todas las conexiones bajo el agua estén recubiertas por una cinta aisladora. Se aconseja una envoltura final firme con una cinta de goma para aislar e impermeabilizar las conexiones bajo el agua. Los cables y conexiones hechos con ellos deben ser inspeccionados antes de soldar y si existe algún deterioro en los aisladores se repararán o, en su defecto se reemplazarán.

Los cables se deben mantener almacenados en lugares secos y libres de grasa y, si es posible, colgarlos sobre cubierta, enrollados correctamente, protegidos de chorreaduras de aceite, esto alargará en gran parte su vida útil.

Los cables a tierra deben estar conectados próximos al trabajo a realizarse y puestos de tal manera que el cuerpo del buzo nunca esté entre el electrodo y la parte puesta a tierra del circuito a soldar, la conexión a tierra se hace sujetando el cable que viene de la máquina, al buque o la pieza afectada, mediante una abrazadera o pinza de masa como indica la figura 1.14 (Ref.1)

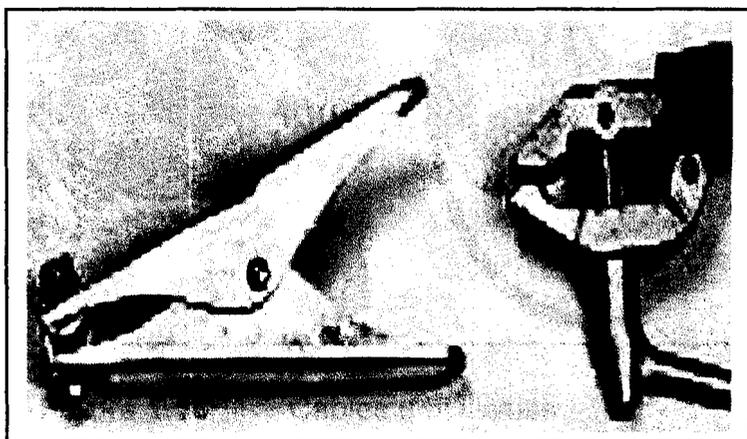


Figura 1.14 Pinza de tierra para soldadura húmeda

Existen umbilicales que combinan soporte de gas y energía eléctrica para todas las operaciones de soldadura y corte. Hay dos opciones para los cables de soldadura, de cobre o aluminio en varios diámetros, acordes a los diferentes requerimientos. Las mangueras de soporte de gas son combinadas con los cables en una construcción trenzada con monofilamentos de polietileno. También pueden incluir cables de comunicaciones, video cámara o de energía para algunas herramientas, figura 1.15 (Ref. 1)

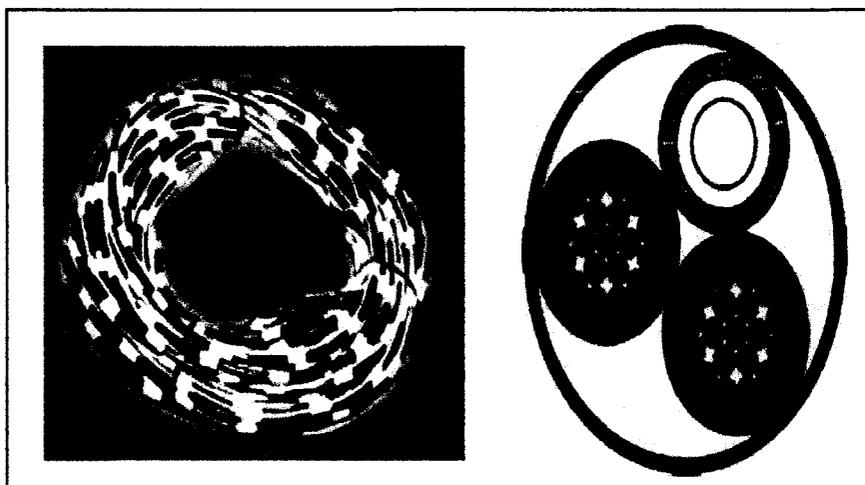


Figura 1.15 **Cables umbilicales**



En la Tabla 1, se detalla los diferentes tamaños de cable recomendados a utilizarse en función de la corriente y la distancia a trabajar.

TABLA 1
SELECCIÓN DEL TIPO DE CABLE

Largo en metros por el circuito entero							
Amp	30m	45m	60m	76m	91m	106m	121m
100	4	4	2	2	1	1/0	1/0
150	4	2	1	1/0	2/0	3/0	3/0
200	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0	4/0



CIB-ESPOL

Protección del buzo

El buzo debe contar con una protección ante la soldadura, así como también debe usar lentes apropiados para el agua, para las condiciones que se presenten en sitio. El uso de guantes de caucho seco o de guantes encauchados es un punto mandatorio.

El traje del buzo debe estar completamente revestido de caucho para bucear, así como también de estar

completamente aislado contra descargas eléctricas. El traje en conjunto debe estar en buenas condiciones y libre de rasgones. Debe contar con una válvula (botón) interna de escape o descarga, la misma que también debe estar aislada, es decir con alguna tapa o cubierta de caucho u otros aislantes convenientes. Si el agua calienta el traje, el buzo deberá llevar entonces una vestimenta encauchada por debajo del traje como se muestra en la, figura 1.16 (Ref. 1)



CIB-ESPOL

De igual forma el ojo humano debe ser protegido contra la agresión de la luz; una luz muy intensa deslumbra pudiendo producir una momentánea ceguera, generando riesgo para la salud. El ojo posee varios mecanismos psicológicos de defensa contra el exceso de radiación solar o artificial, estos mecanismos son bien conocidos y tienen que ver con los reflejos pupilares: la pupila se contrae considerablemente cuando es expuesta a una luz intensa, a esta acción fundamental se agrega la intervención de los párpados que permite reducir la intensidad de flujo luminoso recibido por el ojo. Pero

todos los reflejos resultan insuficientes contra las radiaciones ultravioletas infrarrojas.

Estas radiaciones son tanto más peligrosas para el ojo que las que las que ejercen una acción inmediata provocando reflejos de defensa, en muchos casos cuando pueden medirse los efectos traumáticos ya es demasiado tarde. El infrarrojo emitido en cantidad excesiva, es absorbido por los medios oculares y provocan lagrimeo y dolor de cabeza. Los rayos ultravioleta de corta longitud de onda, provocan una acción eritemosa e inflamación de la conjuntiva, golpe de arco y oftalmia eléctrica. Para evitar esto en todas las operaciones de corte y soldadura deben usarse lentes protectores de color verde oscuro, estos protectores se agrupan en la norma DIN y cuanto mayor sea la intensidad, mayor será el requerimiento de protección contra el arco pueden ser DIN 6 hasta DIN 15. Los vidrios protectores pueden fijarse a los cascos y máscaras de buceo comercial mediante diferentes mecanismos como se muestra en la figura 1.17 diferenciados según la marca del fabricante.



CIB-ESPOL

Figura 1.16 Traje de Buzo

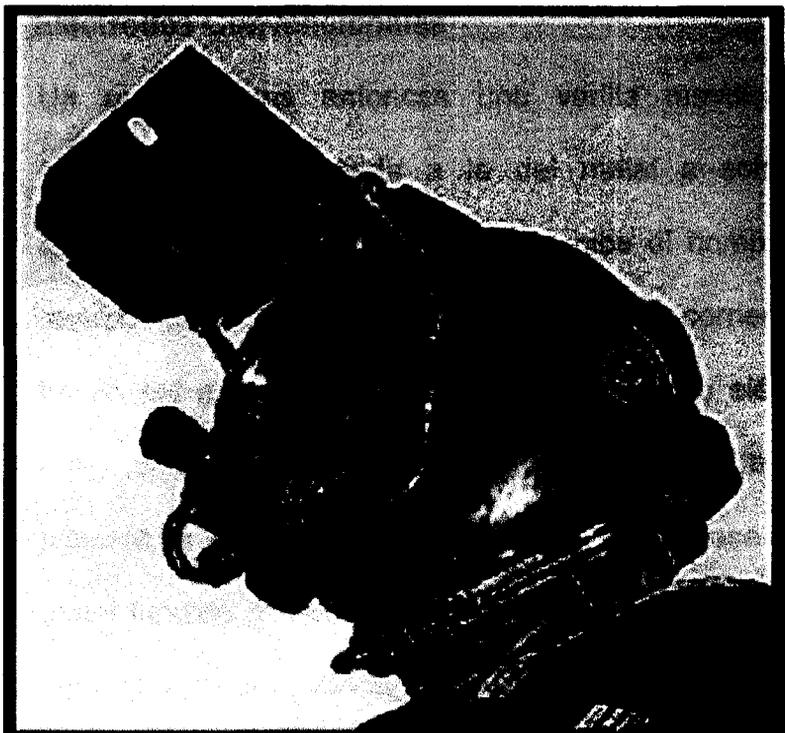


Figura 1.17 Casco y lentes oscuros de protección

Amperímetro

El uso de un amperímetro debe estar en disponibilidad, como una manera de poder setear la corriente de soldadura, la misma que podría ser inexacta. El uso adicional entonces de un amperímetro es recomendado como una fotografía que se toma a la corriente de forma más exacta, de tal forma que ésta pueda ser almacenada.

1.3.2 Electrodo Convencionales

Un electrodo es entonces una varilla metálica de composición aproximada a la del metal a soldar y recubierta con una sustancia que recibe el nombre de revestimiento. Cuando se establece una corriente a través del circuito de soldadura, salta un arco eléctrico entre el extremo del electrodo y la pieza. Este arco provoca la fusión del electrodo y del metal base. Este metal fundido procedente del electrodo, cae en el cráter originado por la fusión del metal base y se forma el baño de fusión. Este al solidificar da lugar al cordón de soldadura que establece la unión entre las dos piezas, figura 1.18 (Ref. 2)

No solo se fabrican electrodos para la soldadura de distintos materiales, sino que además se encuentran electrodos para soldar con corriente continua y para soldar con corriente alterna. Algunos electrodos funcionan igualmente con los dos tipos de corriente. Además también se fabrican electrodos para soldar en determinadas posiciones.

Los electrodos revestidos llevan recubrimientos relativamente gruesos, a base de sustancias tales como celulosa, silicato sódico, silicato potásico, óxido de titanio (rutílico), óxidos de hierro, hierro en polvo, y otros diversos ingredientes.



CIB-ESPOL

Cada una de las sustancias antes mencionadas está incluida en el revestimiento para que desarrolle una determinada función durante el proceso de soldadura, tales como:

- Actuar como agente limpiador y desoxidante del baño de fusión.
- Liberar los gases inertes que protegen el baño de fusión contra la oxidación y la nitruración atmosférica. Tanto el oxígeno como el nitrógeno, si entran en contacto con el metal fundido debilitan considerablemente la soldadura. Por tanto es importante evitar este tipo de contaminación.
- Formar sobre el metal depositado una capa de escoria que proteja hasta que haya enfriado lo

suficiente para que no pueda ser contaminado por la atmósfera que lo rodea. Además, la escoria también disminuye la velocidad de enfriamiento del metal depositado, lo que conduce a una soldadura más dúctil.

- Facilitar el inicio o arranque y el mantenimiento del arco y reducir las proyecciones.
- Permitir una mejor penetración y facilitar la consecución de una calidad de soldadura que supere el control radiográfico.

Algunos revestimientos contienen polvo de hierro que, al fundir el electrodo, pasa a formar parte del metal depositado. Este polvo de hierro incrementa la velocidad de aportación y contribuye a conseguir cordones de mejor aspecto.

Existe un grupo de electrodos, conocidos como electrodos de bajo hidrógeno, cuyos revestimientos contienen elevadas cantidades de caliza y otras sustancias pobres en hidrógeno, tales como fluoruro de

calcio, carbonato de calcio, silicatos de aluminio, manganeso y ferro aleaciones, estos electrodos se utilizan en la soldadura de aceros con alto contenido en azufre o en carbono, pues estos elementos presentan una gran afinidad por el hidrógeno, que de incorporarse a la soldadura produce porosidades y aumenta el riesgo de rotura frágil.

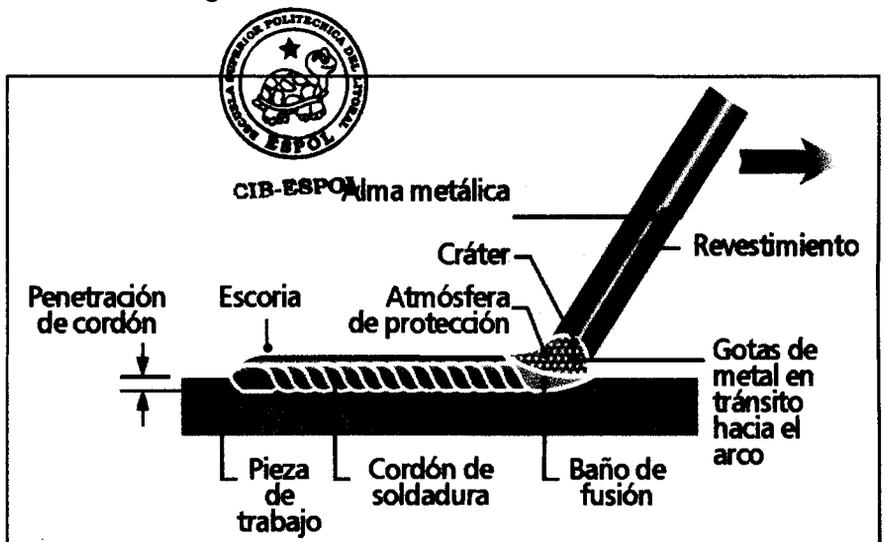


Figura 1.18 Electrodo convencional

1.3.3 Electrodo para Soldadura Húmeda

Una vez que conocemos de mejor manera el verdadero papel del revestimiento en el electrodo, al igual que los diferentes tipos de revestimiento existentes, es importante mencionar que en el caso de la soldadura húmeda, los fabricantes de electrodos se han enfocado en producir

electrodos que permitan darle propiedades a la junta soldada que cumplan con mejorar su resistencia al impacto y su ductilidad, las mismas que normalmente son severamente afectadas por las elevadas tasas de enfriamientos presentes en la junta a soldar cuando este se la realiza en un medio como el agua, dando como resultado un material de elevada dureza muy propenso a la fisura.

Es por eso que dentro de toda esta clasificación de los revestimientos, los fabricantes de soldadura húmeda han preferidos diferenciarlos de la siguiente manera:

- Los ferríticos
- Los de base de Níquel

La razón de esto se puede resumir en lo siguiente, la estabilidad de arco mejora con los revestimientos tipo rutilicos /ácidos/oxidantes en los electrodos, estos también dan a la soldadura un perfil y penetración satisfactoria, los electrodos con revestimientos básicos dan una características de arco pobre y una geometría

de cordón de soldadura groseramente irregular. Otros tipos de revestimiento tienden a encontrarse entre estos 2 extremos. Los electrodos tipo ferríticos se caracterizan porque en ellos son encontrados bajos niveles de hidrógeno ya que este tipo de consumibles posee un revestimiento oxidante, sin embargo, elevados valores de hidrógeno se pueden apreciar en electrodos con base de níquel.



CIB-ESPOL

El alto porcentaje de níquel en la soldadura húmeda da como resultado mayor porosidad que aquella que podría estar presente en la soldadura seca aunque esta se encuentra uniformemente dispersa, sin embargo los electrodos con base de níquel dan a la soldadura una buena resistencia al impacto, lo que hace a estos electrodos muy recomendables para soldadura bajo agua.

Finalmente ambos tipos: los ferríticos y los de base de níquel, son recomendados para la soldadura húmeda ya que son conocidos por ser capaces de evitar la fisura por



CIB-ESPOL

asistida por hidrógeno en aceros con carbón equivalente bajos.

Los electrodos revestidos para soldadura húmeda a diferencia de los electrodos de superficie no están marcados con ningún número de identificación por parte del fabricante, por lo tanto se debe tener mucho cuidado de no elegir el electrodo incorrecto. Esto conlleva a que es responsabilidad de las personas que están a cargo del trabajo conocer si el electrodo a utilizar es ferrítico o de base de níquel

Es siempre importante seguir las recomendaciones del fabricante en lo que respecta a los cuidados que hay que tener en el manejo apropiado de los electrodos, recuerde usted que el buzo/ soldador es también responsable del cuidado de los mismos.

Para evitar daños, los electrodos deben ser almacenados en paquetes sellados y guardados en un lugar seco y con buena ventilación. Cuando los

electrodos no pueden ser almacenados en condiciones ideales, materiales como el Gel de sílicon deben ser ubicados en el contenedor.

Si algún electrodo pareciera estar dañado entonces este no debe ser utilizado, así como también hay que prestar especial atención al recubrimiento impermeabilizador del electrodo para ver si muestra algún signo de daño.

En lo que respecta al revestimiento impermeable este a sido restringido para el uso en la soldadura submarina por el mismo factor que la hace una técnica única, el agua produce que los cordones de soldadura de las reparaciones resulten frágiles y quebradizos, figura 1.19 (Ref. 3). El hidrógeno contenido por el agua reacciona químicamente con el material aportado lo que da como resultado soldaduras quebradizas, esto limita la longevidad de la reparación, además sumado a la elevada conductividad térmica del agua que provocaba un enfriamiento rápido a la pieza, causando micro

estructuras debilitadas que tornaban la soldadura muy rígida.

Los fundentes de los revestimientos se deterioran al sumergirse en el agua y esta es absorbida por el fundente y penetra en los intersticios, luego se convertirá en vapor y desprenderá por presión el revestimiento cuando se forme el arco. Por lo tanto, se hace imprescindible colocar un revestimiento impermeable de un grosor adecuado, que mantenga la integridad de los electrodos sumergidos.

Los electrodos desarrollados actualmente, son provistos de un revestimiento impermeable que reducen notablemente los efectos del agua sobre el material soldado, aumentando y mejorando la reacción química con el material base, facilitando la limpieza de la escoria resultante del proceso; el revestimiento también provee un mayor aislante térmico.



Por otra parte y como lo hemos dicho anteriormente, el recubrimiento interior juega un papel protagonista en el electrodo de ahí que las mejoras en este sentido dentro del campo de la soldadura húmeda están enfocados en los siguientes puntos.

Los mejores fundentes de revestimientos tienden a ser aquellos de tipo rutilico, ácido y oxidante. Los recubrimientos rutilicos y de polvo de hierro producen electrodos que dan como resultado un arco suave y de un buen comportamiento en la soldadura, sin embargo estos dan también como resultado un arco alargado el cual provoca altos voltajes - bajos amperajes y estos a su vez producen mayores extinciones.

A continuación se detalla algunas de las propiedades que otorga este tipo de revestimiento al electrodo usado para la soldadura húmeda

- Provocar un fácil arranque y mantenimiento del arco

- La mezcla posee una conductividad térmica baja, lo que sirve de protección al metal fundido y a la varilla del electrodo.
- La protección gaseosa se mantiene alrededor del arco aún en condiciones adversas.
- El fundente produce una fuerte escoria, la misma que es deseada en estos casos.



CIB-ESPOL

La escoria atrapada durante la soldadura y la escoria removida después de la misma introduce también un criterio de selección adecuado para un buen fundente:

- Un peso específico pequeño en comparación con el metal de soldadura.
- Una temperatura de fusión bajo con respecto al metal de soldadura.
- Una tasa de expansión con coeficiente diferente al metal base y al metal de soldadura

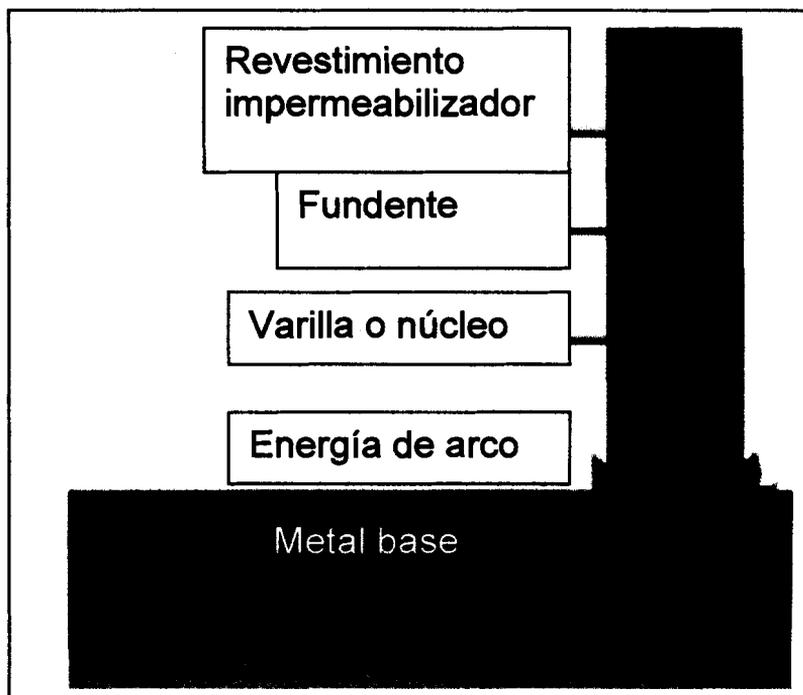


Figura 1.19 Electrodo para soldadura húmeda

A continuación en la tabla 2 se realiza una comparación entre los electrodos convencionales y los especiales diseñados para la soldadura húmeda, en función de las intensidades de corriente para los diferentes diámetros.



CIB-ESPOL

TABLA 2

AMPERAJE UTILIZADO PARA 6013 Y ELECTRODO ESPECIAL PARA SOLDADURA HÚMEDA DE 1/8"

6013 1/8" (convencional)

DIAMETRO (MM)	AMPERIOS
3,25	120-150
4	180-230

Electrodo para soldadura para húmeda 1/8"

DIÁMETRO (MM)	AMPERAJE
3,25	140-170
4,00	170-210



CIB-ESPOL

1.4 Aspectos Metalúrgicos

1.4.1 Microestructura de la Junta Soldada

Ciertamente la metalurgia y las limitaciones físicas son inherentes a la soldadura húmeda. Los conceptos básicos de metalurgia en la soldadura húmeda incluyen:

- Las diferentes tasas de enfriamiento entre la soldadura en superficie y la soldadura húmeda
- La Zona afectada por el calor (Z.AC), tamaño de grano y la transformación del cristal.
- Los defectos potenciales bajo el agua, inducidos por la extinción o inducidos por el hidrógeno.

Cuando el arco de soldadura es encendido en un medio como el agua, el hidrógeno en la atmósfera del arco es disuelto en el metal líquido del baño de soldadura, inmediatamente después de esto la soldadura es depositada sobre la junta a soldar, en este momento producto del medio circundante que lo rodea se produce una rápida extinción en el material depositado causando una solidificación acelerada en metal soldado



La rápida solidificación y la elevada cantidad de hidrógeno disuelto en el baño de fusión hace que la junta soldada sea propensa a albergar hidrógeno, el mismo que permanece atrapado en la soldadura, es entonces

cuando se inicia el problema que puede causar fisura por asistida por hidrógeno, si ha esto se le suma la elevada tasa de enfriamiento existente en la junta soldada producto del medio circundante tal como muestra la figura 1.20 y que afecta especialmente a la Zona afectada por el calor la misma que puede provocar cambios severos en la microestructura del material causando un incremento en la dureza. Es decir la rápida extinción provoca entonces también como resultado una elevada dureza en esta zona (Ref.3)

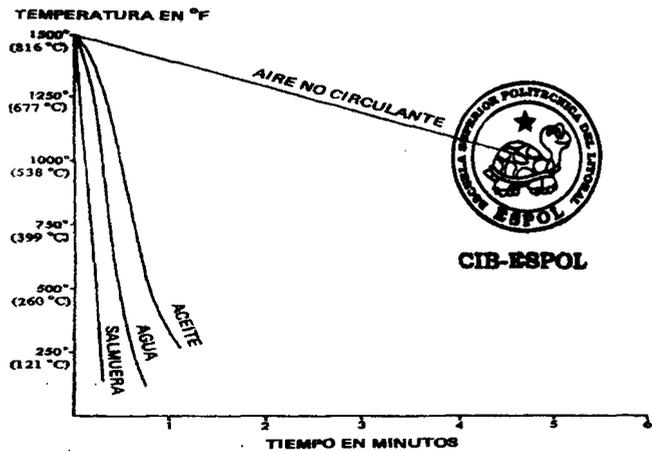


Figura 1.20 Velocidades de enfriamiento del acero en diferentes medios.

La porosidad puede ser formada por este hidrógeno y otros gases en su intento por escapar de la escoria, la misma que es también causada por la rápida extinción de la soldadura. Frente a este panorama existen tres regiones dominantes que merecen ser analizadas, que son las siguientes:



CIB-ESPOL

Metal Soldado

Es la zona inmediatamente adyacente a la línea de fusión en el cual el metal tiende a ser calentado casi hasta el mismo punto de fusión. Debido al fuerte flujo y a la dirección de calentamiento durante la solidificación, las dendritas crecen más en una dirección, por lo tanto el grano es largo y delgado como resultado de este crecimiento patrón. Esta área está conformada por la composición de la base fundida y el metal del electrodo depositado (Ref. 3).

Ocasionalmente la pérdida de calor causa a una porción del metal soldado a solidificar y formar una pequeña área de granos equidistantes en el centro de la zona soldada.

Este grano crece igual en todas direcciones figuras 1.21 y 1.22.

Por otra parte la alta concentración de impurezas en los bordes del grano que poseen punto de fusión menor al de la aleación como lo son el azufre S y el fósforo P son extremadamente perjudiciales para la junta soldada porque la fisura en caliente puede ocurrir(Ref.9).

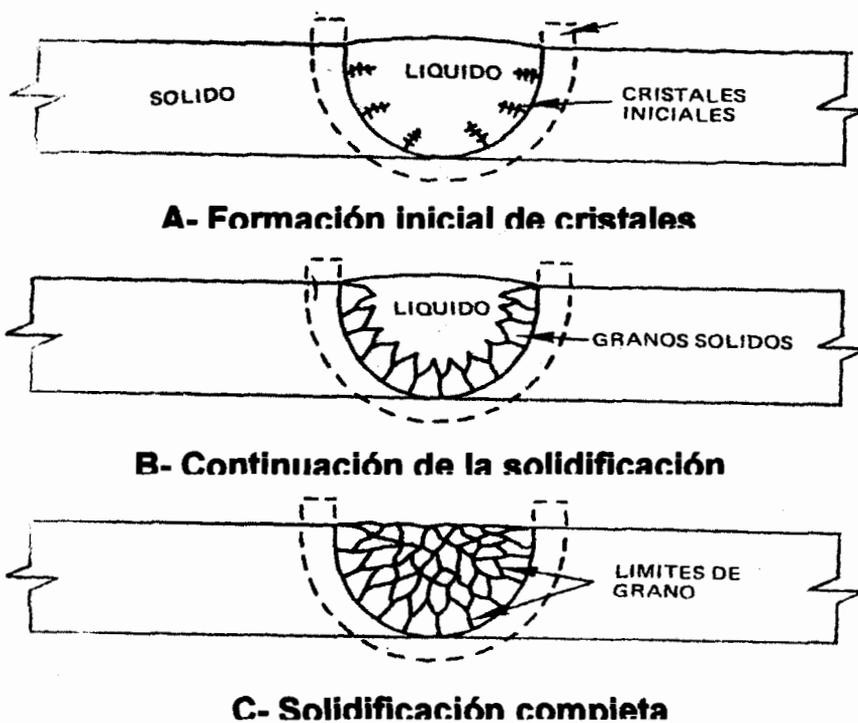


Figura 1.21 Proceso de solidificación de la soldadura.

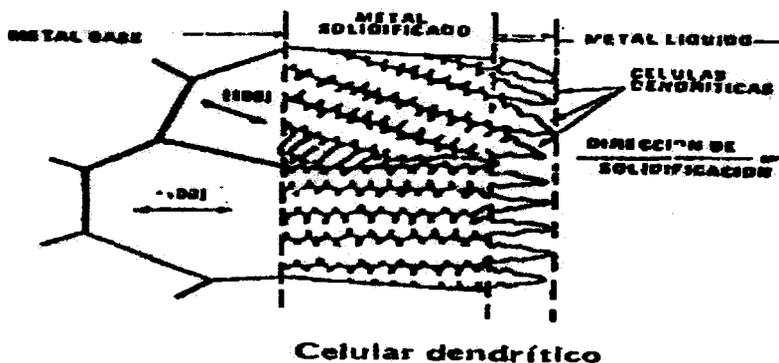


Figura 1.22 Célula dendrítica del metal soldado



Zona Afectada por el Calor (ZAC)

CIB-ESPOL

Es la zona más sensitiva a una tasa de enfriamiento rápido. Las máximas temperaturas en esta zona están bajo la temperatura de fusión, sin embargo ésta área es severamente sobre calentada permitiendo un máximo tamaño de grano de tal manera que podemos apreciar que el tamaño de grano varía a lo largo de la zona afectada por el calor en un corte transversal, la máxima temperatura en la ZAC decrece con el incremento de la distancia de la línea de fusión.

Durante la recristalización y el crecimiento de grano la transformación en la micro estructura de austenita a alguna otra estructura cristalina ocurre en esta región donde la máxima temperatura excede la temperatura crítica A3 (Ref. 3).

Una vez más el flujo de calor patrón causado por el burbujeo del agua sobre la superficie del metal influye en el enfriamiento. En la región con la máxima temperatura, esto es por encima de la temperatura crítica A3, la temperatura no es una causa suficiente para una total austenitización, pero si causa un refinamiento del grano; esta sub-región en la ZAC es llamada región templada, figura 1.23. (Ref.10)

Reduciendo la pérdida de calor desde la junta soldada se incrementa el calor a las áreas afectadas, sin embargo no es el tamaño de la ZAC lo que provoca una mala soldadura, lo que si hay que tomar muy en cuenta es la estructura del grano que la conforma, la misma que si es responsable del deterioro de las propiedades de la

soldadura. Las elevadas temperaturas - rápidas tasas de enfriamiento y las bajas temperaturas - bajas tasas de enfriamiento, podrían provocar la concentración de esfuerzos o fisuración en caliente que seguramente debilitarán de manera considerable las propiedades mecánicas en la ZAC del material.

Por otra parte el fuerte flujo del calor provocado por el burbujeo del medio podría provocar cambios serios en la estructura del grano en la ZAC, la misma que es la mayor razón de fallas en soldaduras bajo el agua.



CIB-ESPOL

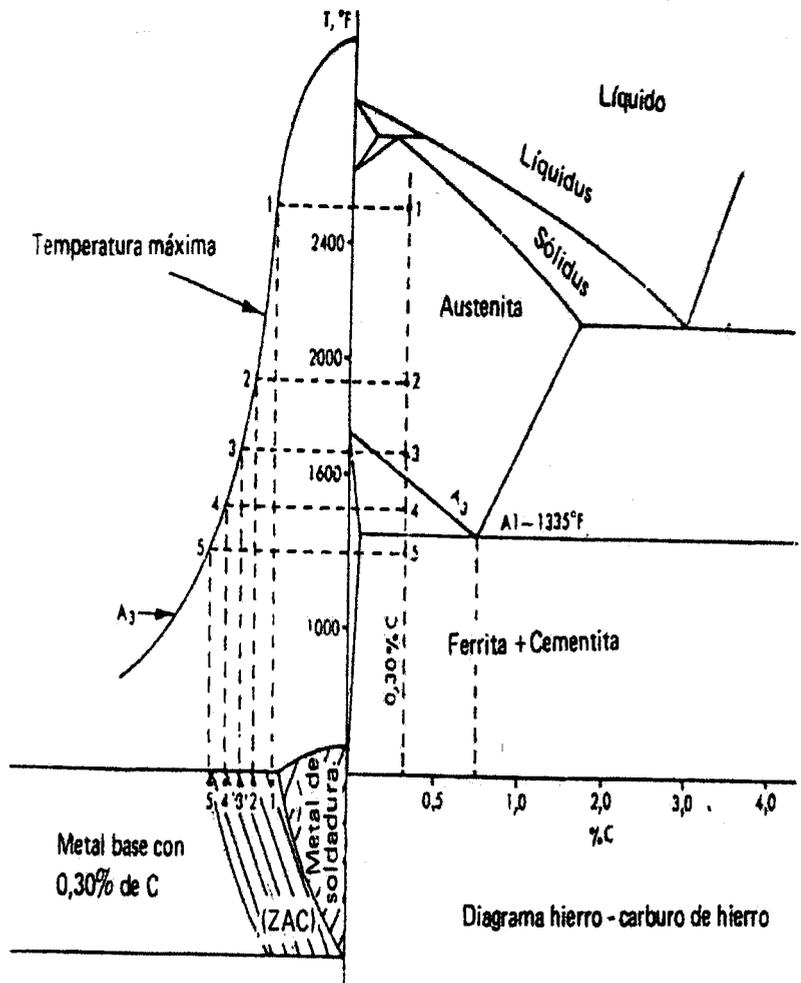


Figura 1.23 Diagrama Hierro - Carbono y temperatura en diferentes puntos de la Junta soldada

Metal Base

Es el área más allá de la ZAC, el cual permanece inalterable por la soldadura, porque las temperaturas alcanzadas no son suficientes para causar algún cambio.

Entre la ZAC y esta zona inalterada existe una región

transciente (Ref. 3) La temperatura en esta región no alcanzan la menor temperatura crítica y por lo tanto no ocurren cambios de fase, figura 1.24.

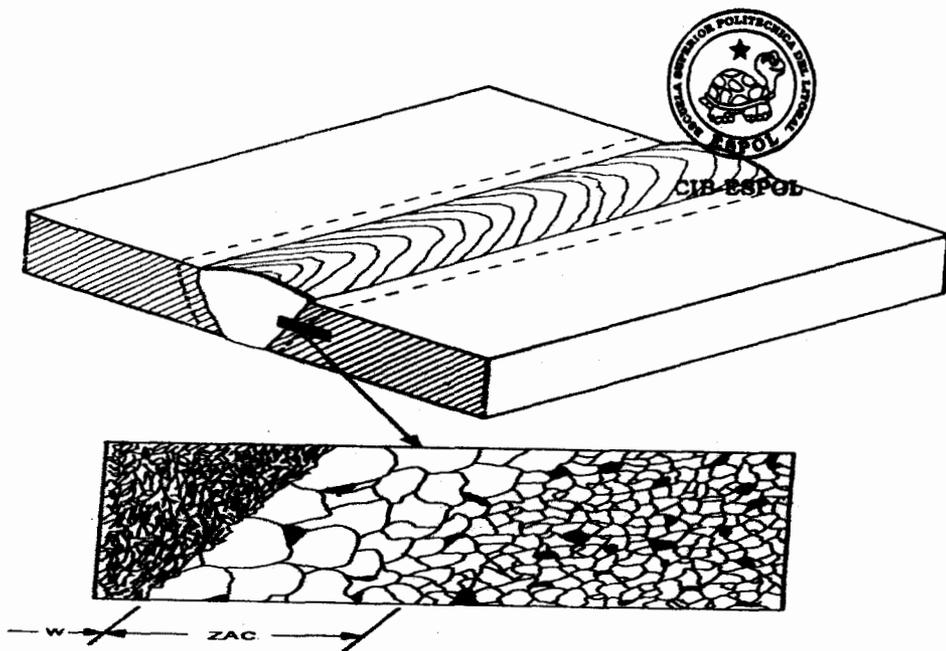


Figura 1.24 Ilustración de la zona soldada, ZAC y material base.

Exámenes de dureza en la soldadura siempre brindarán información de mucho valor para comprender lo que ha ocurrido en la junta soldada. Dichos valores de dureza obtenidos de estos exámenes a menudo deberán ser correlacionados como evidencia de una transformación en la estructura cristalina del material, estos dos a su vez

tienen una estrecha relación con la velocidades de enfriamiento presente en las juntas soldadas, esta es la razón para que en el caso de la soldadura húmeda o bajo agua este aspecto sea considerado importante.

1.4.2 Defectos de Soldadura

Esfuerzos Dimensionales

Los esfuerzos dimensionales de elevada magnitud, pueden resultar de la expansión térmica y contracción presentes en la soldadura después de que la estructura tiende a ser enfriada. Estos esfuerzos causan distorsión, ampliamente mencionados en libros de consulta, los cuales pueden aumentar en el material soldado debido a la no uniformidad de la distribución de la temperatura, provocado por el gradiente de distribución de temperatura en la soldadura debajo del agua, la misma que crea acumulación de esfuerzos térmicos y deformaciones.

La presencia de turbulencia en la región del arco de soldadura bajo el agua es perjudicial, por lo que es necesario estabilizarla al igual que el escudo protector del

arco, de tal manera que esta pueda proteger a la región del arco durante la soldadura (Ref. 3)

El perfil o contorno de una soldadura terminada puede tener considerables efectos en el desempeño bajo carga de la junta, de ahí la importancia de que este perfil no se vea severamente afectado por la viscosidad o la fluidez de la escoria formada durante la soldadura.



De igual manera la movilidad del metal fundido se ve afectado por las restricciones del medio y la temperatura provocando cordones de soldadura convexos; es en este momento donde el refuerzo excesivo conocido como sobremonta, el cual es a menudo indeseable, tiende a endurecer la sección y estabilizar la concentración de esfuerzos provocando distorsión como indica la figura 1.25.

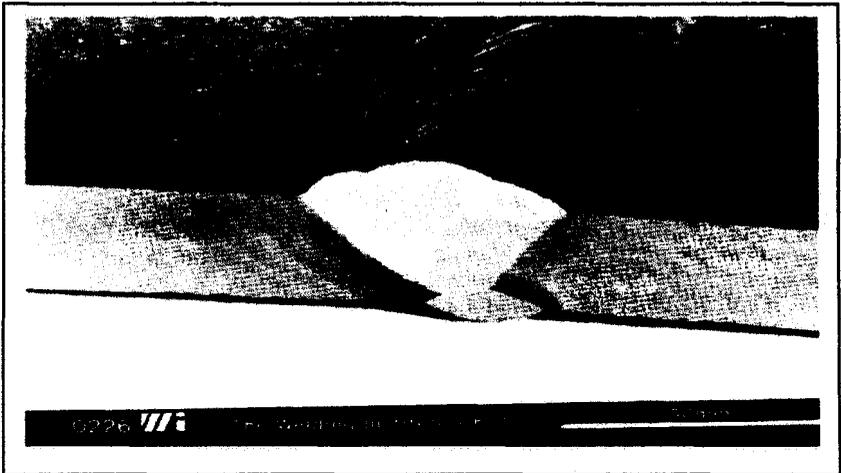


Figura 1.25 Sobre-espesor en junta soldada

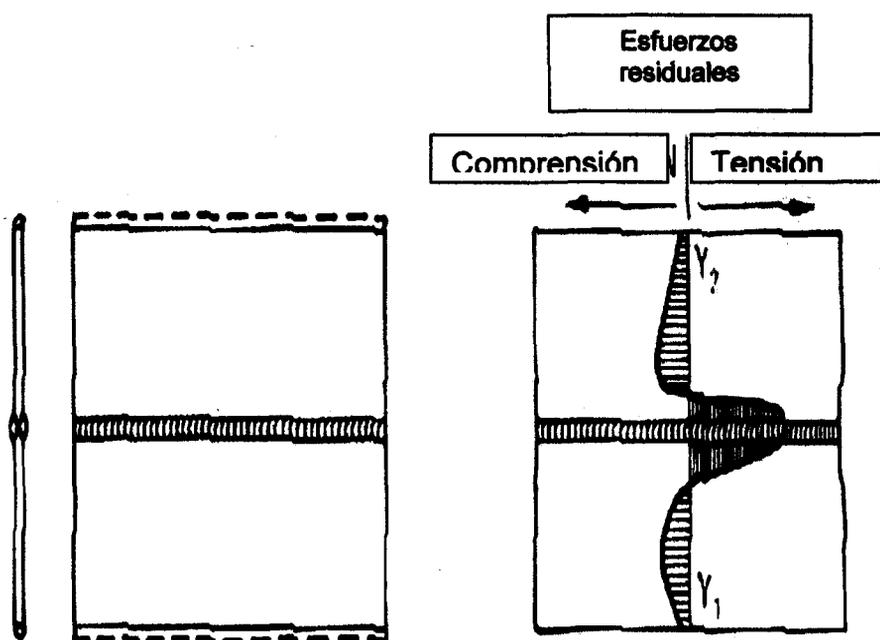
Se entiende por distorsión en la soldadura a las deformaciones que se producen en la pieza durante la soldadura, es decir la distorsión tiene que ver con modificaciones en la geometría de las partes que son unidas por soldadura que sufren cambios dimensionales que son a su vez necesarios controlar, para que no excedan los límites aceptables.

Los fenómenos de distorsión son las consecuencias de tensiones mecánicas que se generan en la pieza como resultado de deformaciones plásticas localizadas producidas por ciclos térmicos impuestos por la soldadura.

De manera que para entender al menos cualitativamente los fenómenos de distorsión es necesario comprender la generación y distribución de tensiones residuales con los cuales aquellos están directamente vinculados. Las tensiones residuales en un proceso de soldadura por fusión se originan en el hecho de que la soldadura consiste en el relleno de un cierto volumen representado por la preparación de la junta, con metal en estado líquido proveniente de la fusión del electrodo (Ref.4).

Una vez que el metal líquido solidifica se obtienen la unión metálica entre el cordón de soldadura y el metal base, se produce entonces durante el enfriamiento la contracción del cordón de soldadura siendo esta contracción resistida por el material base adyacente que al encontrarse a una temperatura inferior no acompaña la contracción del cordón que se enfría desde a temperatura de fusión de la aleación que se trate, figura 1.26.



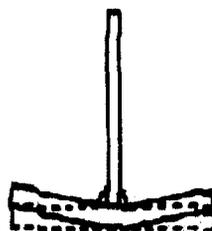


Contracción transversal en junta a tope

Contracción longitudinal en junta a tope.
(Distribución longitudinal de esfuerzos residuales)



Cambio en ángulo de junta a tope



Cambio en ángulo de soldadura de filete

Figura 1.26 Comportamiento de esfuerzos residuales



CIB-ESPOL

Discontinuidad Estructural:

Las rápidas velocidades de enfriamiento provocadas por el agua pueden colaborar a evitar o dificultar el escape de los gases formados por la reacción química durante la soldadura desde el charco fundido. Una bolsa de gas o vacío son síntomas de aquello, los mismos que son frecuentemente encontrados en soldadura bajo el agua. La más frecuente razón de porosidad es la presencia de óxido, suciedad, aceite, pintura o residuos marinos presentes en la junta (Ref. 3). Una limpieza completa debe ser hecha antes de soldar bajo el agua, figura 1.27 .

Es importante también tomar en consideración lo que ocurre con el electrodo, el fundente del electrodo puede coger humedad mientras se está soldando bajo el agua; esto incluso aún en los electrodos con recubrimientos especiales los mismos que son recomendados para este tipo de trabajos. También puede ser necesario una cantidad suficiente de fundente que permita la protección del metal fundido con respecto al agua.

Porque una rápida solidificación o también una baja temperatura generada durante la soldadura, puede no proporcionar el tiempo necesario para permitir que la escoria y las impurezas puedan subir a la superficie del metal fundido. Cuando la escoria o las impurezas empiezan a ser atrapados en los bordes de la fusión, la fisura por recalentamiento puede iniciar un problema. Obviamente, el descargar la escoria desde el metal fundido podría ser acelerado por algunos factores que tienden a hacer al metal menos viscoso o retardar la solidificación por medios de precalentamiento, el alto ingreso de calor, la disminución de la velocidad de soldadura o una protección de fundente conveniente (Ref.3).

Si la distancia entre el metal base y el electrodo es considerable tomando como referencia la raíz, la conducción de calor puede ser insuficiente para lograr una buena fusión en la raíz o una penetración incompleta, figura 1.28 (Ref. 3). La desgarrada raíz permite entonces se concentren esfuerzos y consecuentemente distorsión de las partes durante la soldadura, lo que podría causar

una fisura a iniciarse en el área desgarbada. La socavadura ocurre cuando el proceso de solidificación toma lugar rápidamente, lo que hace retroceder al charco de soldadura del pie del cordón del metal fundido en esta región, figura 1.29 (Ref.3)



Figura 1.27 Porosidad dispersa

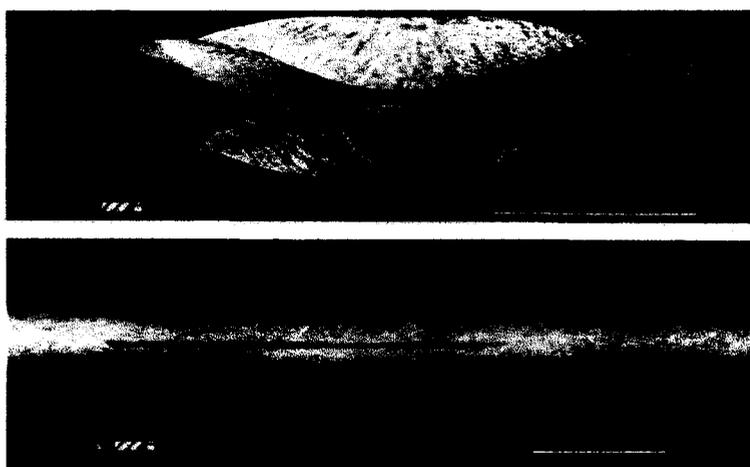


Figura 1.28 Falta de penetración

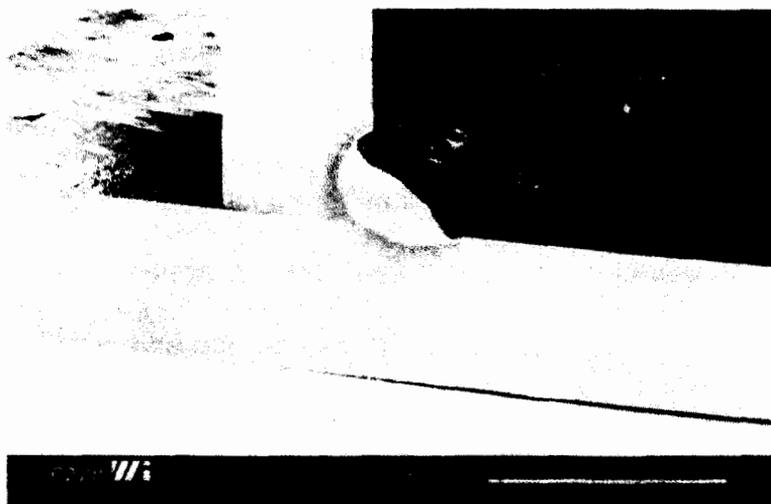


Figura 1.29 Socavado lateral en filete



CIB-ESPOL

Fisuración por hidrógeno

Debido a que la soldadura bajo el agua induce un arco con una atmósfera rica en contenido de vapor de agua y en disociados de oxígeno e hidrógeno, esta es la razón por lo cual el factor hidrógeno puede ser especialmente crítico. El hidrógeno podría no inducir la fisuración al menos que la región esté endurecida y contenga esfuerzos residuales. El hidrógeno es recogido durante el calentamiento y es disuelto en la austenita. Cuando la temperatura en el enfriamiento disminuye, el hidrógeno intenta difundirse fuera del metal soldado a la ZAC. El hidrógeno que sale

de la solución puede formar alargamiento de poro, el hidrógeno que está super saturado en el metal puede resultar en una fisuración mediante el siguiente mecanismo:

1. El Hidrógeno se difunde en el área donde existe concentración de esfuerzos, semejantes como áreas de estructuras martensíticas.
2. Estas áreas sometidas a esfuerzo causan una iniciación de la fisura, después de la introducción del hidrógeno, entonces la fisura es permitida para que se propague.
3. La fisura crece en este paso.



CIB-ESPOL

Esta se manifiesta por la aparición de fisuras inmediatamente o transcurridos minutos, y en algunos casos hasta horas después de completada la soldadura, por lo que también se la conoce como fisuración diferida. Estas fisuras pueden presentarse en el cordón de soldadura o en la zona afectada por el calor del material base y requiere para su formación la concurrencia de los siguientes factores:

- **Hidrógeno difusible en el metal de soldadura o en la zona térmicamente afectada en el material base.**
- **Una micro estructura susceptible (típicamente martensítica)**
- **Tensiones Mecánicas (Tensiones Residuales o Térmicas)**

El hidrógeno difusible consiste simplemente en hidrógeno atómico en solución intersticial en la red cristalina de un acero. El origen de este hidrógeno es típicamente el consumible de soldadura en los procesos realizados en aire, pero en el caso de la soldadura húmeda juega un papel protagónico en este aspecto el medio circundante es decir el agua (Ref. 3).

La curva de solubilidad de hidrógeno difusible en el acero nos muestra en la Figura 1.30 que a las temperaturas imperantes en las partes más calientes de la pileta de fusión (1500°C – 2000°C) la solubilidad del hidrógeno en el hierro alcanza un valor máximo que es mucho mayor que a la temperatura ambiente. De modo que en la medida que

exista hidrógeno disponible, la piletta de fusión la retendrá en solución. Cuando la piletta se solidifica y enfría rápidamente como es el caso de la soldadura húmeda este hidrógeno queda atrapado en el cordón en forma sobresaturada y su gran movilidad hace que parte del mismo alcance eventualmente la zona afectada del material base.

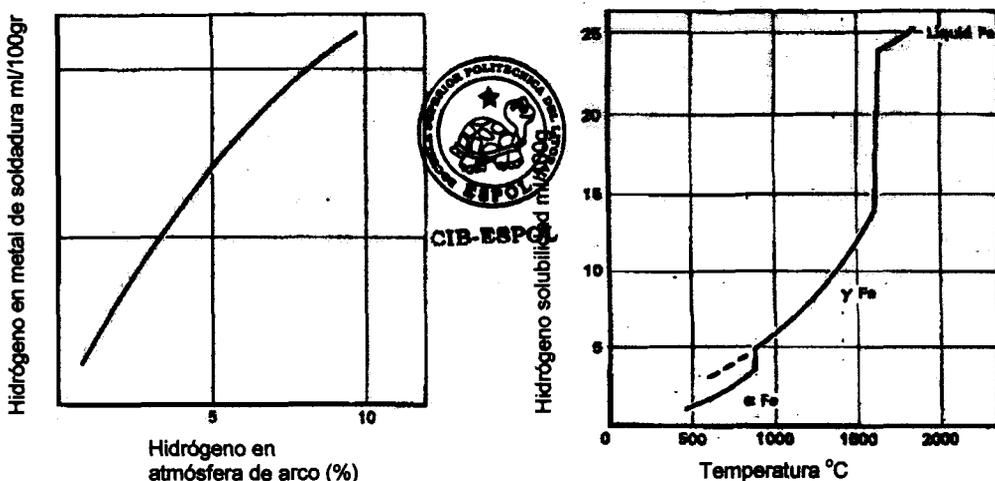


Figura 1.30 Curva de solubilidad del hidrógeno

Los átomos de hidrógeno se localizarán en general en defectos cristalinos, micro fisuras o la interfase entre inclusiones no metálicas y la matriz metálica. La acumulación de átomos en tales sitios promueve la formación de hidrógeno molecular lo que produce un

aumento muy grande de presión típicamente con valores muy superiores a la tensión de fluencia del material, si el material en que esto tiene lugar es dúctil, la presión se relajará por deformación plástica del material, pero si es frágil lo hará a través de la formación de fisuras, este proceso se produce típicamente entre $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ debido a que por debajo de este rango de temperaturas los mecanismos de difusión se hacen extremadamente lentos y por encima del mismo no se produce la recombinación de hidrógeno atómico a molecular requerido por el mecanismo de fisuración; en la figura 1.31 (Ref.3) se muestra el efecto de fragilización que produce la presencia de hidrógeno disuelto en el acero ferrítico en función de la temperatura. Puede verse que la máxima fragilización se produce a temperaturas próximas al ambiente.



Figura 1.31 Fisuración asistida por Hidrógeno

1.5. Iniciación y Aspectos Relacionados con el Código AWS

D 3.6M “Especificación de Soldadura Bajo Agua”

La idea de esta parte del trabajo es introducir un poco más al lector al código AWS D3.6M “Especificación de Soldadura Bajo Agua”, el mismo que rige para aquellos procesos de soldadura realizados debajo del agua. Es importante aclarar que aunque el desarrollo de este estudio está enfocado a la soldadura bajo agua “Húmeda”, este código también cubre a aquella soldadura que aunque es ejecutada en un medio como el agua es llamada soldadura “Seca”, sin embargo esta última no es considerada en el presente trabajo.

También se brindará información que nos permita conocer lo que es un procedimiento de soldadura (WPS), así como también la importancia del mismo en los diferentes trabajos relacionados en el área de la soldadura.



CIB-ESPOL

Inicios del código AWS D3.6 M

El desarrollo más significativo en los últimos 15 años en el campo de la soldadura húmeda, ha sido la publicación de ANSI (American Standards Institute) / AWS D 3,6 -83 "ESPECIFICACIÓN DE SOLDADURA HUMEDA" que abarca opiniones concernientes a la calidad de soldadura húmeda, con criterios objetivos probados, ya que en esta actividad se manejan variables esenciales que no están presente en la soldadura convencional o de superficie.

En 1974 La Sociedad Americana de Soldadores (AWS) inició un nuevo subcomité para la investigación de las soldaduras submarinas, secas y húmedas; formulando especificaciones comprensivas para esta actividad. Este comité llamado D3b, integrado por ingenieros y personal representativos de agencias gubernamentales de Los Estados Unidos, compañías

petroleras, contratistas de buceo, compañías constructoras de insumos y organismos de educación; lanzó las primeras especificaciones en el año de 1983, luego en 1999 fueron desarrollados en concordancia con los requerimientos de la American Standards Institute (ANSI), la máxima organización en materia de regulaciones, reglamentaciones, códigos y especificaciones de este País, las mismas que fueron aplicadas con mucho éxito en Norteamérica, Europa, Asia y Medio Este, lo que implicó una pronta aprobación a nivel mundial.

Su objetivo es proveer estándares para la calificación de soldadores submarinos, procedimiento de soldadura y corte submarino, para establecer variables esenciales y en general proveer un documento que hiciera posible al usuario seleccionar el procedimiento de soldadura o corte apropiado y obtener soldaduras calificadas de desempeño deseado.

Este código AWS D 3.6 M tiene como alcance, toda soldadura que se realiza bajo agua, sea esta:

- Soldadura Seca

- Soldadura Húmeda

Cumple entonces con brindar especificaciones de fabricación y calidad para aquellos trabajos por realizar en soldadura bajo agua, sin importar el tipo de procedimiento que este sea; así también se encuentra debidamente estructurado para su mejor manejo y comprensión en las siguientes partes.

- Provisión General
- Clasificación y Diseño de Juntas Soldadas
- Manufactura
- Técnicas
- Calificación
- Anexos



CIB-ESPOL

Información general del Código

En este código se puede apreciar puntos como el alcance de este, así como también, el propósito y la adecuada aplicación del mismo, los metales base que están especificados dentro de este código, los procesos que pueden ser usados y otros.

En lo que respecta al alcance, esta especificación cubre entonces la soldadura bajo agua, sea esta soldadura seca o soldadura húmeda. Así como también las operaciones requeridas en la superficie, relacionadas al soporte de la soldadura bajo agua, todas estas están dentro del alcance de este documento, el mismo que no ampara a la soldadura en superficie. Toda provisión de este documento aplica igual a construcciones nuevas y a modificaciones y reparaciones de estructuras existentes bajo agua.

El propósito de esta especificación es lograr que se sigan estándares de fabricación y calidad para la soldadura bajo agua. Así también se aclara que el presente documento puede ser usado en conjunción con otros códigos aplicables o especificaciones para diseño, construcción o reparación.

La aplicación de código encierra que toda referencia que necesite ser aprobada, debe ser debidamente interpretada para significar una aprobación, la misma que debe ser hecha por una persona previamente designada que actúa para y en nombre del cliente. El cliente a su vez puede designar a un

ingeniero, inspector u otros a actuar en nombre de él, asegurándose que los requerimientos de esta especificación sean cumplidos. El cliente entonces debe especificar la autoridad designada que lo representa, de tal manera que el término cliente debe ser usado para aquella autoridad que lo representa.



En esta especificación cuando se emplee el término "Debe" se lo tendrá que interpretar como un requerimiento mandatorio, la misma que excluye cualquier idea a discreción del interprete. Por otra parte la palabra "Debería" indica una recomendación que por lo tanto no deberá interpretárselo como mandatorio, así también la palabra "Puede" no implica una obligación permitiendo una libertad de expresión y permisión (Ref.5).

Los metales base que se encuentran incluidos en la presente especificación son aceros al carbono, aceros de baja aleación y aceros inoxidable austeníticos comúnmente usados en la fabricación de estructuras de aceros. La soldabilidad del acero y el procedimiento de soldadura de éste, debe ser establecido para su calificación. Para aquello, cada procedimiento debe

ser calificado basado en contenido de carbono, carbono equivalente y el esfuerzo del metal base a ser soldado en producción. La producción de la soldadura por encima de un carbón equivalente del metal base o esfuerzo que el calificado, deberá requerir una recalificación del procedimiento (el carbón equivalente no deberá ser empleado en metales bases de aceros inoxidable austeníticos).

Los procesos de soldadura que están dentro de esta especificación son:

- GMAW "Soldadura por Arco de Metal y Gas",
- GTAW "Soldadura por Arco de Tungsteno y Gas"
- FCAW "Soldadura por Arco con Núcleo de Fundente"
- PAW " Soldadura por Arco de Plasma"
- SMAW "Soldadura por Arco de Metal Protegido".

Por otra parte, en cuanto a seguridad, este documento no es un estándar de seguridad, por lo que no establece una ejecución de los requerimientos para los problemas de seguridad o procedimientos asociados con bucear o soldar bajo el agua. Sin embargo el anexo D del mismo provee

alguna guía relacionada a la seguridad en los procesos de soldadura y corte bajo el agua. Adicionalmente a esto provee también cierta información de seguridad en lo que respecta a la soldadura que puede ser encontrada en el anexo E del mismo.

El segundo capítulo del código AWS D3.6 M esta relacionada con la Clasificación y el diseño de las juntas soldadas. Una clase de soldadura especificada a un nivel de servicio, y un conjunto de propiedades requeridas, definidas por los ensayos mecánicos, apariencia de la superficie y exámenes no destructivos requeridos, son los que confirmarán la clase de soldadura a cual esta pertenezca. A continuación detallamos esta clasificación:



CIB-ESPOL

- **Soldadura Clase A**

Las soldaduras Clase A bajo agua, son hechas para aplicaciones en los cuales la junta a soldar soportará altos esfuerzos comparables a sus convencionales en superficie. En virtud a las propiedades y ensayos requeridos.

- **Soldadura Clase B**

Las soldaduras clase B bajo el agua son hechas para aplicaciones menos críticas. Aplicaciones donde la porosidad moderada, la baja ductilidad, y otras discontinuidades limitadas, pueden ser toleradas.

- **Soldadura Clase C**

La soldadura Clase C bajo el agua necesita satisfacer solo pequeños requerimientos con respecto a la clase A, B y O; y son hechas para aplicaciones en donde la carga o presión, no es una consideración primaria.

- **Soldadura Clase O**

Este tipo de soldadura bajo el agua, debe cumplir con requerimientos de algunos códigos de diseño, o de especificaciones, y también requerimientos adicionales, definidos dentro de ellos. De tal manera que la soldadura bajo el agua cumpla con las exigencias de las condiciones de trabajo.

En una solicitud para trabajo o contrato u oferta, el cliente deberá especificar cada clase de soldadura y los requerimientos suplementarios para el propósito del trabajo. Por ende toda la soldadura de producción en concordancia con esta especificación deberá ser hecha también en concordancia con el procedimiento de soldadura calificado.



El capítulo 3 del código está relacionado con la ^{CIB-ESPOL}Manufactura. Toda soldadura que este en concordancia con esta especificación deberá ser examinada usando el criterio específico para el tipo particular de clase de soldadura, este requerimiento es aceptado cuando los resultados de la exámenes requeridos son sometidos y aceptados por el clientes. En este mismo capítulo del código se topan temas relacionados con las tolerancias, perfiles de soldadura, soldadura de punto o soldadura temporal, reparación, granalla, chisporroteo y limpieza de soldadura.

El capítulo cuatro llamado técnica, relaciona temas como manipular correctamente los electrodos una vez que estos son removidos de su empaque original, aquí se indica que estos

debe ser protegidos o almacenados de manera que sus características o propiedades de soldadura no se vean afectadas de manera adversa, la manera en que los electrodos deben ser almacenados deberán ser recomendadas por el fabricante. De igual forma el método en que se transportarán los electrodos bajo el agua deberá ser especificado en el procedimiento de soldadura.

Este capítulo también habla sobre la medición correcta de variables como voltaje, amperaje, composición del gas de protección, flujo de gas; deberá ser obtenido en el lugar mismo donde la soldadura es ejecutada es decir en el lugar de producción de la misma.

El capítulo cinco trata de La Calificación, aquí existe información sobre la aprobación del procedimiento, donde se indica que toda soldadura deberá ser realizada en concordancia con un procedimiento de soldadura específico (WPS), este a su vez deberá ser previamente calificado en concordancia con los requerimientos de la presente sección.

La evidencia satisfactoria de que el procedimiento fue calificado deberá ser sometida en forma de un registro de procedimiento calificado al cliente (PQR) soportando el WPS y aprobado por el cliente antes de su ejecución en producción.

Los exámenes o ensayos de soldadura deberán demostrar que una junta de integridad requerida puede ser hecha dentro de las variables esenciales del procedimiento especificado. Estos ensayos o exámenes específicos son requeridos para cada clase de soldadura.



CIB-ESPOL

Todas las personas encargadas de ejecutar alguna soldadura deberán ser calificadas, la evidencia satisfactoria de este requerimiento deberán ser sometidas a la aprobación del cliente previo al desarrollo de la soldadura de producción.

- **Especificación y calificación de un procedimiento de soldadura**

Un WPS es un documento (procedimiento) que ha sido preparado y probado por medio de la calificación y es



usado para suministrar la dirección necesaria y el control cuando se efectúa una soldadura.

Este procedimiento tiene que relacionar como mínimo todas las variables descritas en la tabla 3, correspondiente al código AWS D3.6M para el proceso que sea aplicable.

Estas variables incluyen:

- Las variables esenciales y no esenciales relativas a cada proceso usado en el procedimiento.
- Los rangos aceptables.
- Otra información que se desee para un control adicional.

Es importante resaltar que dicho procedimiento tiene que hacer notar los rangos aceptables a ser seguidos cuando se este realizando el trabajo de soldadura.

Hay que recalcar también que la intención del procedimiento de soldadura es dar directivas al personal envuelto en la ejecución del trabajo.

Variable Esencial (procedimiento)

Es cualquier cambio en una condición de soldadura la cual afecta las propiedades mecánicas de la unión soldada como por ejemplo:

- Proceso de soldadura
- Metal de Aporte
- Electrodo (de diferente clasificación AWS)
- Precalentamiento o Tratamiento térmico pos-soldadura
- Cambio de Fabricante (aunque posea igual clasificación)



CIB-ESPOL

Variable No Esencial (Procedimiento)

Un cambio en una condición de soldadura, la cual no afecta las propiedades mecánicas de la unión soldada tales como:

- Salinidad del agua
- Corriente de agua

Limitaciones de variables esenciales y no esenciales

Cualquier cambio en una variable esencial bajo el límite de lo especificado en la tabla 3 (Variable para soldadura húmeda), requiere de un desarrollo y calificación de un procedimiento por separado o revisión y recalificación de un procedimiento de soldadura existente. Los rangos calificados de las variables esenciales serán usados en el procedimiento de calificación del ensayo. Los cambios pueden ser hechos en las variables no esenciales sin recalificación del procedimiento. Este puede ser documentado por revisión o corregidos en el procedimiento de soldadura especificado (WPS) original o en nuevo (WPS)



CIB-ESPOL

TABLA 3

VARIABLES DE LA SOLDADURA HÚMEDA

1	Junta	
2	Metal Base a) Soldadura de Filete a Soldadura a Tope b) Soldadura de Filete multipase a Soldadura de u solo pase y viceversa. c) Omisión de respaldo. d) Forma a Tope: Un decrecimiento en el ángulo, un decrecimiento en la abertura de la raíz o un incremento en la cara de la raíz más allá de lo calificado. (ref a 5.9.4) e) Soldadura a Tope, a soldadura de filete multipase acorde con el párrafo 5.9.2. f) Tamaño de la soldadura de filete: Para una calificación de un procedimiento de soldadura de un solo pase (longitud) debe ser 1.0S y una producción mínima del tamaño de soldadura debe ser 0.5S. Donde S es la longitud de la soldadura calificada. Para la calificación de un procedimiento de soldadura multipase, la producción máxima del tamaño de soldadura debe ser 1.5S y la mínima producción del tamaño de soldadura debe ser 0.5 S, donde S es la longitud de la soldadura calificada.	Esencial Esencial Esencial No esencial Esencial
3	Material de Aporte a) Espesores: Para procedimientos de soldadura a tope, la calificación con un test de espesores t de platina a tubería, la máxima producción con platina o tubería de espesor deberá ser 1.5t. La mínima producción de platina o tubería en la pared de espesor deberá ser 0.5t. Sin embargo si la producción de soldadura es de espesores de 6 mm (1/4 pulgada) o menores, el test de soldadura deberá ser del mismo espesor. b) Un incremento en el carbón equivalente o porcentaje de del carbón por encima del calificado (no aplica a ceros inoxidables austeníticos) c) Un incremento en el mínimo de esfuerzo de tensión especificado bajo el que calificó. d) Un cambio en la composición química bajo el que calificó en 5.6.1.	Esencial Esencial Esencial Esencial
4	Manufacturación a) Cambio en el nombre convencional (aunque ambos se encuentren dentro de la misma clasificación de material de Aporte). b) Diámetro c) Método de transporte y almacenaje bajo agua d) Adición o eliminación o cambio suplementario de aleantes o recubrimiento bajo agua. e) Un incremento en el tiempo de exposición de material de aporte en la calificación de la profundidad atmosférica.	Esencial Esencial Esencial Esencial
5	Posición a) Algún cambio por debajo de que se califico en la tabla 5.4.	Esencial
6	Temperatura de soldadura a) Un cambio en algún tratamiento térmico	Esencial
7	Características Eléctricas a) Tipo de corriente de Soldadura (Corriente directa electrodo positivo, corriente directa electrodo negativo, corriente pulsada y otros) b) Tipo de fuente de poder (corriente constante, voltaje constante) c) Excedente de corriente de soldadura +10% de la máxima, o -10% de la mínima de la calificada. d) Voltaje de arco excedente +10% de la máxima o -10% de la mínima de la calificada.	Esencial Esencial Esencial Esencial
8	Técnica a) Movimiento d empuje recto a onda o viceversa. b) Progresión desde arriba o abajo o viceversa. c) Eliminación de Temperatura a la soldadura d) Cambio en la secuencia al cordón de soldadura e) Velocidad del trayecto de soldadura o longitud de corrida del electrodo bajo el rango calificado. f) Limpieza de la junta. g) Adición , eliminación o cambio en algún tipo de Barrier a restricción de acceso de agua durante la soldadura o enfriamiento. h) Adición de temperatura Bead i) Dirección de progresión del pase de raíz sobre dble junta de soldadura, donde la segunda cara es reforzada gouge to sound metal.	Esencia Esencial Esencial Esencial Esencial Esencial No esencial No esencial
9	Medio Ambiente a) Cambio en la profundidad mas allá de las permitida en 5.6.2. b) Respaldo en lado seco a húmedo si el material es de 6mm (1/4 pulgada) o mayor. c) Respaldo en lado seco a húmedo y viceversa si el espesor del material es menor que 6mm (1/4 pulgada). d) Diferencial de presión entre respaldo y lado frontal de soldadura mayor que el calificado e) Corriente de Agua f) Salinidad (agua salada, agua fresca o viceversa	Esencial Esencial Esencial Esencial No esencial No esencial

1.6 Seguridad Bajo el Agua

En las operaciones de soldeo bajo el agua, independientemente del procedimiento utilizado, es necesario que constantemente se insista en la importancia de la seguridad. En estas operaciones bajo el agua la vida y seguridad de los buceadores dependen de la estricta observancia de las normas.

Ya que el empleo de corrientes eléctricas, para el soldeo bajo el agua puede resultar muy peligroso. Especialmente en el mar, donde el agua salada es excelente conductor de la electricidad.

Empleando los medios de protección adecuados y respetando estrictamente las medidas de seguridad que se mencionarán más adelante, el soldeo bajo el agua puede realizarse con un grado de seguridad suficiente. El personal dedicado a este tipo de operaciones debe convencerse de que la seguridad no es cuestión de suerte y que el riesgo es mínimo si se ha tomado

las medidas posibles para evitarlo y se ha previsto los sistemas de emergencia oportunos.

A continuación se mencionan aquellas normas que por seguridad se deben seguir:

- La soldadura bajo el agua solo debe encomendarse a buceadores especializados, con el auxilio de ayudantes en superficie perfectamente entrenados.
- El buceador debe practicar la soldadura, antes de intentar el trabajo en el agua.
- El buceador debe asegurarse de que todo su cuerpo esté perfectamente aislado de la pieza, o del porta electrodos y del agua. Para evitar contactos a través de la escalafandra hay que cubrirse la cabeza con una caperuza adecuada.
- El circuito de trabajo debe estar sin tensión salvo cuando se esta soldando.
- No operar el interruptor de seguridad ni abrir o cerrar el circuito, a menos que esté específicamente dirigido por el buzo; y cuando este así lo haga, deberá confirmar cada cambio por medio del sistema de comunicación.

- La corriente deberá estar cortada todo el tiempo, excepto cuando el buzo se encuentre soldando (el interruptor deberá estar abierto excepto cuando el buzo este soldando)
- Mantener siempre el interruptor de seguridad al alcance de la mano del supervisor del trabajo, todo el tiempo.
- Después de insertar el electrodo en la pinza, este debe dirigirse hacia la pieza antes de solicitar la corriente. Inmediatamente después de cerrar el circuito, el ayudante de superficie ha de confirmar esta acción anunciando al buceador que ya tiene corriente.
- Cuando se termina un electrodo, el buceador no debe intentar sacar la colilla hasta haber solicitado el corte de corriente y haber recibido la confirmación desde la superficie.
- Es necesario realizar una verificación periódica del aislamiento del porta-electrodo y cables. Todas las conexiones sumergidas deben estar perfectamente aisladas e impermeabilizadas.
- Encima del buceador y en una zona de radio igual a la profundidad, no debe permitirse ningún tipo de trabajo.

- El equipo de buceo ha de estar en buenas condiciones y provisto de un sistema de comunicación confiable.
- El buceador debe siempre llevar guantes de goma perfectamente secos por el interior.
- Antes de iniciar cualquier operación de soldadura, asegurarse de que no existan sustancias combustibles o explosivas (sólidas, líquidas o gaseosas) en las profundidades de la zona de trabajo, ni en un radio de 15 metros, como mínimo. Como se sabe las proyecciones pueden desplazarse a grandes distancias especialmente hacia arriba.
- No operar el interruptor de seguridad en atmósferas combustibles
- Debido a las malas condiciones de estabilidad y visibilidad que suelen prevalecer en el agua, el buceador debe manejar el porta electrodos con mucho cuidado, procurando no enredarse con mangueras o cables. Mantener los cables y gomas lo más lejos posible de la zona de trabajo.
- El buceador no debe permitir que alguna parte de su cuerpo o del equipo de protección llegue a formar parte del circuito eléctrico.



- Cuando se utiliza la corriente alterna los accidentes eléctricos suelen ser más graves. “La corriente alterna no es recomendable para trabajos en el agua”
- Bajar la pantalla de protección visual antes de cebar el arco.
- Para desplazarse al fondo o subir a la superficie, quitar previamente el electrodo
- Vigilar periódicamente la escalafandra y otras partes metálicas del equipo, para ver si están deterioradas como consecuencia de fenómenos electrolíticos. La toma de masa debe realizarse de forma que estos fenómenos se reduzcan al mínimo posible. (no trabajar a espaldas de la toma de masa).
- Después de cada jornada de trabajo debe lavarse el porta electrodos, con agua dulce, secándolo a continuación, a fin de mantenerlo e buenas condiciones.



CIB-ESPOL

Figura 1.32 Supervisión y seguridad en superficie

7 Metodología y Selección de Variables

Cuando se está desarrollando un WPS, usted deberá primero determinar cual es la utilización que se intenta para este, la disponibilidad del equipo para soldar, y la habilidad de los soldadores usando este procedimiento. Existen cuatro consideraciones a tomar en cuenta:

- Cuáles materiales base van a ser soldados?
- Cuáles metales de aporte serán usados?
- Cuáles procesos de soldadura serán usados?
- Cuáles restricciones de servicio o producción son requeridos?.

- Selección del Material Base

La Selección de material base, para poder desarrollar un procedimiento de soldadura deberá tomar en cuenta los siguientes lineamientos antes de su selección de acuerdo a lo estipulado en la tabla 3. Todo aquello fuera de lo estipulado en la mencionada tabla es considerado una variable esencial.

El primer paso será entonces seleccionar el material base más conveniente, cabe indicar que el porcentaje de carbón equivalente deberá ser mayor que aquel material que se desee soldar bajo el mismo procedimiento de soldadura. Para esto será necesario conocer la composición química y carbón equivalente del material a utilizar en el procedimiento, el mismo que puede ser determinada por un análisis químico.

Por todo lo anteriormente dicho la composición de todo material base a ser soldado en producción deberá ser conocida o determinada en concordancia con uno de los siguientes métodos.

- **Límite de Especificación:** La composición química del material puede estar basado sobre el máximo valor permitido por la especificación aplicable. Si esto puede ser demostrado, es decir que todo material caliente a ser soldado en producción estaría siendo

producido en concordancia con la especificación referida.

- **Reporte de Fábrica:** La composición química del material puede estar basada sobre los máximos valores de los rangos provistos por el productor de metales en caliente a ser soldados en producción.

- **Análisis usando el Método de Examen Standard:** La composición química del metal puede estar basada sobre los valores actuales, como los determinados por análisis en concordancia con Estándares ISO o ASTM por cada material en caliente a ser soldado en producción.

Eligiendo cualquiera de los métodos anteriormente descritos y que están amparados en el artículo 5.6.1 del código AWS D 3.6M; se deberá tomar en cuenta que el carbón equivalente del acero utilizado para la calificación del procedimiento de soldadura, no



deberá ser menor que el carbón equivalente de los aceros a ser soldados en producción.

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

Cuando solo el carbón y el manganeso son conocidos, la siguiente formula alternativa puede ser usada.

$$CE = C + \frac{\text{Mn}}{6} + 0.05$$

– **Selección del Material de Aporte**

En el caso del material de aporte, esta selección es muy diferente a la que se pudiera utilizar en otros códigos, a continuación se detalla los lineamientos a seguir para la misma. Todo aquello fuera de lo estipulado se lo considera una variable esencial.

Se tendrá que tomar en consideración la marca del fabricante, cualquier cambio en este sentido, implicaría el desarrollo de un nuevo procedimiento, aunque ambos materiales de aporte estén dentro de una misma clasificación. Para este trabajo se ha decidido trabajar con la marca Hydroweld una empresa líder en el desarrollo de soldadura húmeda y que además han presentado buenos resultados en soldadura clase A y B bajo el código AWS D 3.6M. El electrodo es el Hydroweld FS™

Sin embargo para un mejor entendimiento del lector hay que considerar a dicho electrodo como un electrodo compuesto por revestimiento rutilico, hay que indicar que cualquier cambio en el diámetro del electrodo es considerado también variable esencial, en este caso en particular el electrodo es de 1/8" o 3.25 mm.

– **La posición de soldadura**

La posición de soldadura a elegir aún no esta realmente definida, sin embargo por la comodidad

que pueda experimentar el buzo/soldador y por la necesidad de poder realizar un diseño de junta recomendable para la posición a trabajar se tiene pensado trabajar en posición 1G y 2G esto es plano y horizontal respectivamente.



– **Diseño o selección de la junta a soldar**

CIB-ESPOL

La selección de la junta adecuada es significativamente decisiva para el resultado final de la junta soldada, tomando en consideración las limitación en cuanto a variedad de electrodo en la soldadura húmeda, el diseño de la junta no solo debe estar orientado a la posición de soldadura o al espesor del material base sino también a la característica de electrodo a utilizar y el diámetro del mismo.

Conociendo que los electrodos rutilicos poseen características de penetración solo aceptables y que además la polaridad directa utilizada normalmente en la soldadura húmeda afecta de manera desfavorable

a la penetración del material de aporte, fue necesario recurrir a una junta que beneficie la penetración, esta fue la junta a tope tipo V con talón, con la idea de ir variando la abertura de raíz a un máximo 3 mm. De tal forma de reducir la posible oscilación del electrodo al tratar de rellenar la junta, movimiento que resulta normalmente perjudicial y difícil de controlar en un medio como el agua. La idea fundamental es entonces facilitar la penetración del material de aporte, al que también aprovechar la tasa de deposición del material de aporte de tal forma que el movimiento oscilatorio del soldador se reduzca al mínimo, evitando así el ingreso del agua a la protección gaseosa que ejerce los humos al momento de estar el arco encendido.

Igualmente se deja abierta la posibilidad de realizar un cordón de respaldo, en caso que la penetración del condón de raíz no sea satisfactoria.

– Selección de Tipo de Corriente y Polaridad

El tipo de corriente con el que se va a trabajar es corriente directa (DC), la razones principales obedecen a un tema de seguridad, así como también por que las características de la corriente directa (DC), son apropiadas para mejorar el arco de soldadura, lo que en el caso de la soldadura húmeda es realmente importante considerando el medio que rodea a esta.



La polaridad seleccionada, es la polaridad negativa (-), la razón por la que se no se trabaja con polaridad (+) es por que la electrólisis podría producirse y causar una rápido deterioro de algún componente metálico en el porta electrodo, la misma que a más de causar un daño material podría poner en riesgo la vida del buzo/soldador.

Por otro lado los valores de corriente y voltaje son propiamente un dato experimental que serán tomados al momento de realizar la práctica. Hay que indicar además que la idea de este experimento es

también sacar conclusiones sobre el comportamiento de la soldadura, para esto se tiene pensado trabajar con variables que nos permita hacer el seguimiento a este comportamiento. Dicha variable será el amperaje, el mismo que será sometido a cambios crecientes en las diferentes probetas, al igual que el voltaje parámetro que en gran medida es dado por el buzo/soldador ya que varía en función de la longitud de arco. Cabe indicar además que para esto nos hemos basado a en la tabla 2 que nos da una idea del rango de amperaje con los que trabaja el electrodo.

Además de lo anteriormente descrito es importante considerar que los electrodos bajo agua tienen un comportamiento diferente al que pudiera tener un electrodo convencional en superficie; las razones son diversas y van desde, caída de tensión, polaridad inversa, salinidad del agua, hasta profundidad donde se esta trabajando; todos estos factores influyen en que el arco se comporte de manera diferente aunque se esté trabajando con el mismo amperaje en el

equipo, por todo aquello las mediciones eléctricas hechas bajo las condiciones de calificación y producción, podrían involucrar diferentes niveles de exactitud, por lo que los rangos eléctricos deben ser considerados nominales.

– **Tipo de limpieza**

El tipo de limpieza a usar son dos: el primero por medio químico que asegure una superficie libre de impurezas antes de trabajar, para ello se usará un limpiador spray; y el segundo es un disco de desbaste cuando se requiera hacer un tipo de limpieza entre cordones de soldadura



– **Pre calentamiento**

CIB-ESPOL

No se realizará pre calentamiento a la junta, por considerar que no es necesario en espesores de este tipo y tomando en consideración que se trata de un acero de bajo carbono.

– **Velocidad de Avance**

Este dato es también experimental y será tomado una vez que se realice la prueba, depende además de otros factores como:

- Tipo de Junta
- Posición a soldar
- Amperaje
- Espesor del material base
- Tipo de electrodo
- Habilidad del soldador

Sin embargo en función de lo mencionado anteriormente en este capítulo, los principales problemas de la soldadura húmeda son causados por las altas tasas de enfriamiento de la junta soldada, este factor convierte a la velocidad de avance en uno de los elementos protagonista dentro de la soldadura húmeda, producto de lo indicado es evidente que de existir una velocidad de avance muy alta la tasa enfriamiento será mayor que en aquella junta en la que la velocidad de avance fue menor.

De ahí que en la soldadura húmeda lo que se desea es encontrar la velocidad de avance correcta que permita evitar tasas de enfriamientos elevadas que afecten de manera considerable la microestructura del material, ayudando así a la feliz culminación del trabajo, el mismo que se encuentra circunscrito en un marco de ahorro económico en comparación con la otra alternativa, que es la de realizar el trabajo en superficie



CIB-ESPOL

– **Tiempo de Pases y entre pases**

Los tiempos de pase y entre pases, serán tomados al momento de realizar la prueba y corresponde a datos experimentales.

– **Profundidad**

La profundidad a la cual se va a realizar esta prueba está supeditada a la condiciones del medio, por ser hecha estas pruebas dentro de una piscina y en taller.

Sin embargo existen limitaciones en lo que respecta al rango calificado en función de la profundidad determinada en la que se realiza el procedimiento de soldadura, para esto se recurre a la tabla 4 (Limitaciones de la profundidad para calificación de soldadura), esta tabla consta de 4 columnas, la primera que indica el tipo de soldadura a calificar ahí están descritas: "Soldadura seca, la soldadura húmeda con acero al carbono, o de baja aleación en el material de aporte, soldadura húmeda con acero inoxidable austenítico como material de aporte, soldadura húmeda con otros materiales de aporte; la segunda columna indica la profundidad en metro o pies a la cual será realizada la soldadura de producción, la tercera columna indica en función de la profundidad, la máxima profundidad a la que puede calificar el procedimiento de soldadura, la cuarta columna indicará entonces la profundidad mínima que califica este procedimiento de soldadura.

TABLA 4
PROFUNDIDAD LIMITE PARA CALIFICACIÓN DE SOLDADURA

Tipo de Soldadura	Profundidad de Producción de Soldadura	Máxima Profundidad Calificada	Mínima Profundidad Calificada
Soldadura Seca	Toda	X mas 10 m	X menos 10 m o 0.2X cualquiera superior
Soldadura Húmeda para aceros al carbono, de bajo carbono o aleaciones	Mayor que 3 m	X más 10 m	X menor a 10m o 0.2X cualquiera superior
	Igual o menor que 3 m	X mayor a 10 m	X
Soldadura Húmeda para aceros inoxidables austeníticos en material de aporte	Toda	X más 3 m	X mínimo 10 m o 0.2X cualquiera superior
Soldadura Húmeda con otros materiales de aporte	Toda	X	X mínimo 10 m (33 ft) o 0.2 X cualquiera superior

Notas Generales:

1. X es la profundidad a la cual fue calificada.
2. Para la máxima profundidad calificada , la profundidad debe ser medida desde el extremo inferior a ser soldado con una tolerancia de más menos 230 mm
3. Para la mínima profundidad calificada , la profundidad debe ser medida desde el extremo superior a ser soldado con una tolerancia de más o menos 230mm

CAPITULO 2

EJECUCION EXPERIMENTAL DE LA SOLDADURA HUMEDA



CIB-ESPOL

La parte experimental de este trabajo se convirtió en la complementación de aquella información teórica recabada a lo largo de toda el tiempo que duró la investigación. Es importante hacer un paréntesis en esta parte del presente estudio para dar a conocer al lector que se necesitó de la colaboración de algunas personas relacionadas al campo de la soldadura y el buceo para llevar a cabo las prácticas de soldadura húmeda, así como también de algunos equipos que mencionaremos más adelante

Fue necesario entonces realizar dos prácticas finales, previo a ellas se hicieron una serie de inmersiones para poder comprender de mejor forma el comportamiento del arco de soldadura en este medio, así

como también para entender el efecto de las variables presentes en la soldadura húmeda (amperaje, voltaje, profundidad, visibilidad, habilidad del buzo soldador etc.), indudablemente que la destreza del Buzo/soldador juega un papel preponderante en la experiencia. Se procederá entonces a realizar una primera práctica en piscina y luego de esta se realizará otra en taller bajo ciertas condiciones que nos permitan establecer una comparación entre ambas.

Como anteriormente se indicó, la práctica en piscina requirió de una preparación previa donde se presentaron algunos inconvenientes que llevaron a realizar modificaciones en la manera como inicialmente se pensaba trabajar, los mismos que serán mencionados más adelante. Para ayudar a la comodidad del buzo/soldador se diseñó un posicionador de probeta, el mismo que tendrá como función principal el posicionamiento seguro de la pieza bajo el agua y dar comodidad al soldador para la ejecución del trabajo; la experiencia consistirá en soldar seis probetas de 6 mm y 8 mm respectivamente. Luego se realizará una nueva práctica, esta vez en un taller con la idea de mejorar las condiciones que rodean al soldador, conservando el arco de soldadura bajo el agua, estas modificaciones nos permitirán más adelante establecer como afectaron estos cambios a los resultados

obtenidos en ambas prácticas, lo que permitirá más adelante la elaboración de recomendaciones y conclusiones en este sentido.

Se procederá para esto al diseño y construcción de un recipiente de acero al carbono el mismo que contará en su interior y a sus extremos con unos topes que permitirán sostener a la probeta a soldar en su interior, de igual manera cuando este recipiente sea llenado con agua la probeta permanecerá sumergida .

Otro cambio que se realizará en esta práctica es que se añadirá sal al agua con la idea de simular las condiciones del agua de mar, esta modificación busca como finalidad mejorar la calidad de arco que se desarrolle en este trabajo.

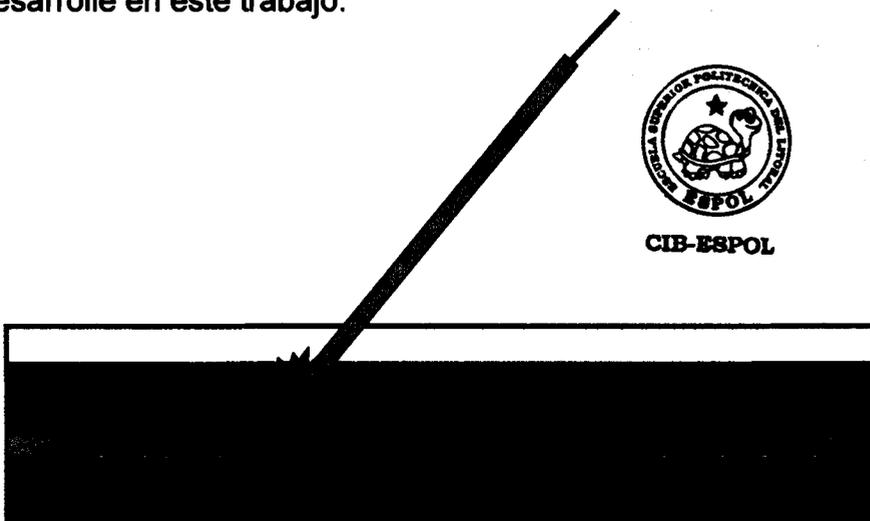


Figura 2.1 Recipiente diseñado para la práctica en taller

A continuación se detallan los equipos y accesorios utilizados

2.1 Materiales a Utilizar

2.1.1 Descripción de Equipos

A continuación se describen aquellos equipos utilizados en piscina



CIB-ESPOL

- El traje utilizado para esta práctica es de neopreno, y de tipo húmedo. El mismo que permite la entrada de una pequeña cantidad de agua entre el traje y la piel, de tal manera que en un pequeño espacio de tiempo el agua adquiere la misma temperatura que la del cuerpo.

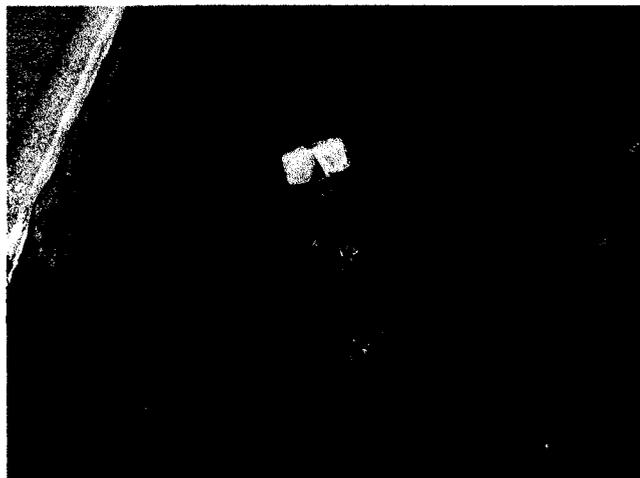


Figura 2.2 Traje de Buzo de Neopreno

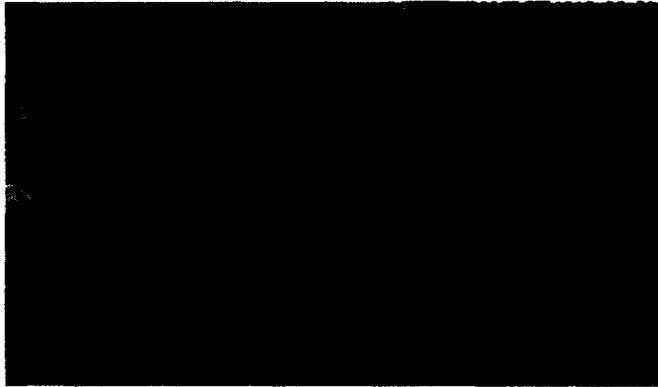
- Además del visor, se montaron vidrios oscuros en su interior, aquí hay que puntualizar que aunque el soldador presentó problemas de una buena visión para poder hacer su trabajo, la protección visual provista por medio de vidrios oscuros de denominación DIN es importante, normalmente la protección mas utilizada para trabajos de soldadura van desde la numeración #10 hasta la #12, el número a elegir depende de algunos factores como la sensibilidad en los ojos, así como también de la radiación emitida por el arco de soldadura a utilizar. Sin embargo en las inmersiones previas realizadas anteriormente, el buzo mostró su inconformidad al trabajar con lentes muy oscuros de protección que salvaguardaba sus ojos, los cuales le impedían realizar un correcto trabajo. Se trabajó entonces con vidrios #7 y #8.
- Una máquina de soldar con tecnología marca Lincoln y el modelo es Invertec 350 Pro, la misma que es una fuente portable que puede llevar hasta el

punto de trabajo una corriente DC entre 5 amperios hasta 425 amperios.



Figura 2.3 Máquina de soldar Lincoln

- Porta electrodos y pinza de tierra de característica de similares capacidad de trabajo hasta 500 amperios, así como también cables 2.0 para la conexión de los elementos antes mencionados.
- Se trabajó también con un interruptor de seguridad siempre requerido para este tipo de trabajo, con la finalidad de poder romper rápido el circuito en caso de una emergencia.



CIB-ESPOL

Figura 2.4 Interruptor de seguridad

- Un marcador de metal el mismo que nos ayudó señalar en cada probeta los parámetros con los que se había realizado la soldadura. Por otra parte también sirvió como una especie de guía en algunos casos donde el buzo/soldador manifestó dificultad en la visión para poder soldar la probeta en un medio como el agua y también debido a una abertura de raíz muy pequeña.
- Un compresor a gasolina que sirve como medio de abastecimiento de aire para el buzo. Marca: Kaiser, Procedencia: Alemania



Figura 2.5 Compresor de Pistones

- Posicionado de probeta para piscina, este equipo está conformado por una base trípode con un eje vertical de aproximadamente 200 cm y un conjunto de bocines que ensamblan al eje vertical con otro transversal a él de 160 cm, permitiendo mover una pequeña base instalada sobre el eje horizontal de manera libre tanto a la derecha como a la izquierda y a favor y contra de las manecillas del reloj, así también el bocín en el eje vertical permite mover la base instalada hacia arriba o hacia abajo de acuerdo como lo que requiera el buzo, ambos bocines estén provisto de los respectivos pernos que permiten su ajuste una vez que la posición de la pequeña base es

satisfactoria. La dimensión de esta base permite a su vez sujetar la placa de manera horizontal o vertical por medio de unos topes de sujeción que son apretados por 4 pernos distribuidos en cada esquina de la base.



Figura 2.6 Posicionador de probeta para piscina

En la práctica de taller la misma máquina de soldar que aquella usada en la piscina y adicionalmente con los accesorios y equipos detallados a continuación:

- Recipiente posicionador de probeta para taller, cuyas dimensiones son de 60 cmX 40 cm x 20 cm, el mismo que cuenta con unos topes en sus

extremos para poder asentar la probeta a una altura de 15 cm con respecto a su base. A este recipiente previamente se le vierte agua, dejando la probeta sumergida a una profundidad máxima de 1 cm con respecto a la superficie.

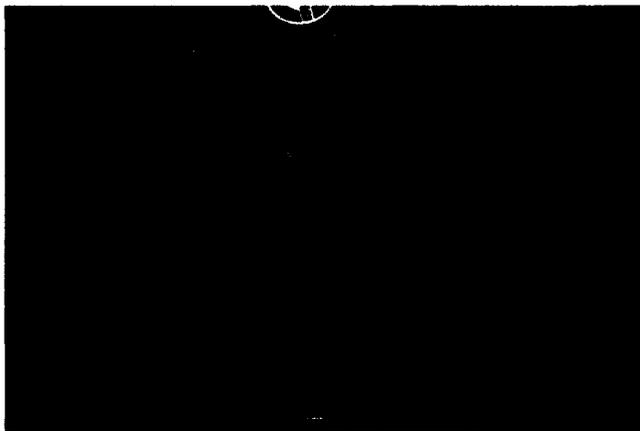


Figura 2.7: Recipiente posicionador de taller

- Fue necesario para protección del soldador el uso de una máscara de soldar, así como también de guantes.
- Fue necesario el uso de discos de corte y de desbaste que permitan hacer un adecuado bisel a la junta así como también el desbaste

recomendado que permitan encontrar la raíz del condón cuando se trabajo con respaldo.

- Conociendo el comportamiento inestable del arco, en la práctica en piscina puede ser mejorado incrementándole el grado de salinidad al agua para incrementar su conductividad eléctrica. Se recurrió entonces a añadir sal al agua que contenía el recipiente.

2.1.2 Propiedades del material base

El material base es un acero de bajo carbono, el cual se escogió por poseer excelentes características de soldabilidad.



CIB-ESPOL

TABLA 5
SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS

Designación Común	Contenido de Carbono	Soldabilidad
Hierro dulce o lingote	0.03 % max	Excelente
Acero de bajo contenido de carbono	0.15% max	Excelente
Acero dulce	0.15%-0.30%	Buena
Acero de mediano contenido de carbono	0,30%-0.50%	Regular (se precisa precalentamiento y frecuentemente tratamiento térmico posterior a la soldadura)
Acero de alto contenido de carbono	0.5%-1.0%	Mala (difícil de soldar sin precalentamiento y adecuado tratamiento posterior)

De acuerdo a lo recomendado por el código AWS D3.6M se procedió entonces al análisis químico del material para conocer la composición porcentual de sus componentes. El resultado fue:

TABLA 6
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL BASE

Composición				
Fe	C	Mn	Si	S
99.16%	0.19%	0.48%	0.15%	0.011%

Este análisis corresponde a un acero al carbono ASTM A 516, comúnmente utilizada en juntas soldadas que van a ser sometidas a presión, para temperaturas moderadas y bajas (Ref. 11)



TABLA 7
PROPIEDADES MECANICAS DEL METAL BASE

Resistencia a la fluencia (psi)	Resistencia máxima a la tracción (psi)	Elongación
30.0000	55.000	27%

2.1.3 Soldabilidad

La soldabilidad es una propiedad del material, la misma que establece una compatibilidad para ser soldado. Se considera que un material posee buena soldabilidad si se puede soldar sin dificultad, y no es necesario

procedimientos costosos ni especiales para obtener similares propiedades que el metal base.

La soldabilidad varía según la composición química y las propiedades mecánicas del material que va ser soldado, es aquí donde el elemento carbono desempeña un importante papel, ya que a medida que aumenta el porcentaje de carbono en el acero, aumenta también la dureza del material, propiedad que es inversamente proporcional a la soldabilidad.

Sin embargo aunque el porcentaje de carbono en acero es suficiente como para tener una idea de la facilidad o dificultad con la que un material puede ser soldado, en algunos casos específicos es importante tomar en consideración los efectos de los otros elementos que componen el material, este concepto se lo expresa en términos de carbono equivalente (C_{eq})

Usamos la fórmula para sacar el Ceq del material, el mismo que nos confirmará si el acero a trabajar posee excelente características de soldabilidad.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + 0.05$$

6



CIB-ESPOL

Todos los elementos se encuentran en porcentaje a su peso en el material base. CE= 0.32%.

El carbono equivalente en la soldadura húmeda es importante ya que de acuerdo a la información consultada en diferentes medios, se ha comprobado que es posible realizar juntas soldadas sin mayor riesgo a la fisura en materiales base con un carbono equivalente menor a 0,40%.

2.1.4 Material de Aporte

El electrodo utilizado es marca Hydroweld, el mismo que fue desarrollado por Hydroweld FS TM empresa líder en Europa en la manufacturación de electrodos para

soldadura húmeda. El diámetro de este es de 3.25 mm x 350 mm de largo. A continuación algunas propiedades del material depositado proporcionado por el fabricante.

Propiedades

Resistencia a la Tracción:	510 N/mm ²
Resistencia a la Fluencia.	460 N/mm ²
Elongación:	17%
Dureza:	175 Hv

Composición del material depositado:

Carbono	C: 0.1%
Manganeso	Mn: 0.5%
Silicio	Si: 0.43%
Fósforo	P: 0.015%
Molibdeno	Mo: 0.01%
Azufre	S : 0.008%

2.2 Selección de Parámetros de Soldadura

Como podremos ver más adelante en las fotos, los resultados de la práctica en piscina no fueron favorables, por lo que en esta parte de este capítulo nos enfocaremos a detallar los parámetros de soldadura usados para la práctica en taller y solamente mencionaremos de manera general los parámetros utilizados en la práctica de piscina en las tablas siguientes:

TABLA 8
DATOS EXPERIMENTALES EN PISCINA

Probeta de 6mm

Posición	Abertura de junta (mm)	Corriente (Amp)	Voltaje (Voltios)	Junta
Plano	No	140	34	A tope, bisel 60 sin talón
Plano	2	140	36	A tope, bisel 60 con talón "

Probeta de 8 mm

Posición	Abertura de junta (mm)	Corriente (Amp)	Voltaje (Voltios)	Junta
Plana	2	160	35	A tope, bisel 60, con talón 2mm
Vertical Descendente	2	160	36	A tope, bisel 60 con talón 2 mm

En las siguiente secuencia de figuras se puede apreciar como se procedió en la ejecución de la soldadura en piscina



Figura 2.8 Adecuando la posición a trabajar y conectando la pinza de tierra



Figura 2.9 Buzo/soldador se prepara a ejecutar la soldadura

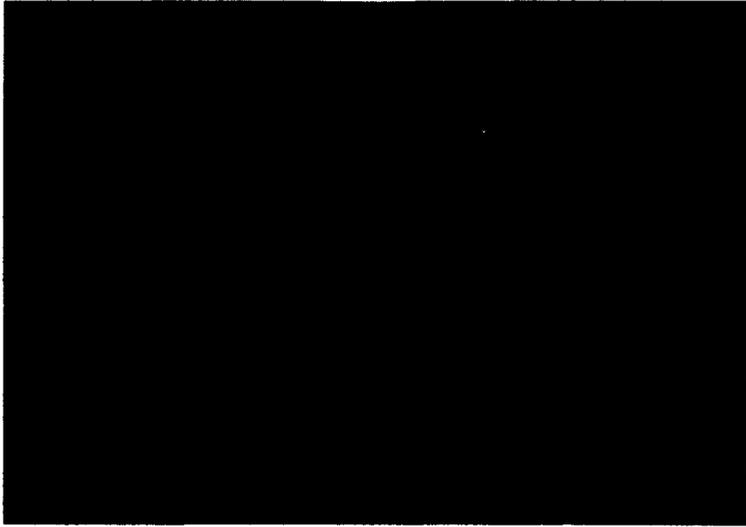


Figura 2.10 Vista lateral de ejecución de soldadura



Figura 2.11 Inicio de arco vista posterior



CIB-ESPOL

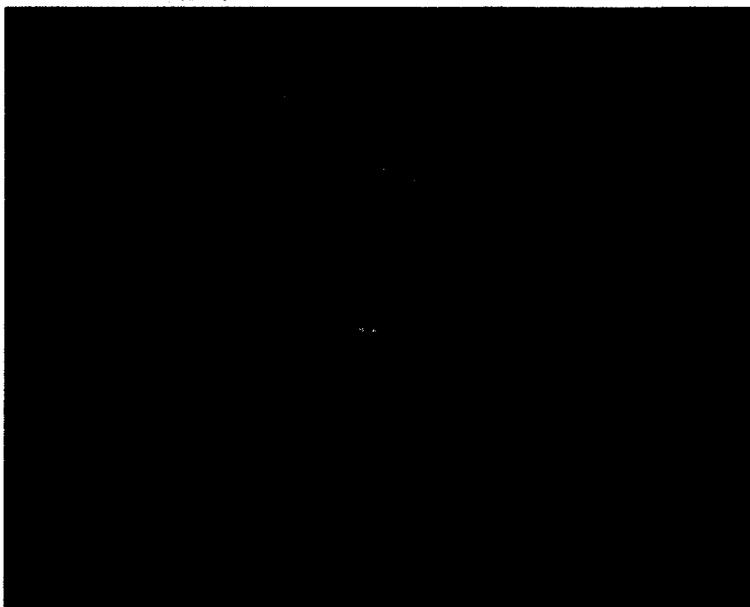


Figura 2.12 Ejecución de soldadura vista desde superficie



Figura 2.13 Desarrollo de la soldadura desde otra vista

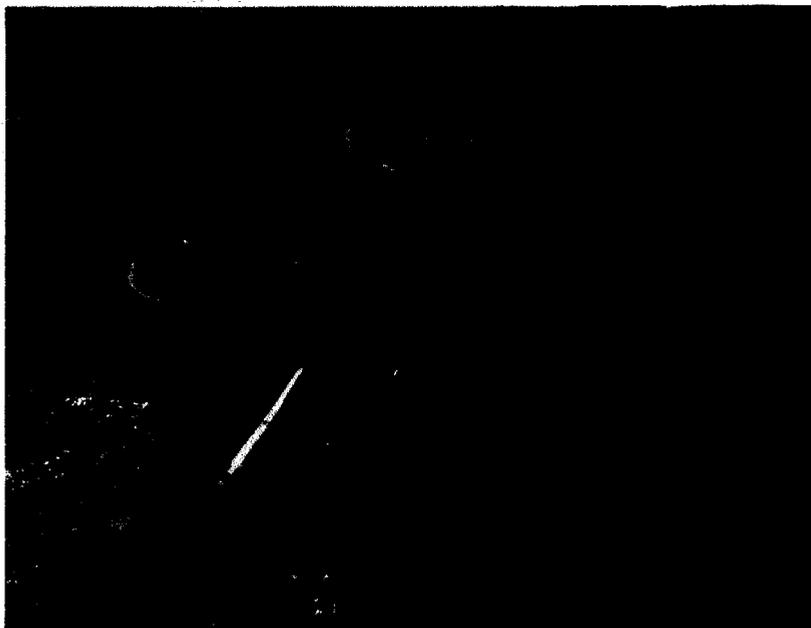


Figura 2.14 Retiro del posicionador una vez ejecutada la soldadura

Aunque como se podrá ver más adelante en las fotos de las probetas el aspecto de la soldadura fue mejorando en comparación con las que normalmente se ejecutan en nuestro País, sin embargo no reunían aún las condiciones necesarias para pasar una inspección visual de soldadura acorde con el código AWS D 3.6M.



CIB-ESPOL

Selección de Parámetros para práctica en Taller:

– Espesor

La elección del espesor no corresponde a ninguna razón técnica , sino a lo existente en el mercado



– Tipo de Junta

El diseño de la junta se convirtió en algo muy importante para garantizar la penetración de la soldadura considerando que las altas velocidades de enfriamiento que se hacen presentes en el agua, aceleran la solidificación del metal depositado perjudicando la penetración de este.

Para esto se consideró una junta a tope con un ángulo de bisel con respecto a la vertical de 22 a 25 grados, hay que indicar que se disminuyó el ángulo de bisel con respecto a aquellas juntas hechas en piscina, la razón para este cambio era reducir la necesidad de oscilación para rellenar la junta, movimiento que como lo hemos mencionado anteriormente resulta tan perjudicial para la soldadura. Así también de la experiencia anterior quedó claro que era muy complicado garantizar la penetración

total en la junta, por lo que en esta ocasión se maneja la alternativa de realizar un respaldo en caso de que se lo considere necesario. La abertura de raíz varío de 2mm hasta prácticamente cero.

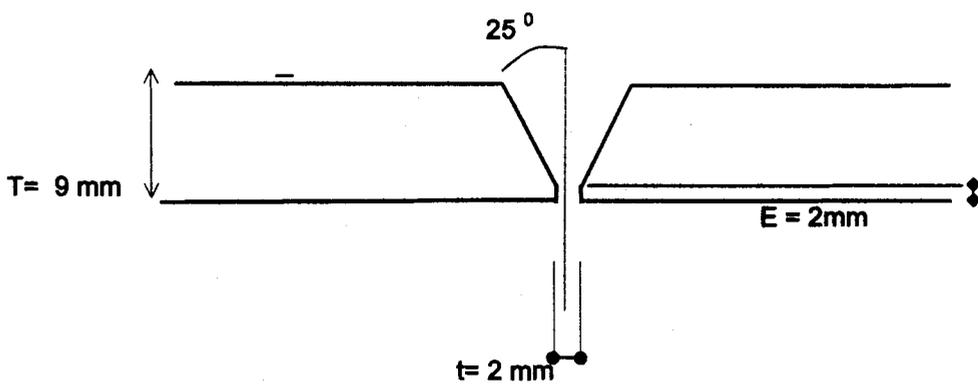


Figura 2.15 Diseño de junta

– **Posición de Soldadura**

Considerando la manera en la que se iba a trabajar, es decir sobre un recipiente con topes para asentar la probeta y pensando en una posición que ayude a mejorar la penetración se trabajó en posición plana.

todss, ya que en ninguno de los casos se consiguió una penetración total en el condón de raíz.

A continuación las figuras correspondientes a la probetas soldadas en esta práctica.

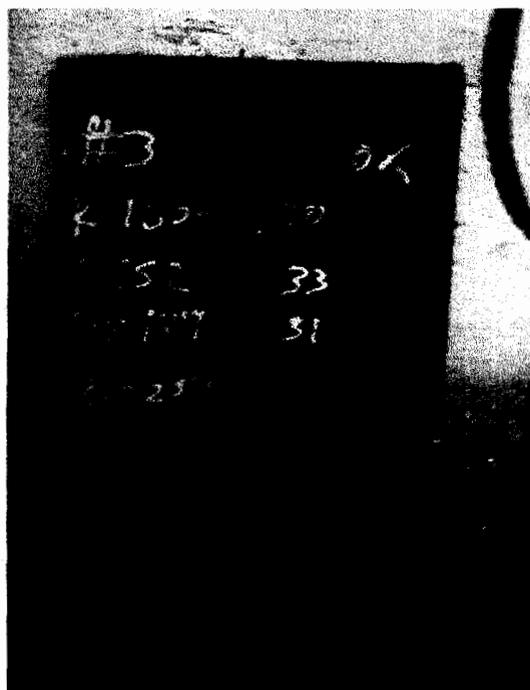


Figura 2.16 Probeta 3, ejecutada en taller

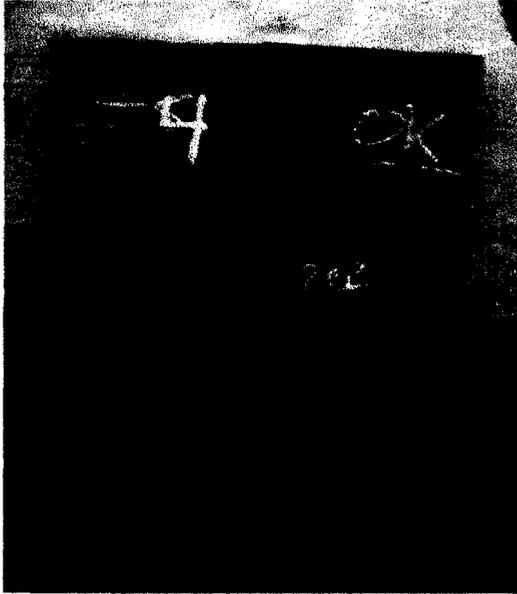


Figura 2.17 Probeta 4, ejecutada en taller

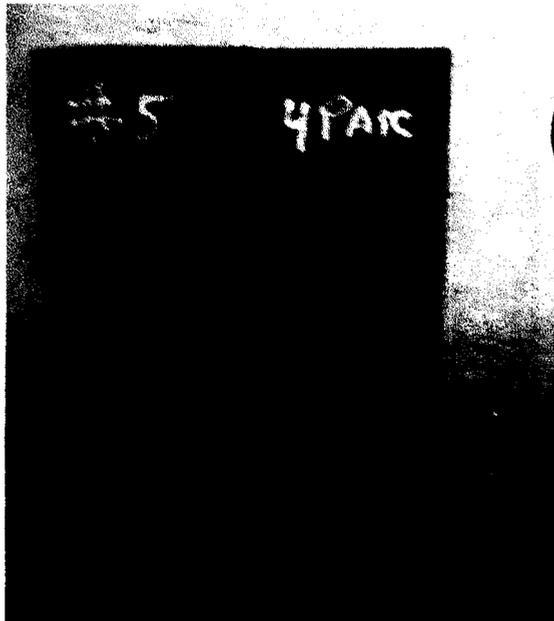


Figura 2.18 Probeta 5, ejecutada en taller



Figura 2.19 Probeta 6, ejecutada en taller

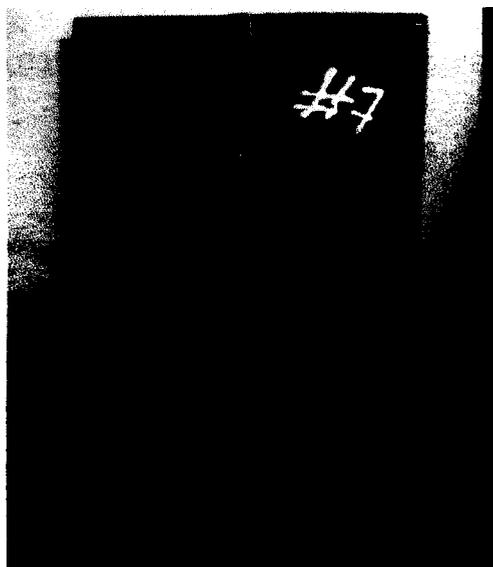


Figura 2.20 Probeta 7, ejecutada en taller

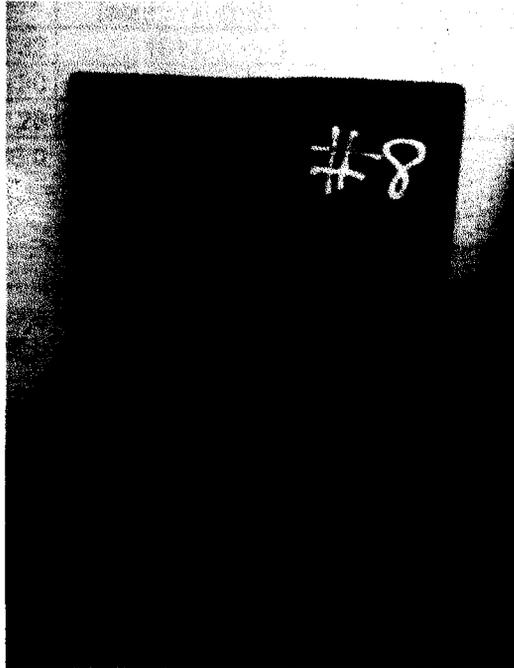


Figura 2.21 Probeta 8, ejecutada en taller

A continuación las tablas de datos correspondiente a los parámetros en la practica realizada en taller

TABLA 9

DATOS EXPERIMENTALES DE TALLER

Muestra #3							
Pase	Corriente (amp)	Voltaje (volt.)	Tiempo de Arco (seg)	Tiempo Total (min)	# de electrodos	Velocidad Avance (mm/seg)	Energía de Arco (joule/mm)
Raiz	160	30	146	5	3	3,4	1401,6
1 Pase	152	33	235	10	4	2,1	2357,5
Respaldo	129	31	190	7	2	2,6	1519,6



CIB-ESPOL

Muestra #4							
Pase	Corriente (amp)	Voltaje (volt.)	Tiempo de Arco (seg)	Tiempo Total (min)	# de electrodos	Velocidad Avance (mm/seg)	Energía de Arco (joule/mm)
Raiz	155	32	161	6	3	3,1	1597,1
1 Pase	140	30	204	9	4	2,5	1713,6
Respaldo	126	28	228	7	2,25	2,2	1608,8
	140,3	30,0	197,7	7,3	3,1	2,6	1639,8

Muestra #5							
Pase	Corriente (amp)	Voltaje (volt.)	Tiempo de Arco (seg)	Tiempo Total (min)	# de electrodos	Velocidad Avance (mm/seg)	Energía de Arco (joule/mm)
Raiz	150	32	180	6	3	2,8	1728,0
1 Pase	136	30	222	9	4	2,3	1811,5
Respaldo	145	31	200	6	4	2,5	1798,0
2 Respaldo	131	31	234	9	3	2,1	1900,5
	140,5	31,0	209,0	7,5	3,5	2,4	1809,5

Muestra #6							
Pase	Corriente (amp)	Voltaje (volt.)	Tiempo de Arco (seg)	Tiempo Total (min)	# de electrodos	Velocidad Avance (mm/seg)	Energía de Arco (joule/mm)
Raiz	164	33	174	6	3,25	2,9	1883,4
1 Pase	144	32	220	8	4	2,3	2027,5
Respaldo	140	32	140	5	2	3,6	1254,4
	149,3	32,3	178,0	6,3	3,1	2,9	1721,8

Muestra #7							
Pase	Corriente (amp)	Voltaje (volt.)	Tiempo de Arco (seg)	Tiempo Total (min)	# de electrodos	Velocidad Avance (mm/seg)	Energía de Arco (joule/mm)
Raiz	162	33	160	7	3,25	3,1	1710,7
1 Pase	138	32	230	6	4	2,2	2031,4
Respaldo	155	30	140	5	2,25	3,6	1302,0
2 Respaldo	155	31	175	6	3	2,9	1681,8
	152,5	31,5	178,3	6,0	3,1	2,9	1681,5

Muestra #8							
Pase	Corriente (amp)	Voltaje (volt.)	Tiempo de Arco (seg)	Tiempo Total (min)	# de electrodos	Velocidad Avance (mm/seg)	Energía de Arco (joule/mm)
Raiz	164	32	170	5	3	2,9	1784,3
1 Pase	144	31	218	6	4	2,3	1946,3
Respaldo	166	31	160	6	3	3,1	1646,7
2 Respaldo	159	31	200	5	3	2,5	1971,6
	158,3	31,3	187,0	5,5	3,3	2,7	1837,2



CIB-ESPOL

2.3 Ensayos de Soldadura

2.3.1 Inspección Visual

La inspección visual es el método más antiguo y más utilizado en los ensayos no destructivos, y esta no solo se refiere a la observación directa de la junta soldada, sino también a sistemas y componentes de maquinarias, equipos, estructuras. etc.

Este procedimiento de ensayo puede rechazar cualquier cordón de soldadura, sin la necesidad de realizar otro ensayo no destructivo.

2.3.2 Inspección Radiográfica

La imagen radiográfica se produce como consecuencia de la propiedad de estas radiaciones de impresionar una emulsión fotográfica y de la distribución variable de la intensidad de la radiación que emerge del objeto radiografiado, debido principalmente a las diferencias de espesor o a la presencia de sustancias extrañas al material que lo constituye en su consecuencia la radiografía no es más que la materialización de una

sombra o "imagen radiográfica proyectada sobre una película fotográfica u otro medio de detección, por un objeto situado entre la película y el foco emisor de la radiación.

Se utilizó una película la película D7:, y con un equipo de radiación SEIFERT de 300 Kilovoltios. Así también se colocó la junta soldada en el equipo de radiación casi al nivel del foco del sistema, se encero el instrumento, y se expuso a 600 mA/minutos con 200 Kilovoltios. También se colocó una plancha de plomo para evitar la radiación secundaria.



CIB-ESPOL

Luego se procedió al tipo de baño de la película, las cuales se encontraban en un estuche de plomo, para evitar el paso de la luz con el fin de que no se velaran las películas.

La tabla a continuación nos muestra el procedimiento del revelado empleado en este ensayo

TABLA 10

PROCEDIMIENTO DE REVELADO DE PELICULAS

Tipo de Baño	Tiempo en minutos
Revelador	4
Baño de parada	0.5
Fijador	4

Los siguientes ensayos solo serán realizados para las probetas 5, 7 y 8. Las razones para aquello serán explicadas en el capítulo 3.



CIB-ESPOL

2.3.3 Análisis Metalográfico:

La metalografía es una de las principales pruebas a realizarse en la junta soldada, esta nos permite conocer las posibles imperfecciones de la junta por medio del estudio de la macroestructura de esta. De manera complementaria tomando en consideración la microestructura podemos llegar a conocer el comportamiento del tamaño de grano a lo largo de toda la junta esto es, en el metal soldado, en la zona afectada

por el calor y en el material base, lo que nos dará una idea del tipo de transformaciones microestructurales que se hicieron presente en la ejecución del proceso de soldadura.

Se preparan entonces las probetas que fueron cortadas de forma manual en las secciones de la probeta, para luego de esto ser analizadas en el microscopio y tomar la correspondiente fotografía de tal manera que exista un registro de aquello. Se realiza un desbaste grueso con lija de cinta No. 180, pasando al desbaste medio utilizando lija de agua No. 220, 320, 400, 600 para realizar luego un pulido final en una pulidora de disco con paño tipo MOL, y empleando pasta de óxido de aluminio (alumina tipo N) como abrasivo sobre un paño tipo DUR, el procedimiento empleado a las probetas para la macrofotografía y a las de Microestructura.

En las muestras utilizadas en la macrofotografía se ataca con el mismo reactivo por un tiempo ente 30 y 40 segundos, la macrofotografía fue realizada con un

aumento de 50X en el macroscopio ESTEREO WILD

Figura 2.22, 2.23, 2.24.

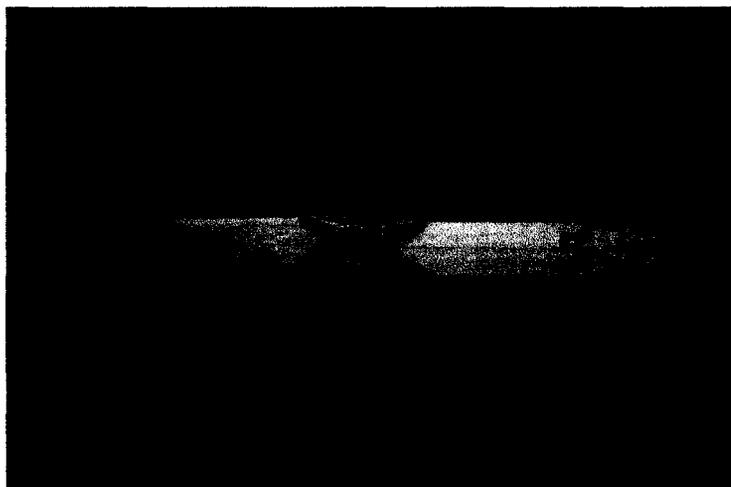


Figura 2.22 Muestra de Probeta 5



Figura 2.23 Muestra de Probeta 7



CIB-ESPOL

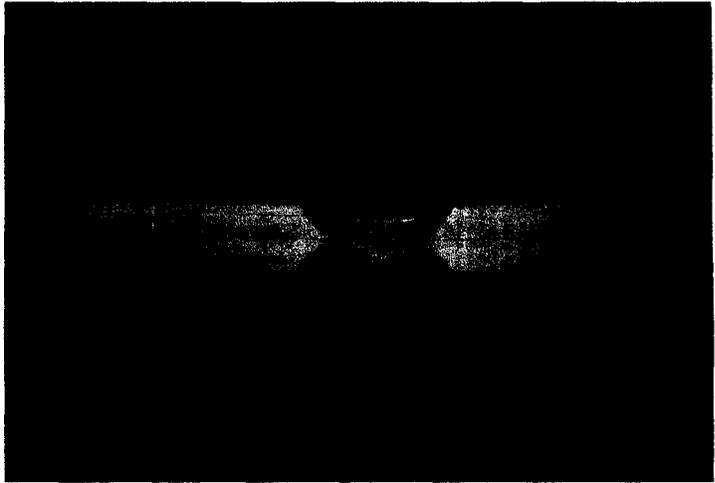


Figura 2.24 Muestra de Probeta 8



CIB-ESPOL

Para la micografía se efectúa un pulido con pasta de diamante tipo B obteniendo una superficie sin fallas, y luego proceder al ataque químico del material con el reactivo NITAL al 3%, el cual es un ácido, con un tiempo de exposición de aproximadamente 3 segundos, para ser inmediatamente secado, de esta forma queda lista la probeta para ser analizada en el microscopio OLIMPUS PME, donde se realiza un barrido a toda la microestructura con un aumento de 800X figura 2.25.

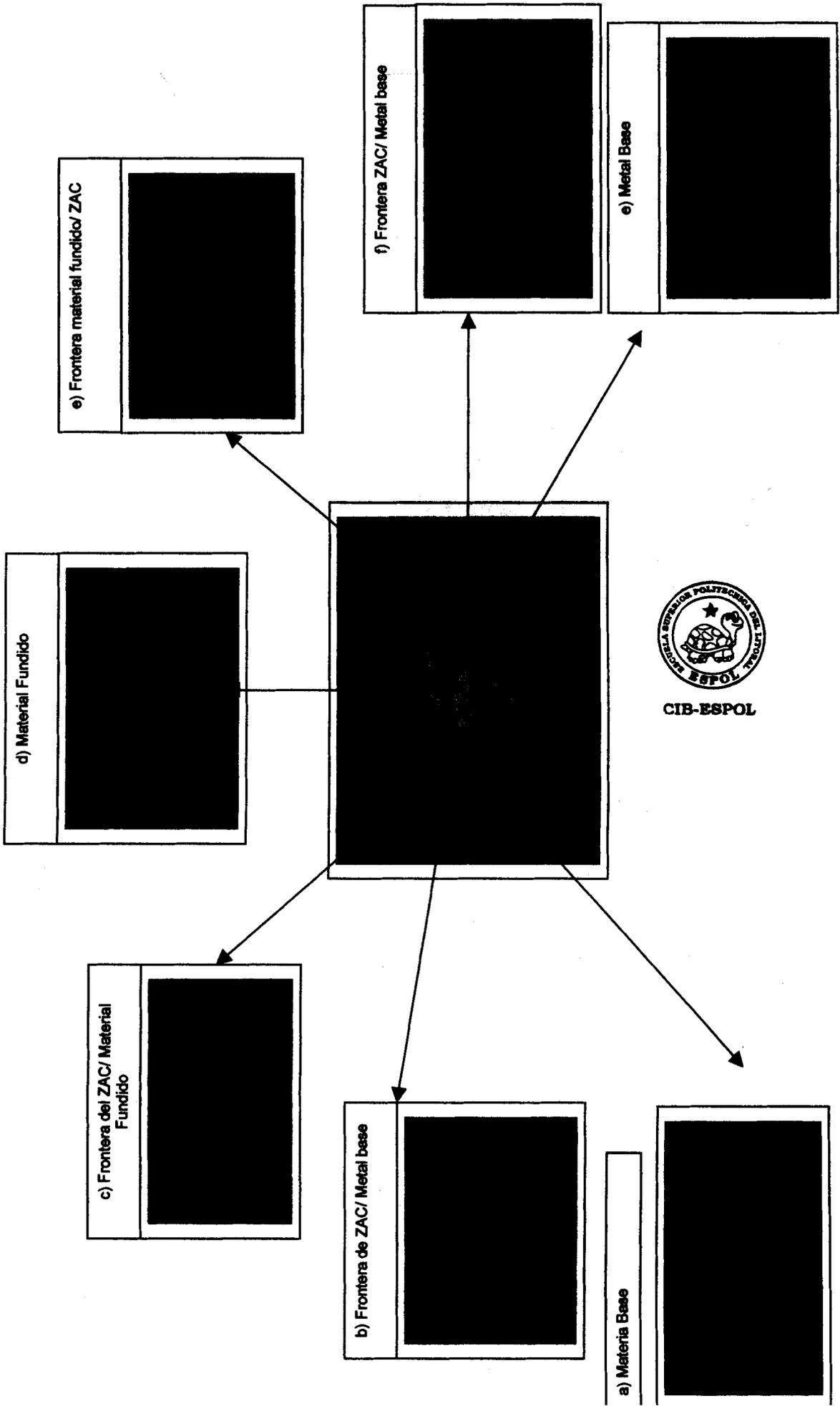


Figura 2.25. Micrografía de la muestra (Probeta 8), aumento de 800X

2.3.4 Dilución

La dilución es un parámetro que nos permite cuantificar el porcentaje de fusión, la superficie que se consigue en el proceso al depositar material de aporte sobre el material base da como resultado ciertas propiedades o dimensiones deseadas. Probablemente la única gran diferencia entre la soldadura de una junta y el material depositado es concerniente a la dilución. La figura 2.26 muestra la dilución como una función de la cantidad de metal base fundido C y B mientras que por otra parte esta la superficie del metal base adherido A. Entonces podemos concluir que las propiedades de la superficie del material son fuertemente influenciadas por la dilución.

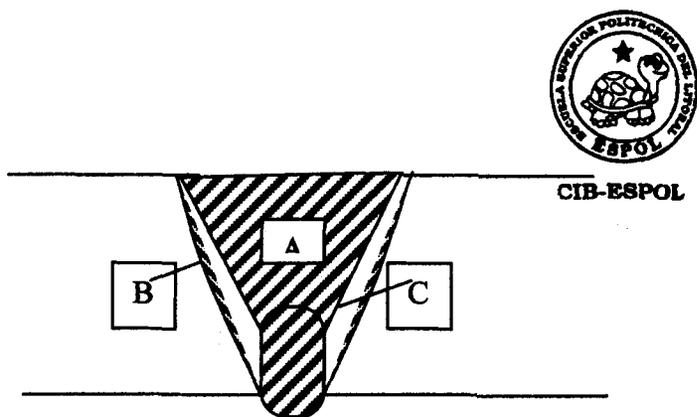


Figura 2.26 Dilución entre A -B y A-C

Es importante conocer el efecto de cada electrodo a utilizar así como también las variables de los parámetros de soldadura que afectan a la dilución.

Las dimensiones geométricas de los cordones de soldadura, tal como la penetración, el área del cordón fueron directamente obtenidas midiéndolas sobre cada una de las muestras.

En este caso por tratarse de una junta a tope con bisel entonces la fórmula para calcular la dilución sería la siguiente :

$$\text{DILUCIÓN} = (B+C)/(A+B+C)$$



CIB-ESPOL

Por otra parte el calor suministrado es calculado mediante la siguiente ecuación:

$H = \frac{V \cdot I}{S}$ donde; H es el calor suministrado (J/mm.)

S V es el voltaje (volt)

I es la corriente

S es la velocidad de soldadura

$$H = \frac{(\text{volt}) * (\text{amp})}{(\text{mm/seg})} = \frac{W * \text{seg}}{\text{mm}} = \frac{J}{\text{mm}}$$



CIB-ESPOL

La tabla 10 muestra los diferentes porcentaje de dilución de las diferentes probetas y estableciendo una relación entre esta última, el calor aportado y la zona afectada por el calor.

TABLA 11

PORCENTAJE DE DILUCIÓN Y CALOR APORTADO

No. Muestra	Dilución (%)	Calor (Joule /mm)
M5	35,5	1809,5
M7	30,4	1681,5
M8	39,7	1837,2

2.3.5 Ensayos de Tracción

Las tensiones normales son aquellas que tienden a separar dos secciones adyacentes y tienden a alcanzar un valor crítico para el cual se producen las decohesión del material, las tangenciales tienden a generar deslizamiento entre secciones.

Del estudio de la resistencia de los materiales se obtienen fórmulas y metodologías que permiten calcular en base al estado de cargas aplicadas, las tensiones correspondientes a cada punto, es decir el estado de tensiones del cuerpo. Luego para poder establecer la resistencia o no del cuerpo hace falta valores característicos del material para poder comparar las tensiones aplicadas al material con las que este puede soportar. Idéntico razonamiento en forma inversa se aplica para dimensionar una pieza.



CIB-ESPOL

El ensayo de tracción permite obtener para el material, entre otras características, la tensión normal máxima que soporta y fundamentalmente la tensión normal en que el material deja de comportarse elásticamente,

característica primordial en el cálculo basado en la resistencia de materiales. Pero además este ensayo permite determinar las principales características de un material: resistencia, comportamiento, ductilidad, fragilidad, alargamiento, estricción.

El esfuerzo de tracción es el más sencillo de aplicar a una probeta pues sólo se trata de aplicar una carga axial sobre la misma, obteniéndose la tensión correspondiente simplemente como el cociente entre la carga aplicada y la sección.

$$\delta = P/Q$$



CIB-ESPOL

Mediante este simple método se puede caracterizar a un material obteniéndose tensiones a características de su comportamiento que son aplicables a los cálculos correspondientes a cualquier sollicitación más compleja que involucre tensiones normales.

Características del Ensayo de Tracción

- Diagramas Carga - Alargamiento

El diagrama que se obtiene del ensayo de forma directa mediante un registrador X-Y lleva el registro de cargas en el eje vertical y el alargamiento en el eje horizontal. La correcta programación de las escalas del registrador permite obtener gráficos que detallen con claridad los comportamientos que más adelante se describen. Se obtienen generalmente sobre papel milimetrado para facilitar las determinaciones y cálculos posteriores.

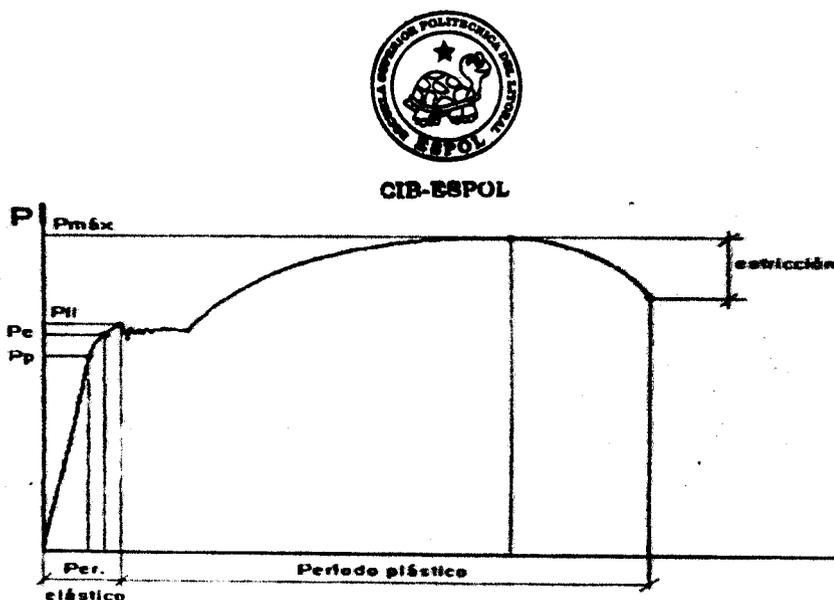


Figura 2.27 Diagrama Tensión - Deformación

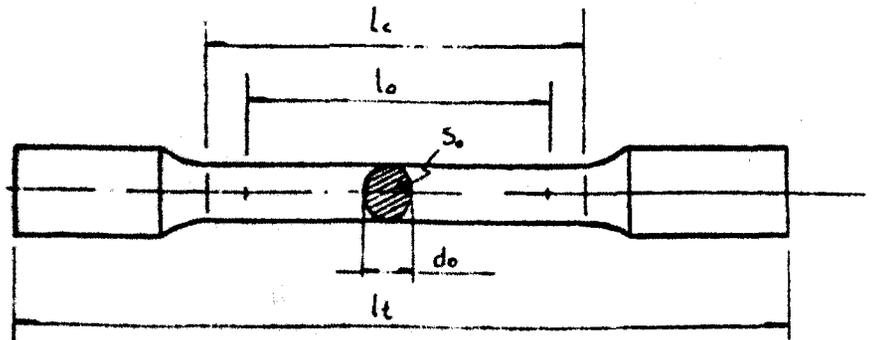


Figura 2.28 Geometría de Probeta

Donde:

l_c : Longitud calibrada

l_o : Longitud de referencia previa a ensayar

l_t : Longitud de referencia luego de la rotura



CIB-ESPOL

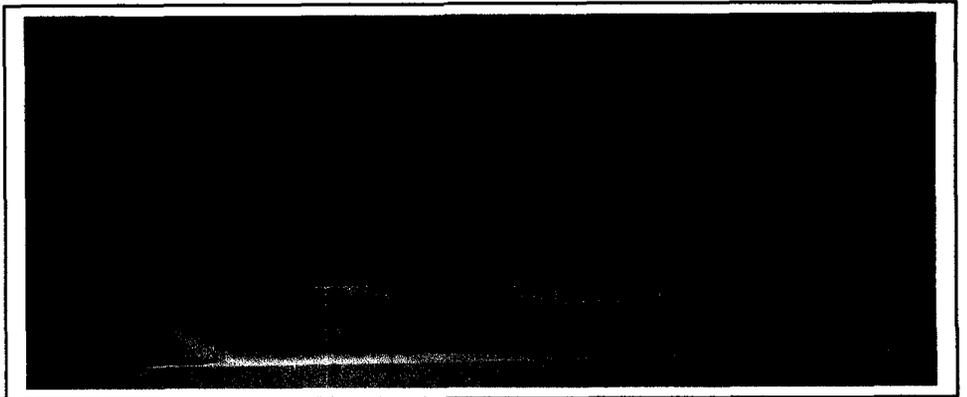


Figura 2.29 Muestra de tracción de probeta 5

TABLA 12

RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE TRACCION

Muestra	Espesor (pulg)	Ancho (pulg)	Area (Pulg²)	Carga Máxima (KN)	Fuerza (Lbf)	Esfuerzo máximo (PSI)	Porcentaje de elongación(%)
M5-1	0,35	0,79	0,28	79,11	17784,63	63744,08	22,1
M5-2	0,35	0,79	0,28	81,10	18232,00	65347,55	23,3
M7-1	0,35	0,79	0,28	80,60	18119,60	64944,67	21,7
M7-2	0,35	0,79	0,28	78,60	17664,98	63333,14	22,2
M8-1	0,35	0,79	0,28	79,90	17962,23	64380,63	23,2
M8-2	0,35	0,79	0,28	79,40	17849,83	63977,75	23,3

CIB-ESPOL



2.3.6 Ensayos de Doblado

Las muestras fueron obtenidas de la misma probeta, donde se obtuvieron los especímenes para los ensayos de tracción, el tipo de doblado de acuerdo a lo especificado por el código AWS D 3,6 M fueron de cara y de raíz



Figura 2.30 Muestra de doblado de probeta 5

A continuación en la tabla 11 se detallan los resultados de las pruebas de doblado en las muestras de las probetas # 5,7,8



TABLA 12B-ESPOL

RESULTADO DE ENSAYO DE DOBLADO

No. de muestra	Identificación de la probeta	Aceptación
5	Raíz 1	Aceptado
	Raíz 2	Aceptado
	Cara 1	Aceptado
	Cara 2	Aceptado
7	Raíz 1	Aceptado
	Raíz 2	Aceptado
	Cara 1	Aceptado
	Cara 2	Aceptado
8	Raíz 1	Aceptado
	Raíz 2	Aceptado
	Cara 1	Aceptado
	Cara 2	Aceptado



CIB-ESPOL

2.3.7 Ensayo de Dureza:

La dureza es la capacidad de un material de rayar a otro, sin ser rayado por este.

Un valor de dureza obtenido por cualquier método, no puede aplicarse directamente al diseño mecánico (como ocurre con la tensión límite), ya que no representa un significado intrínseco del material sino que solo permite establecer comparaciones de esta propiedad (siempre y cuando los valores hayan sido obtenidos, por el mismo método y bajo las mismas condiciones)

No es una propiedad fundamental sino que esta relacionada a las propiedades elásticas y plásticas del mismo. El tratamiento térmico de un material suele producir variación en su dureza. Los métodos más comunes para medir dureza, es por medio de un durómetro el mismo que esta bajo la escala Brinell o Rockwell, o ambas. En ambas escala se aplica un penetrador el cual es aplicado con una esfera dura o un diamante dependiendo de la escala. El penetrador es

aplicado en la superficie a la cual se mide la dureza mediante una carga estandarizada, la penetración es medida y luego se hace referencia con una tabla de dureza. Las muestras empleadas en la metalografía, son utilizadas en este ensayo realizando un barrido a cada una de las muestras es decir a la muestra 5, 7 y 8

Los valores son comparativos únicamente si corresponden a la misma escala, por lo tanto los resultados deben expresarse con la sigla correspondiente a la escala.



CIB-ESPOL

Los resultados obtenidos fueron en la escala Rockwell B, y se realizó un promedio de las zonas para obtener el gráfico de dureza con relación a las secciones de la muestras.

A continuación se muestran las tablas de los resultados del ensayo de dureza para las muestras soldadas

TABLA 14

RESULTADO DE ENSAYO DE DUREZA

Muestra de probeta 5

Sección	Dureza HRB
Material base	79,89
ZAC	89,00
Material de aporte	92,25



Muestra de probeta 7

Sección	Dureza HRB
Material base	75,06
ZAC	89,00
Material de aporte	93,25

CIB-ESPOL

Muestra de probeta 8

Sección	Dureza HRB
Material base	72,1
ZAC	79,05
Material de aporte	81,00

CAPITULO 3

3. ANALISIS DE RESULTADOS



CIB-ESPOL

En este capítulo, se procede entonces a analizar aquellos datos y resultados que se pudieron obtener en las 2 experiencias, por lo que se hará mucho énfasis en aquellos resultados obtenidos en la práctica de taller por ser esta última la que en mayor medida aporta con información para el desarrollo de este estudio.

El procedimiento a seguir para este análisis está basado en la comparación de datos y resultados de las diferentes probetas en función a los cambios efectuados a aquellas variables que los controlan. Para esto se requerirá en algunos casos de tablas que nos permitan elaborar

esta comparación, de igual manera se recurrirá a el uso de gráficos con la finalidad de que el lector puede entender de mejor manera las opiniones vertidas en esta parte del trabajo.

A continuación se detallan los análisis de resultados

Inspección visual de probetas ejecutadas en piscina

Las probetas ejecutadas en la práctica de piscina mostraron defectos fácilmente apreciables en cada una de ellas, que van desde socavaduras, sobremonta, falta de penetración, hasta una cantidad excesiva de cráteres en los cordones de soldadura que difícilmente pasarían cualquier criterio de aceptación de cualquier código de soldadura existente. Sin embargo y aunque la cantidad de defectos fue considerable, se notó una disminución de estos a medida que se fue desarrollando la práctica tal como se puede apreciar en la figura 3.1.

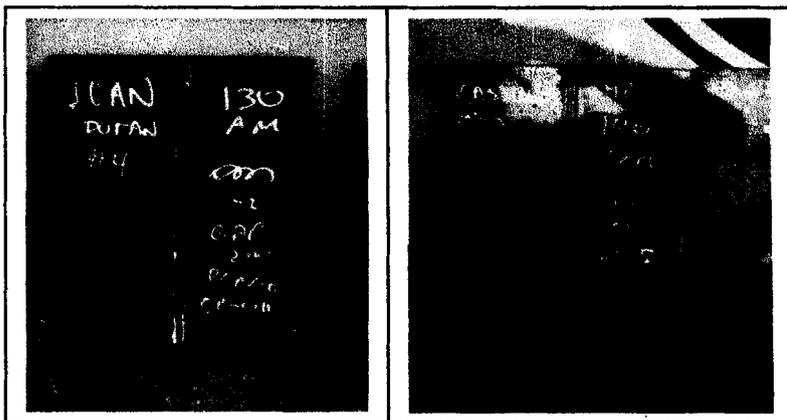


Figura 3.1 : Probetas de práctica en piscina (Inicio y Final)

Datos promedio de taller

En la tabla 15, que corresponde a los resultados promedios obtenidos de la práctica de taller, podemos apreciar que la corriente promedio utilizada para esta experiencia osciló entre 147 amperios a 158,3 amperios, de igual manera el voltaje varió entre 30 voltios a 31,5 voltios, por otra parte la velocidad de avance que puede ser considerada baja estuvo entre 2.4 mm/seg a 2.9 mm/seg .

TABLA 15

RESULTADOS PROMEDIO DE PRACTICA DE TALLER

Muestra	Corriente (amp)	Voltaje (voltios)	Energía de arco (joule/mm)	Velocidad de avance (mm/seg)
3	147	31	1759,6	2,7
4	140,3	30	1639,8	2,6
5	140,5	31	1809,5	2,4
6	149,3	32,3	1721,8	2,9
7	152,5	31,5	1681,5	2,9
8	158,3	31,3	1837,2	2,7

Inspección visual en probetas de taller

La soldadura presentes en la en las probetas realizadas en taller por el soldador, mostraron un mejor acabado que aquellas realizadas por el buzo en piscina tal como indica la figura 3.2



CIB-ESPOL

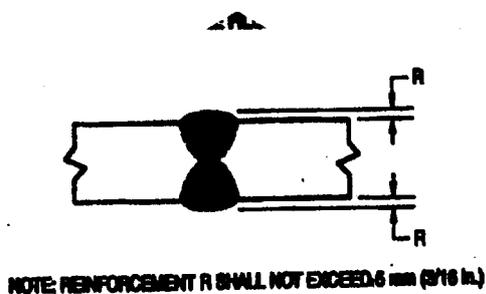


CIB-ESPOL

Figura 3.2: Probeta 7 ejecutada en taller

Las probetas ejecutadas en taller fueron sometida a una inspección visual en función al criterios de aceptación del código AWS D 3.6 M para la soldadura clase B como lo indica en el artículo 8.9 del código en mención. A continuación se detallan estos criterios de aceptación:

- Toda soldadura debe estar libre de cualquier fisura.
- Deberá existir completa fusión entre la soldadura adyacente al cordón y una total penetración entre el metal de soldadura y el metal base.
- Todo cráter deberá ser rellenado
- El perfil de la soldadura deberá ser acorde con la figura 3.3



CIB-ESPOL

Figura 3.3: Perfil de soldadura aceptado para junta a tope

- La suma de los diámetros de los poros, los cuales excedan los 1.5 mm, no deberán exceder los 10 mm en cualquier línea de 25mm de soldadura
- La socavadura no deberá exceder los 1.5 mm de profundidad con las siguientes excepciones. La socavadura térmica superior a 1.5 mm pero no mayor que 3 mm o el 20 por ciento del espesor del metal base en profundidad cualquiera sea menor, deberá ser permitido, si esta no excede los 10 mm de longitud y debe estar separada con un mínimo de 150 mm de la socavadura adyacente que es más profunda que 1.5 mm. La máxima socavadura entre 0.8 mm y 1.5mm en profundidad no debe exceder los 100 mm en cualquier soldadura continua de 300 mm. La socavadura menores a 0.8 mm de profundidad deben ser aceptadas fuera de restricción.
- Cuando la superficie de la raíz está presente y es accesible. Una junta con penetración incompleta está limitado a 3 mm máximo de

profundidad y 100 milímetros máximo de longitud en cualquier cordón continuo de 300 mm. En la soldadura clase B son frecuentemente utilizados para soldadura a filete y a tope los respaldos por lo tanto la superficie de raíz no puede ser vista.

Se procede entonces a la aceptación de las probetas de taller en función al los criterios antes indicados.



CIB-ESPOL

Inspección radiográfica:

De igual manera se utilizó el criterio de aceptación de para una inspección radiográfica de una soldadura clase B descrito en el presente código en el artículo 8.10 estos son:

- La soldadura debe estar libre de fisura.
- Los poros dispersos en un rango de tamaño de 1.5 mm de diámetro a 5 mm de diámetro no deberán exceder de 7 por línea de soldadura de 25 mm por 25 mm de espesor de soldadura.
- El máximo tamaño de poro no deberá exceder los 5 mm
- Los poros menores que 1.5 mm en diámetro no deberán tener restricciones en número.
- El máximo ancho de inclusión de escoria no deberá exceder los 3 mm.
- La máxima longitud de cualquier escoria no deberá exceder los 50 mm.

- El total de longitudes de inclusiones de escoria entre 0.8 mm y 3 mm de ancho deberán no exceder los 100 mm en cualquier soldadura continua de 300 mm.
- Las inclusiones de escoria adyacentes mayores que 0.8 mm de ancho deberán estar separadas por 5 mm mínimo.
- Una imagen de área que indique un inadecuado relleno en la raíz de la junta deberá no tener una densidad radiográfica mayor que la del metal base, y para este propósito, la máxima altura de la cara del refuerzo deberá no exceder los 3 mm, a menos que exista una aprobación especificada por el cliente.
- La máxima longitud continua de cualquier singular defecto deberá no exceder el espesor del material base, y la máxima longitud acumulación total de longitud de todos los defectos no deberán exceder los 100 mm en 300 mm de longitud de soldadura.
- El defecto de fusión incompleta que aparecen de manera continua de un cordón o pase a la siguiente son inaceptable sin considerar la longitud.
- La imagen de área que indique un rechufe en el cordón deberá no tener una densidad radiográfica mayor que la del metal base. Para el propósito de esta medida, la máxima cara de refuerzo deberá no exceder los 3 mm, a menos que sea especialmente aprobado por el cliente.



- La longitud total de la acumulación de las discontinuidades deberá no exceder los 100 mm en 300 mm de longitud de soldadura.

En la tabla 16 muestra la aceptación o rechazo de las probetas realizadas en taller en función de las películas radiográfica de este ensayo figura



TABLA 16
RESULTADOS DE LA INSPECCION RADIOGRÁFICA

No. de probeta	Tipo de defecto	Aceptado o Rechazado
Probeta 3	C	RECHAZADO
Probeta 4	C	RECHAZADO
Probeta 5	C	RECHAZADO
Probeta 6	C	RECHAZADO
Probeta 7	C	RECHAZADO
Probeta 8	C	RECHAZADO

Aa- Porosidad

Ab- Burbujas tubulares

Ba- Inclusiones de forma y orientación variada

C- Falta de fusión (falta de penetración)

F- Mordeduras o socavación



CIB-ESPOL

- En las probetas 3, 4 y 6 se puede apreciar una fusión incompleta a lo largo de todo el cordón de soldadura en forma de línea recta, no se logra apreciar ni poros, ni inclusiones de escoria.

- La probeta 5 muestra fusión incompleta en pequeños tramos al inicio de hasta 2 mm de ancho y poco antes de la terminación del cordón de soldadura de manera muy marcada la misma que tiene un comportamiento paralelo a la alineación de la junta, no se puede apreciar más defectos.

- En la probeta 7 se puede apreciar fusión incompleta muy delgada a partir de la mitad del cordón esta aparece y desaparece a la largo de la longitud restante, siguiendo un patrón perfectamente lineal y paralelo a la alineación de la junta, no se puede apreciar más defectos.

- La probeta 8 muestra un fusión incompleta de aproximadamente 23 mm de longitud y de 1,5mm de ancho a unos 360 mm de iniciado el cordón, a pocos milímetros después y poco antes de la terminación del cordón aparece una muy delgada falta de fusión perfectamente alineada con la junta de aproximadamente 30 mm de longitud.
- En función a estos resultados se decide entonces trabajar en los siguientes ensayos con las probetas 5, 7,8, para esto se procederá a obtener las muestras de aquellas partes que no evidenciaron defectos en las radiografías



CIB-ESPOL

Ensayo metalográfico:

Los ensayos metalográficos realizados a las muestras de las probetas 5,7,8 son sujetas al criterio de aceptación de el código en mención para la clase de soldadura tipo B. A continuación se las detalla.

- La escoria y la porosidad no deben exceder el 5% de la superficie del área , y la máxima dimensión de cualquier discontinuidad no deberá exceder de 2mm. Las indicaciones lineales de 1.5 mm y menores son aceptables cuando estas están asociadas con una raíz de penetración parcial y un respaldo en una junta a tope, la que será representada por una indicación linear separada por al menos 3 mm.

- En las figuras 2.22, 2.23 y 2.24 presentan en su corte transversal una buena fusión entre los pases de soldadura y al igual que con el material base, no se evidencia la presencia de algún tipo de discontinuidad por lo que el criterio de aceptación fue favorable para las tres muestras
- Se pudo apreciar un cambio muy marcado en la microestructura del material entre el material fundido, la zona afectada por el calor y el material de base tal como muestra la figura 2.25.



CIB-ESPOL

- En la región del metal fundido se pudo apreciar una microestructura muy fina de ferrita producto de la alta temperatura que alcanzó esta región.
- En la subregión de zona afectada por el calor pero muy cercana al material fundido se pudo apreciar un crecimiento de grano considerable producto de las altas temperaturas y velocidades de enfriamiento experimentadas.
- El material base mantiene su microestructura inalterable, lo que evidencia que la temperatura alcanzada nunca sobrepasó la menor temperatura de transformación .

Dilución y calor aportado:

- En lo que respecta al porcentaje de dilución en la tabla 11 se muestra en los valores alcanzado que este vario desde 39.7% a 30.4%, mientras que el calor aportado lo hizo desde 1837, 2 Joule /mm hasta 1681,5 Joule/mm.

- La aporte más alto correspondió a la probeta 8, la misma que poseía la corriente promedio más alta de 158,3 amperios y una velocidad de avance de 2,7 mm/seg.

- El aporte de calor más bajo, no correspondió a aquella probeta con la corriente promedio más baja de las tres con 152,5 amperios, pero si a la que poseía la velocidad de avance mayor es decir la probeta 7.

- Como se aprecia en la figura 3.4 los porcentajes de dilución fueron mayores en aquella muestra donde la probeta a la que correspondía experimentó un mayor aporte de calor esto es, en la probeta 8, de igual manera, el menor porcentaje de dilución correspondió a aquella muestra perteneciente a la probeta que soportó un menor aporte de calor es decir la probeta 7.



Ensayo de tracción:

- En los resultados de los ensayos de tracción de la tabla 12 se pudo observar que exactamente todas las muestras fallaron en el material base a un esfuerzo máximo entre 63333 psi a 65347 psi, todos estos esfuerzos mayores al del material base como lo es el ASTM A 516.
- Esto evidencia que las altas velocidades de enfriamiento al igual que las continuas extinciones del arco no mermaron de manera considerable la resistencia del material base.

Ensayo de doblado:

Los resultados de los ensayos de doblado fueron favorables es decir las muestras ensayadas no fallaron al momento del ensayo, no tampoco mostraron indicios de fisura tanto en la cara como en la raíz, tal como indica la tabla 13.

**CIB-ESPOL**

Dilución Vs Calor aportado

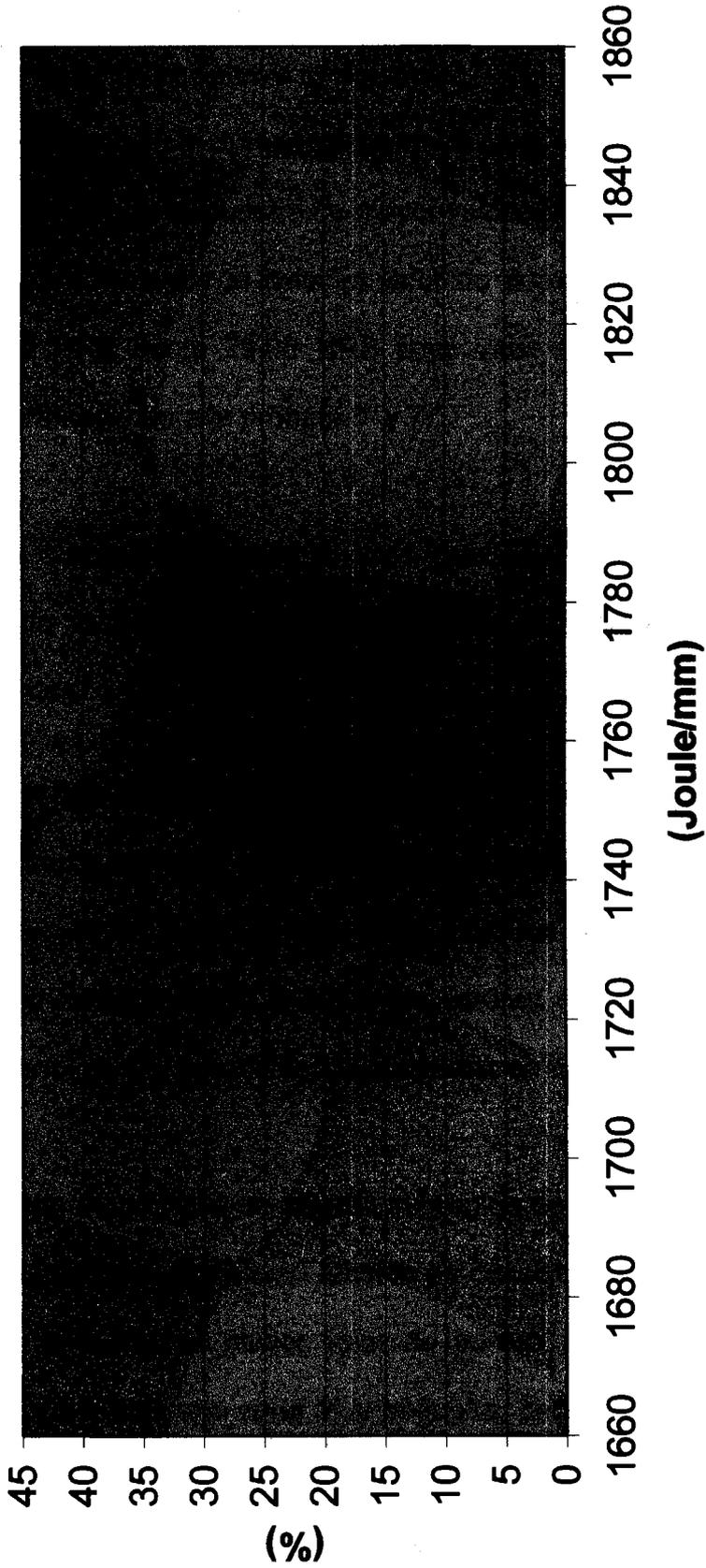


Figura 3.4 Dilución vs Calor aportado

Ensayo de dureza:**CIB-ESPOL**

Tal como indica la tabla 14 se aprecia lo siguiente:

- En el material fundido la dureza se mantuvo entre valores de 93,25 HRB hasta 81 HRB donde la muestra de mayor valor pertenece a la probeta 7
- En la zona afectada por el calor el valor de dureza se mantuvo en el rango de 89 HRB hasta 79,05 HRB cuyo valor mayor estuvo en la muestra perteneciente a la probeta 5 y 7.
- El valor de dureza en el material, varió desde 79,89 HRB hasta 75,06 HRB, siendo la de mayor valor aquella muestra perteneciente a la probeta número 5.
- En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se aprecia el comportamiento de la variación de la dureza con respecto a la región de la muestra, se observa que los mayores valores de dureza pertenecen a aquellos resultados obtenidos de la región fundida, luego le siguen los valores obtenidos en la zona afectada por el calor y por último los obtenidos en el material base.
- El crecimiento del tamaño en aquella subregión de la zona afectada por el calor más cercana al material fundido es considerable, es aquí donde se debería encontrar el mayor valor de dureza de las muestras, sin embargo por ser esta una zona muy pequeña, debemos asumir que los valores obtenidos de la zona afectada por el calor no corresponden a esta subregión.

Dureza Vs Sección Transversal de Junta

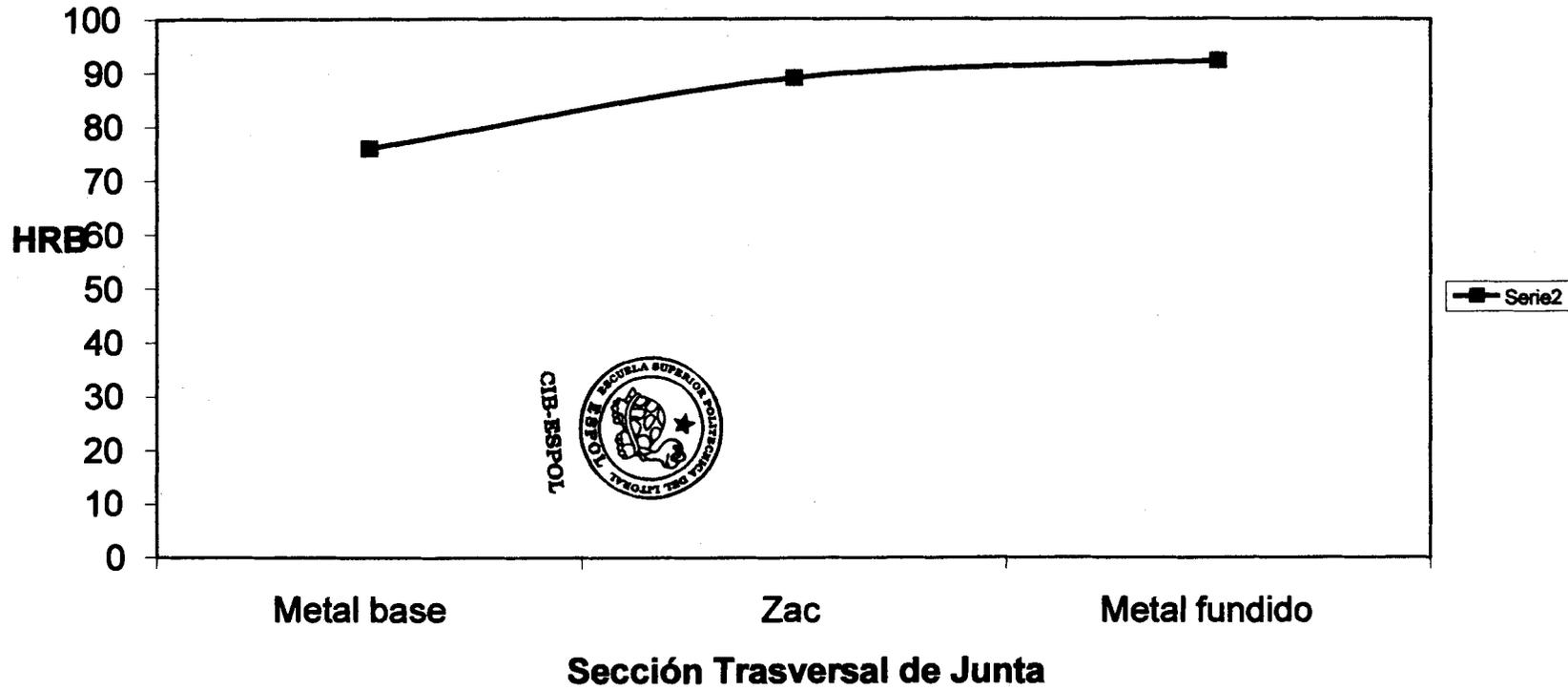


Figura 3.5: Dureza Vs Sección transversal de Junta (muestra de probeta 5)

Dureza Vs Sección Transversal de Junta

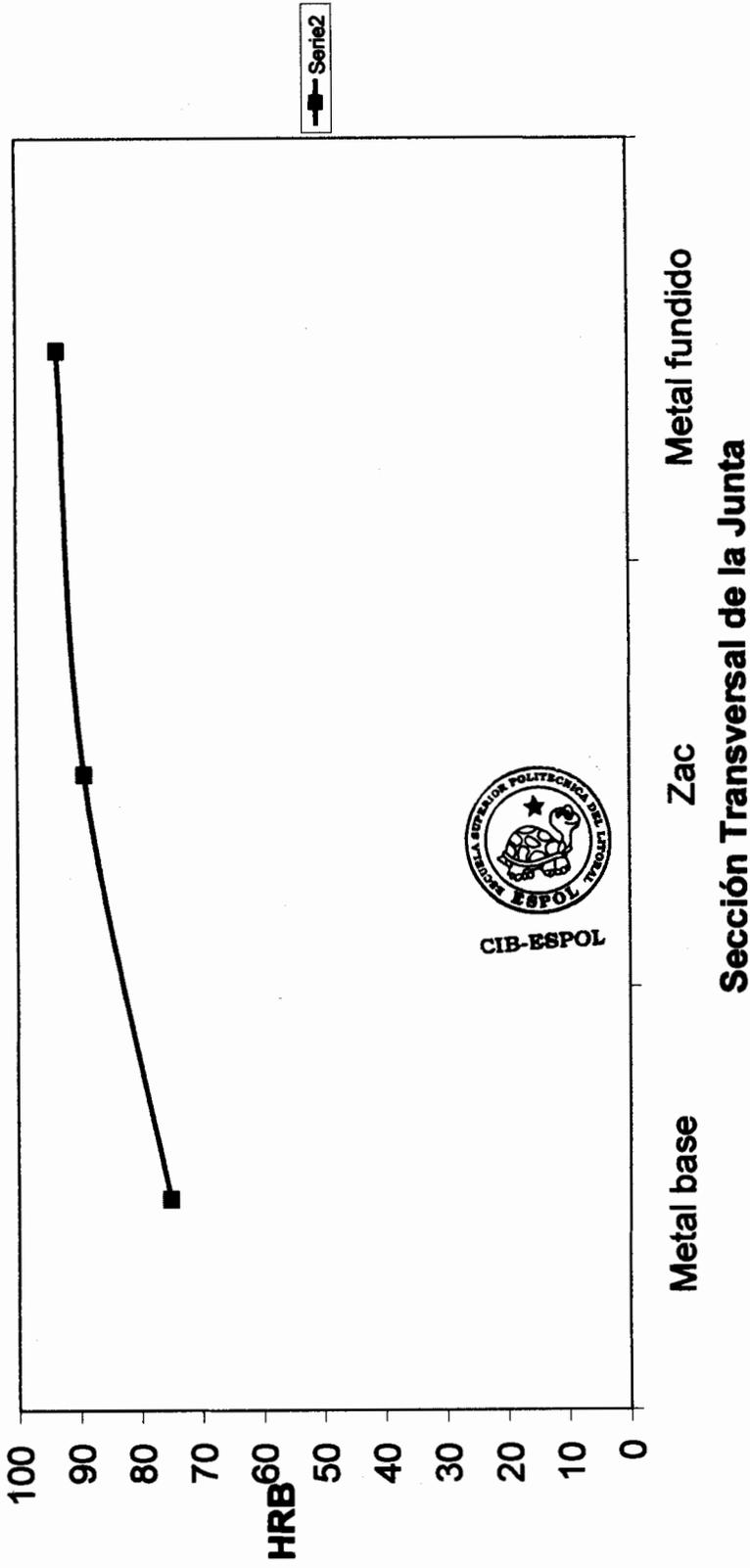


Figura 3.6: Dureza vs Sección Transversal de la Junta (muestra de probeta 7)

Dureza Vs Sección Transversal de la Junta

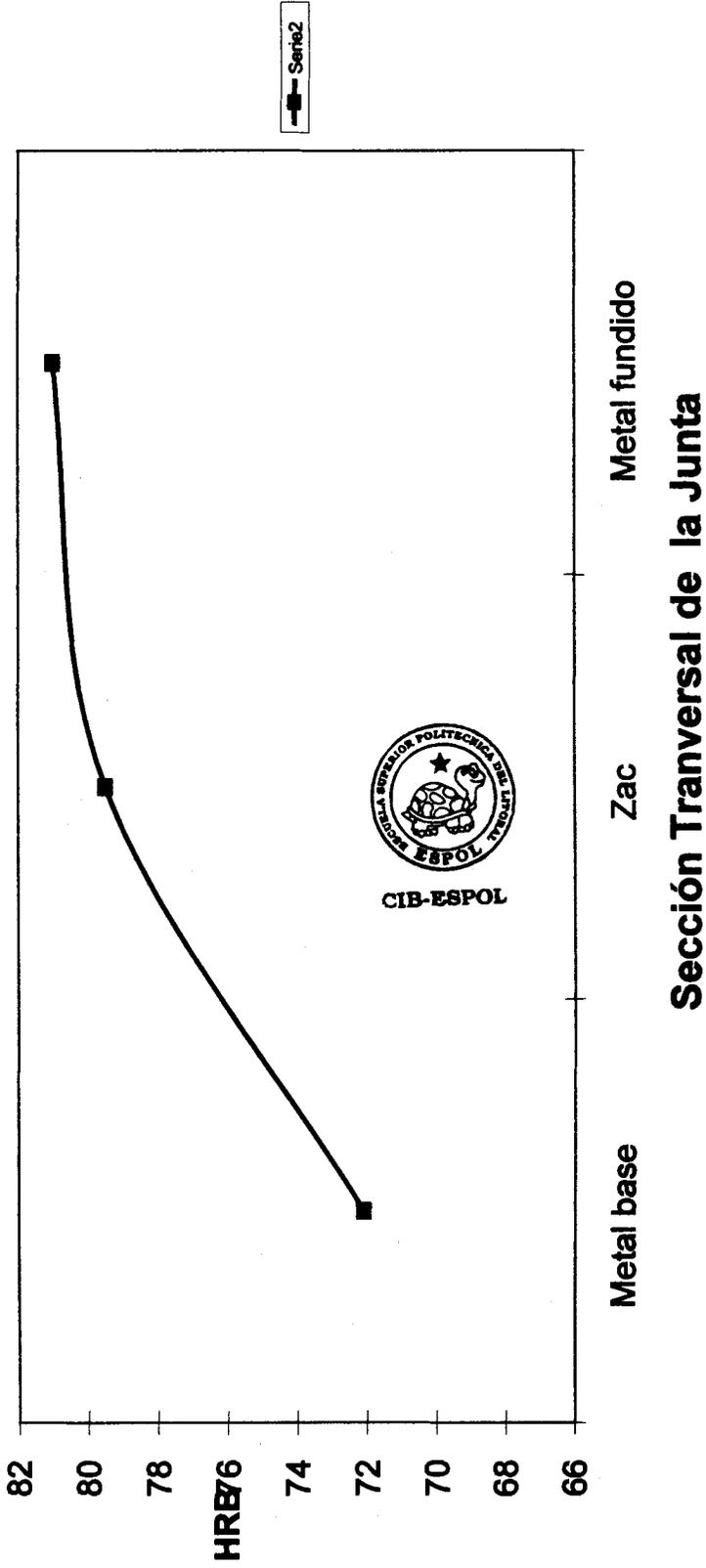


Figura 3.7: Dureza vs Sección Transversal de la Junta (muestra de probeta 8)

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye lo siguiente:



CIB-ESPOL

1. Aún en presencia de elevadas tasas de enfriamiento y en un medio como el agua, se consiguieron juntas soldadas en acero de bajo carbono sin que en ellas se formen microestructuras martensíticas.
2. Fue posible la ejecución de juntas soldadas con el proceso de electrodo revestido bajo el agua, eliminando por completo el principal defecto comúnmente encontrado en la soldadura húmeda y

responsable de su limitado desarrollo como lo es la fisura asistida por hidrógeno.

3. La poca fluidez del metal fundido en este medio y las rápidas extinciones causadas por el agua en el cordón de soldadura, provocó la falta de penetración en las juntas, lo que impidió la calificación de la soldadura clase B de acuerdo con el código AWS D3.6 M.
4. Una adecuada selección de los parámetros eléctricos, apropiado diseño de junta, y una velocidad de avance lenta, son importantes para garantizar el aporte de calor requerido en presencia de las altas velocidades de enfriamiento, de tal forma de conseguir una soldadura con buena penetración
5. Considerando la poca preparación del soldador y tomando en cuenta los resultados favorables en la mayoría de los ensayos realizados; se rompe el paradigma de asociar a la soldadura húmeda, con una soldadura pobre y deficiente, esto crea interesantes expectativas para el desarrollo de la soldadura húmeda en nuestro país tanto en el campo petrolero como en el sector naval.



CIB-ESPOL

A continuación las recomendaciones:

1. Es importante realizar una experiencia previa en superficie con el buzo /soldador que piensa ejecutar el trabajo en el mar como una medida de seguridad y de adiestramiento, procurando en lo posible trabajar con los mismos parámetros o condiciones con los que se va a trabajar bajo el agua.
2. Es recomendable utilizar una longitud de arco menor al diámetro del electrodo para asegurar una estabilidad en el arco de soldadura.
3. Dependiendo de la posición de soldadura a ejecutar hay que considerar la posibilidad de contener de manera temporal la respiración mientras se tiene el arco abierto, ya que la respiración normal del buzo genera también burbujas que pueden causar turbulencia o impedir la adecuada visibilidad al soldador; salvo que se cuente con equipo militar destinado a no producir burbujeo.
4. En caso de requerir de una técnica de oscilación esta debe ser lo más pequeña posible y deberá ser aún menor cuando las corrientes marinas sean considerables.

5. Hay que considerar que a mayores profundidades el arco de soldadura cambia su comportamiento a medida que esta aumenta el arco de soldadura se reduce y los electrodos rinden menos lo que provocará seguramente mayor cantidad de paradas y reinicios de arco y por ende mayor probabilidad de defectos en la soldadura.

6. La abertura de raíz en la junta en muchos casos es la única guía que tiene el buzo soldador, esta debe permanecer a la vista para evitar que el cordón de soldadura se salga de la junta. Sin embargo esta abertura no se recomienda sea mayor a 2mm para un diámetro de electrodo de 3.25 mm, por la dificultad de poder mantener un arco estable.

7. Se recomienda para juntas a tope con bisel, reducir el bisel a lo mínimo posible acorde con del diámetro del electrodo como se lo hizo en la práctica de taller, esto hará disminuir considerablemente la oscilación del electrodo tan perjudicial en la soldadura húmeda.

8. Se recomienda la correcta preparación de la junta para la soldadura húmeda orientada a facilitar el ingreso del metal fundido, considerando que un medio como el agua le resta fluidez al charco de soldadura,

este aspecto es esencial para reducir los problemas de falta de penetración en la junta.

9. Los parámetros de soldadura deben ser cuidadosamente seleccionados, estos deben establecer un buen arco de soldadura y el calor suficiente para que el metal fundido no se extinga rápidamente aún a velocidades de enfriamiento altas.



CIB-ESPOL

10. La habilidad del soldador es fundamental para el éxito de la soldadura húmeda, es necesario que el buzo como mínimo cumpla con los requerimientos de una calificación en superficie. Hay que considerar que las condiciones bajo el agua para ejecutar una soldadura son siempre más adversas que las realizadas en superficie, de ahí la importancia de la técnica adecuada, destreza y experiencia que posea el personal que la ejecuta.

11. Se recomienda que este trabajo sirva de base para una futura experiencia orientada a la calificación de un procedimiento de soldadura (clase B) de acuerdo al código AWS D 3.6 M

APÉNDICE



CIB-ESPOL

Table 8.1
Weld Procedure Qualification—Number and Type of Test Specimens for Class B Welds⁽¹⁾

Coupon	Joint Type	Coupon Thickness mm (in.)	Visual (Sec 6.9)	Radio- graphic ⁽⁴⁾ (Sec 6.12)	Reduced Section Tension (Sec 5.11.1)	Fillet Weld Shear (Sec 5.11.8)	Bends ⁽²⁾ (Sec 5.11.3)		Macroetch Test (Sec 5.11.2)	Charpy Impact ⁽⁵⁾ (Sec 5.11.5)	Fillet Weld Break (Sec 5.11.7)
							Root and Face	Side			
Plate	Groove	T ≤ 10 (3/8)	Yes	Yes	2	0	2 each	0	1	WM and HAZ	0
		10 (3/8) < T < 20 (3/4)	Yes	Yes	2	0	2 each	or 4	1	WM and HAZ	0
		T ≥ 20 (3/4)	Yes	Yes	2	0	0	4	1	WM and HAZ	0
Pipe	Groove	T ≤ 10 (3/8)	Yes	Yes	2	0	2 each	0	1	WM and HAZ	0
		10 (3/8) < T < 20 (3/4)	Yes	Yes	2	0	2 each	or 4	1	WM and HAZ	0
		T ≥ 20 (3/4)	Yes	Yes	2	0	0	4	1	WM and HAZ	0
Plate	Fillet	All ⁽³⁾	Yes	No	0	1	0	0	2 ⁽⁶⁾	WM	1 ⁽⁶⁾
Pipe	Fillet	All ⁽³⁾	Yes	No	0	1	0	0	4 ⁽⁶⁾	WM	4 ⁽⁶⁾

Notes:

1. First position only. Qualification for additional positions will omit groove weld tension, macroetch, and fillet weld shear strength tests.
2. For plate or pipe between 10 mm (3/8 in.) and 20 mm (3/4 in.) thick, the Customer may specify either two root and two face bend tests or four side bend tests.
3. Multiple-pass fillet welds are considered qualified by groove weld qualification (5.9.2).
4. Groove welds only are radiographed.
5. Vickers Hardness and Charpy Impact test not applicable to austenitic stainless steel base metal.
6. For single-pass welds the qualification weld size shall be the maximum size to be performed in production. For multiple-pass welds, the qualification shall be the minimum to be welded in production.
7. WM = Weld Metal; HAZ = Heat-Affected-Zone.



BIBLIOGRAFÍA



CIB-ESPOL

1. Corte y Soldadura Subacuática (1^{ra} Edición) pp.1-5, 46-47, 52-56,61,68-69.
2. Técnica y práctica de la soldadura (versión en español) (5^{ta}. Edición Barcelona : American Technical Society, 1981), pp. 72-78.
3. Profesional Diver's Manual on Wet – Welding. (The Welding Institute; England) pp. 9-10, 13,16, 21-22,2, 33-37.
4. Welding Metallurgy. Volumen I (4ta edición; Estados Unidos) pp. 68-73
5. Specification for Underwater Welding AWS D 3.6 M : 1999 , Miami pp. 14,15,16,74,81,82,83
6. Welding Handbook (Material and Application part 2, 8va Edición pp. 2-20
7. Manual de Buceo Deportivo (Infantería de Marina), pp. 5-11

8. Ciencia de Materiales Selección y Diseño (1^{ra} Edición; México 2001)
pp. 140-144.

9. Mecanismo de Fisuración en soldadura (Instituto Argentino de Siderurgia) pp. 1,2,3,4.

10. Metalurgia de la soldadura (Instituto Argentino de Siderurgia) pp. 1,2

11. The procedure Hambook of Arc Welding. Sección 6 (14^{ava} Edición;
Cleveland: Lincoln Electric) .pp1-30



CIB-ESPOL