

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS.



*Facultad de Ingeniería Mecánica*



*Trabajo de Diploma*

*Título:* Estudio de perfiles de microdureza en depósitos de soldadura subacuática.

*Autor:* José Alberto Gómez Machado

*Tutor:* **Dr.** Alejandro Duffus Scott

**Curso: 2008-2009.**



## *Pensamiento*

**Ves cosas y dices. ¿Por qué?. Pero yo sueño cosas que nunca fueron y digo. ¿Por qué no?'**

*George Bernard Shaw*

## *Dedicatoria*

A toda mi familia, los cuales me han dado mucha fuerza para seguir adelante en cada momento sin importar como, pero con su cariño incondicional, lo cual es lo más importante para lograr triunfar en la vida.

En especial a esos que han tenido que soportarme más: mi mamá, mi papá, mi hermana y mi abuelita querida que es mi mamá de más experiencia.

Para todos ellos gracias por haber estado allí.



## *Agradecimientos*

Le doy gracias a todas mis amistades de la universidad en especial a los de la carrera de Ingeniería Mecánica de los cuales aprendí mucho y pude sentirme parte de un colectivo de estudiantes excelentes.

A todo el claustro de profesores y en especial a los del departamento de soldadura por la formación que me han brindado.

A mi tutor el Dr. Alejandro Duffus Scott por el apoyo que me ha brindado durante toda la carrera no solo en el área investigativa sino también en mi formación como profesional.

## **Resumen**

La soldadura subacuática mojada, empleando el proceso manual con electrodo revestido (SMAW), es actualmente la técnica más empleada para realizar trabajos de reparación en condiciones subacuáticas mojadas, debido a las características de maniobrabilidad propias de la técnica (tecnología). A partir de la realización del ensayo de microdureza para una soldadura subacuática a 50 metros de profundidad, con varias muestras del mismo material pero con diferentes recubrimientos, se logran obtener una serie de resultados, relacionados con los diferentes valores de microdureza en la ZAC, los cuales permiten delimitar con mayor exactitud cada una de las regiones de la ZAC. En la zona de granos gruesos se alcanzan altos valores de microdureza por encima de los 500 Hv, lo cual es producto de la formación de una estructura martensítica. Con los perfiles de microdureza y la ecuación de Hall Petch se establece una relación, la cual permite comprobar el comportamiento de la dureza en toda la ZAC.

## **Summary**

Underwater wet welding, using the manual process with coated electrode (SMAW), is currently the most widely used technique to perform repair work on underwater wet conditions due to the handling characteristics of the technique itself (technology). Since the test of microhardness for underwater welding to 50 meters deep, with several samples of the same material but with a different coating is to obtain a series of results related to the different values of microhardness in the HAZ, the allowing more precise delineation of the regions of the HAZ. In the coarse grain area is reached high values of microhardness above 500 Hv which is a product of the formation of a martensitic structure. With the profiles of microhardness and Hall Petch equation establishing a relationship which shows the behavior of the hardness across the HAZ.

## ÍNDICE

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I. Marco Teórico.....</b>	<b>7</b>
1.1-Introducción.....	7
1.2 Breve reseña histórica de la soldadura subacuática. ....	7
1.3. Conceptos generales. ....	9
1.4. Características de la soldadura húmeda subacuática. ....	10
1.5. Aplicaciones.....	11
1.6. Conclusiones parciales.....	12
<b>Capitulo II Materiales y métodos .....</b>	<b>13</b>
2.1. Introducción.....	13
2.2. Materiales utilizados.....	13
2.3. Realización de los depósitos.....	14
2.4. Caracterización de los depósitos.....	15
2.4.1. Preparación metalográfica de los depósitos.....	15
2.4.2. Caracterización metalográfica y normas utilizadas.....	15
2.4.3. Características técnicas de equipos, instrumentos e instalaciones..	16
2.5. Ensayo de microdureza.....	16
2.5.1. Determinación de la ZAC para las muestras utilizando el	
Microscopio Metalográfico.....	19
2.5.2. Determinación de la microdureza y la distancia según la ZAC.....	21
2.5.3. Determinación de la ZAC mediante el análisis gráfico de los perfiles	
de microdureza y establecer una comparación con la determinada en el	
Microscopio Metalográfico.....	27
2.6. Conclusiones parciales.....	27
<b>Capitulo. III. Análisis y discusión de los resultados .....</b>	<b>28</b>
3.1 Introducción.....	28
3.2 Composición química.....	28
3.3. Caracterización microestructural.....	29
3.4. Ensayos de microdureza.....	32
3.5. Teoría de Errores para las dos formas de obtención de la ZAC.....	37
3.6. Conclusiones parciales.....	38
<b>Conclusiones .....</b>	<b>39</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>40</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>41</b>

## Introducción

La soldadura subacuática mojada fue considerada durante muchos años como una técnica dedicada a dar solución inmediata a las averías que se presentaban en buques e instalaciones sumergidas. No obstante debido a las grandes ventajas, que ofrece, desde el punto de vista económico fundamentalmente, su campo de aplicación se ha extendido grandemente. Los primeros reportes de aplicación de la soldadura subacuática mojada datan de la Primera Gran Guerra, cuando la Marina Británica la utilizó para reparar naves de guerra. Hasta la fecha muchos han sido los consumibles evaluados y aplicados durante estas operaciones [1].

La soldadura húmeda subacuática se hace sin ningún cerramiento sobrepresionado, en contacto directo con el agua. Se usa el proceso por arco protegido, también se le conoce como “por electrodo”. Se produce por el calor de un arco eléctrico entre un electrodo metálico revestido con fundente, un material resistente al agua y la pieza de trabajo. En el centro del arco un intenso calor hace que el gas plasma ionizado conduzca electricidad entre el electrodo y el material base, causando una reacción química entre los componentes del revestimiento fundente, el metal base y el ambiente acuático. Esa reacción produce desprendimiento de gases, estos crean un ambiente gaseoso que sostiene el arco y protege la soldadura fusionada de la contaminación de la atmósfera ambiental.

Muchos investigadores en el campo de la soldadura han estudiado con rigor la porosidad en la soldadura subacuática mojada [2, 3, 4,5], el cual es uno de los defectos de este proceso. Sin embargo el agrietamiento en los depósitos de soldadura y en la zona afectada por el calor, se han estudiado menos, lo cual se podrá observar a partir de los ensayos de microdureza. El criterio básico de la calidad de una unión soldada es su resistencia al agrietamiento. También este aspecto constituye un índice de soldabilidad del material.

La versatilidad, velocidad y bajo costo de la soldadura húmeda hacen que este proceso se utilice mucho para soldaduras bajo el agua cuando la calidad promedio es aceptable. Se realiza sin dispositivos especiales.

En los lugares donde las necesidades de reparación son mayores, en áreas de agua salada, el éxito de la soldadura húmeda aumenta enormemente ya que cuanto más alta es la salinidad de las aguas, mayor es la estabilidad del método de soldadura húmeda. Las sales disueltas en el agua aumentan sus cualidades electrolíticas, permitiendo de este modo un arco más caliente y una soldadura más eficiente.

Los equipos utilizados en la soldadura subacuática deben ser proyectados de acuerdo con el ambiente de trabajo. El operador, normalmente debe utilizar equipo completo para inmersión. El casco debe ser equipado con lentes para soldadura, cuyos números van de 6 a 8. Los guantes deben ser de goma, para evitar el choque eléctrico.



**Figura 1:** Soldaduras realizadas en condiciones subacuáticas mojadas, en diferentes posiciones.

Los propietarios de instalaciones marinas saben por experiencia que la soldadura realizada por buzos en contacto con el agua ofrece una deficiente calidad desde el punto de vista metalúrgico.

Hace unas décadas atrás parecería absurdo o improductivo aplicar una soldadura bajo el agua pero en los últimos años los procesos de Corte y Soldadura Subacuáticos han mejorado sin duda, drásticamente la calidad de las tareas hechas por los buzos;

este progreso potencial permitió llevar adelante proyectos subacuáticos que en el pasado, no hubieran podido ser considerados. Con la llegada de nuevos electrodos [9,10], y el desarrollo de modernas técnicas, combinadas con equipos de última generación y fuentes de energía, en la actualidad se pueden realizar cortes y soldaduras que, analizadas con sistemas de rayos X, presentan una calidad comparable a las que puedan realizarse en superficie. En países como Estados Unidos y Canadá se dictan permanentemente cursos de entrenamiento intensivo para buzos comerciales, a cargo de personal altamente capacitado y experimentado.

### **Ventajas y desventajas de la soldadura subacuática mojada.**

Las principales ventajas de la soldadura subacuática en ambiente húmedo están directamente relacionadas con: la disminución de los costos económicos de estas tareas, ya que son muy bajos en comparación con las otras formas de realización de estas operaciones de montaje, reparación o mantenimiento y la capacidad de resolver tareas con la mayor inmediatez posible, lo cual es determinante a la hora de salvar vidas humanas, así como evitar grandes contaminaciones que puedan afectar el ecosistema marino.

La calidad deficiente de estas soldaduras se debe al problema de la transferencia de calor, la visibilidad del soldador y la presencia de hidrógeno en la atmósfera del arco. Cuando el metal base y la zona del arco están completamente rodeados de agua, no hay en la unión acumulación de calor y aumento de la temperatura del metal base. La alta temperatura, reduce la calidad del metal de soldadura. La zona del arco está compuesta por una alta concentración de vapor de agua. La atmósfera del arco, de hidrógeno y oxígeno del vapor de agua, queda absorbida en el metal fundido de la soldadura y contribuye a la porosidad y a la fractura por hidrógeno.

Además, las soldaduras que trabajan bajo el agua están limitadas en su capacidad para ver manipular el arco de soldar. Bajo condiciones ideales, las soldaduras producidas en ambientes húmedos con electrodos cubiertos, son marginales. Pueden usarse durante cortos períodos, pero se deben sustituir con soldaduras de buena

calidad tan rápidamente como sea posible. Se han hecho esfuerzos para producir una burbuja de gas dentro de la que se pueda hacer la soldadura. Esta técnica no ha podido asegurar soldaduras de buena calidad con electrodos cubiertos en ambiente húmedo.

La calidad de las soldaduras realizadas en condiciones subacuáticas disminuye en la medida en que aumenta la profundidad a la cual se realiza, aumentando la cantidad de poros y grietas, lo que favorece la disminución de las propiedades mecánicas de los cordones realizados.

### **Clasificación de las soldaduras subacuáticas de acuerdo a los requisitos de calidad.**

Existen tres tipos de soldadura subacuática: las soldaduras del tipo A son para aplicaciones estructurales, hechas de acuerdo con procesos calificados. Las soldaduras del tipo B son definidas como un conjunto mecánico intermedio, teniendo limitada aplicación estructural. Las soldaduras del tipo C son de menor calidad y se utilizan en aplicaciones donde las exigencias estructurales no son críticas y deben ser libres de grietas.

De un modo general todos los tipos de soldaduras subacuáticas deben alcanzar requisitos de calidad especificados por la norma ANSI/AWS D3.6. El metal base debe ser libre de puntos de corrosión y otras discontinuidades que puedan afectar la calidad o la resistencia mecánica de la soldadura. En la reparación de discontinuidades excesivas, tales como: inclusiones de escorias o inclusiones refractarias; producto de desoxidación, porosidad o cavidades, la cantidad de material removido debe ser la mínima necesaria. Las grietas laminares pueden ser reparadas con algunas condiciones específicas.

### **Identificación del problema.**

Durante la aplicación de la soldadura subacuática tanto en buques como en plataformas petroleras se han estado confrontando problemas que ocasionan pérdidas económicas debido a la formación de grietas y poros.

Los problemas que se presentan en el proceso de soldadura subacuática están relacionados directamente con una serie de factores:

❖ Tipo de revestimiento que se utiliza en el electrodo.

Recientemente se han realizado propuestas encaminadas a realizar adiciones de componentes capaces de influir sobre las características del depósito a partir de la incorporación de elementos modificadores en el interior de la capa de impermeabilizante del electrodo [9,10]. Este procedimiento consiste en la incorporación de una mezcla pirometalúrgica exotérmica con la primera capa de barniz impermeabilizante, la cual es capaz de aportar elementos que en un primer momento reaccionan con el hidrógeno presente en la burbuja de gas, generándose en un segundo momento elementos desoxidantes los que contribuyen a reducir el contenido de oxígeno en el depósito. Además, todo el proceso se desarrolla con un importante aporte calórico al medio, lo cual también favorece el proceso de soldadura. Hasta el momento se han aplicado gran variedad de revestimientos obteniéndose buenos resultados con el E7024 recubierto con una capa de barniz modificada.

❖ Tipo de material

Lleva consigo un análisis cuidadoso ya que para aceros de diferentes tipos, como son los aceros al carbono y los aceros inoxidable, el procedimiento no es el mismo ya que su composición química y sus propiedades son diferentes.

❖ Formación de hidrógeno

Producto a este surge el agrietamiento inducido por hidrógeno que está caracterizado por un tiempo de incubación de la grieta en formación, la temperatura y el punto de ocurrencia. Este fenómeno ocurre en un rango de temperaturas entre -50 a 150 °C en la ZAC, o en el metal de la costura, en los aceros después de algunas horas de terminarse la soldadura[6]. El agrietamiento inducido por hidrógeno, es uno de los grandes problemas asociado al proceso de la soldadura subacuática mojada[7].

- ❖ La eficiencia en el proceso.

Se hace extremadamente baja debido a que de la energía suministrada se pierde una gran cantidad en lograr el calentamiento necesario del agua.

### **Problema a resolver:**

A partir del análisis de perfiles de microdureza, se puede identificar las diferentes partes de la zona afectada por el calor (ZAC) y comparar los valores de microdureza con los reportados en la literatura.

### **La hipótesis del trabajo es:**

Si se tienen los perfiles de microdureza en los depósitos de soldadura subacuática, se puede inferir el comportamiento de la ZAC, con vista a lograr un mejoramiento de las propiedades de los depósitos.

La solución de los problemas antes descritos y los planteamientos que se recogen en la hipótesis permiten establecer que el **objetivo general de este trabajo es:**

- ❖ Determinar experimentalmente los perfiles de microdureza en depósitos de soldadura subacuática.

### **Objetivos específicos.**

- ❖ Estudiar el ensayo de microdureza en depósitos de soldadura subacuática.
- ❖ Discutir los resultados de microdureza obtenidos según las diversas zonas a partir de los perfiles obtenidos.

### **Método general de investigación empleado.**

El método utilizado para la elaboración del proyecto parte del análisis sobre los métodos y procedimientos teóricos-prácticos de los perfiles de microdureza en soldaduras subacuáticas, sobre la base de las técnicas de avanzada en esta rama que se encuentran al alcance, de las experiencias de países desarrollados y en vías de desarrollo; así como la experiencia de profesores cubanos en el tema.

## Capítulo I. Marco Teórico

### **1.1-Introducción.**

En este Capítulo se resumen una serie de informaciones teóricas necesarias para el mayor entendimiento de la soldadura subacuática mojada, además se realiza una breve descripción de la evolución de la misma con el paso del tiempo, que como todo en nuestro planeta ha sufrido importantes modificaciones, que la han llevado a convertirse en una de las formas de soldadura más necesaria. También se abordan una serie de conceptos básicos, características específicas de la misma y aplicaciones fundamentales en las cuales se emplean mayoritariamente dicho proceso.

### **1.2 Breve reseña histórica de la soldadura subacuática.**

Las primeras operaciones de corte subacuático se realizaron en el año 1908, usando un soplete común de corte de superficie, pero se pudo comprobar que no daba resultados satisfactorios. El soplete tropezaba con resistencias bajo el agua y esto hacía dificultoso el precalentamiento de la pieza. Años más tarde se descubrió que la estabilidad del soplete podía mantenerse haciendo funcionar la combustión dentro de una cámara cerrada provista de un conducto especial por medio del cual se expelían los gases de combustión. El primer uso efectivo del proceso de corte submarino fue en 1926, en el sabotaje de un submarino S-51 norteamericano hundido a 43 metros de profundidad, se ideó un soplete oxhídrico que cortaba con éxito: cables, pernos sueltos y chapas, utilizado por Edward Ellsberg, demostrando así que por primera vez se utilizaba un corte submarino en profundidades mayores a los 10 metros.

El método de corte submarino con soplete de arco - oxígeno usaba originalmente electrodos de carbón a través de los cuales fluía oxígeno y corriente eléctrica. Con anterioridad a la Segunda Guerra Mundial fue muy poco el desarrollo de equipos y electrodos logrados, por lo que se generalizó el corte con soplete oxhídrico como método de trabajo. Fue sólo hasta comienzos de 1942 que las fuerzas navales iniciaron un extenso programa de

perfeccionamiento del proceso arco – oxígeno, para enfrentar las demandas que imponía la guerra.

Esto dió como resultado la producción de sopletes, antorchas y electrodos perfeccionados, la amplificación y uniformidad de la técnica operatoria y el aumento en la seguridad del proceso así como un mayor rendimiento en las operaciones.

La soldadura subacuática húmeda siempre ha sido vista pobre en relación con las soldaduras secas realizadas en la superficie. Pero en contradicción con esto, la soldadura húmeda es el proceso más extensamente usado para reparaciones subacuáticas y su versatilidad, bajo costo y gran efectividad provee una alternativa viable a los métodos tradicionales como un dique seco o la sujeción por tornillos. Los sistemas de soldadura subacuática pueden ser movilizadas 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 de siglo; en la Segunda Guerra Mundial se realizaban reparaciones en buques y puertos con muy buen resultado, pero su incremento ascendente comienza a partir de la década del '60, demandado por la industria petrolífera en alta mar (Offshore), en estructuras sumergidas como tuberías y cañerías. Desde entonces, casi todas las tareas de soldadura húmeda fueron realizadas por personas que han perfeccionado el corte y la soldadura subacuática actual.

En años recientes, la U.S. NAVY 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 de labores de astilleros y diques secos. Un caso en concreto fue la inactivación del crucero “ USS NEWPORT NEWS“, a fines de 1975 donde 62 aberturas de su 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: al ahorrar el

50% de los costos requeridos para completar las tareas respecto a si se hubiesen realizado en un dique seco.

Otras aplicaciones para el corte y la soldadura submarina incluyen la reparación y el mantenimiento de transportes nucleares. 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 y 1/2 horas en el agua durante la inspección y la reparación.

Si esto se hubiera realizado en la superficie, un equipo de 6 personas hubiera empleado 6 días para secar y descontaminar las piezas, 1 día para inspeccionar y reparar y 2 días más para rellenar la tubería. De esta forma se logró realizar el trabajo, ahorrando un 80% de los costos estimados de la reparación y se redujeron enormemente los riesgos de la exposición de personal.

Desde 1971, en plataformas petrolíferas, se han reportado cientos de reparaciones subacuáticas mediante soldadura, sin que se conocieran fallas. Si bien la soldadura seca es la técnica predominante, la soldadura submarina es, a veces, el único método a emplear para solucionar un problema.

### **1.3. Conceptos generales.**

“Soldadura” es una palabra de amplio sentido. Significa en principio, ensamble, pero en la industria de la construcción metálica tiene un sentido más preciso y restringido; es la unión de dos elementos de metal por efecto del calor localizado en el lugar de la unión; unión que se realiza por la fusión de los elementos y viene acompañada de un tratamiento térmico ya que las zonas próximas a la fusión sufren un calentamiento, sin salir del estado sólido, seguido de un enfriamiento. Entre los diferentes procesos de soldadura, existe el soldeo por arco con electrodos revestidos. En este proceso se produce la fusión simultánea de una zona reducida de la pieza a soldar y del electrodo; se forma un baño líquido que contiene parte de metal fundido de la pieza y parte del metal fundido del electrodo.

Llamaremos **Material de aporte**, al material para soldar con el electrodo; **Metal Base**, a la pieza sobre la que se deposita el material de aporte; **Material Depositado**, o depósito de soldadura, al metal resultante de la fusión del material de aporte y la parte fundida del metal base y **Zona Afectada**, a la zona del metal base que si bien, no ha llegado a fundirse sufre un ciclo térmico debido al proceso de soldadura que puede hacer cambiar la microestructura y las propiedades mecánicas originales.

El electrodo está constituido por un alma metálica, de forma cilíndrica y del revestimiento; durante la fusión, el revestimiento se funde en conjunto con el alma metálica y produce una escoria sobre el cordón, la que sirve de protección. La energía térmica, necesaria para producir la fusión, proviene de un arco eléctrico que se produce entre la pieza a soldar y el electrodo; la energía eléctrica necesaria para producir ese arco se obtiene de una fuente de corriente eléctrica, llámese rectificador, transformador o máquina rotativa. En la soldadura subacuática, el uso de corrientes más altas que las que se emplean en las soldaduras al aire, combinado con la conductividad eléctrica del agua requiere la observación estricta de toda clase de precauciones de seguridad para evitar el “shock” eléctrico. Al igual que la soldadura tradicional en superficie, la soldadura submarina une o fija piezas metálicas mediante un calor intenso, proveniente de un arco eléctrico.

#### **1.4. Características de la soldadura húmeda subacuática.**

El primer paso hacia la comprensión de los procesos de soldadura lo constituye el análisis de los fenómenos, que intervienen cuando se produce el contacto de dos superficies sólidas. Por lo que se recomienda que los metales estén constituidos por granos. El tamaño medio de estos granos puede ser variable y cada grano está separado de sus vecinos por una zona de transmisión, que se conoce como límite de grano. Los límites de grano desempeñan un papel importante en la determinación de las propiedades mecánicas de un metal. Los principales componentes básicos en común entre los procesos de corte y soldadura submarina son la fuente de energía, los interruptores de corriente, los cables conductores con sus terminales, pinzas de masa y las antorchas o pinzas porta electrodos, según sea corte o soldadura.

La fuente de poder siempre debe ser una máquina de corriente directa, con una capacidad de 300 o 400 A. A menudo se usan máquinas de soldar de motor generador para trabajos bajo el agua y en ambiente húmedo. Se debe conectar el bastidor o tierra de la máquina de soldar con el barco. El circuito de soldadura debe incluir un interruptor de positivo, generalmente un interruptor de cuchillas, que se maneja desde la superficie bajo el mando del buzón-soldador. El interruptor de cuchillas en el circuito del electrodo debe ser capaz de cortar la totalidad de la corriente del soldar.

La corriente de soldar debe conectarse al portaelectrodo sólo cuando el soldador esté soldando. Se usa corriente directa con electrodos negativo (polaridad directa). Se emplean portaelectrodos para soldar bajo el agua con cavidad para dos tamaños de electrodos, generalmente de 4.8mm (3/16"). Los tipos de electrodos que normalmente se usan cumplen con la clasificación AWS E6012, y deben ser impermeables.

El conductor para soldar y la tierra deben ser por lo menos cables 2/0, y el aislamiento debe ser perfecto. Si la longitud total del cable rebasa los 100m, deben colocarse dos en paralelo. Todas las conexiones deben estar aisladas cuidadosamente para que el agua no pueda llegar a hacer contacto con las paredes metálicas. Si se fuga el aislamiento, el agua de mar creará corriente con el metal conductor y parte de la corriente se fugará y no estará disponible en el arco. Además, tendrá un rápido deterioro el cable de cobre en la fuga. El cable de tierra debe conectarse a la pieza de trabajo que se vaya a soldar a una distancia menor de 1m del punto donde se suelda; este soplete está completamente aislado y usa abrazadera para sujetar el electrodo. Incluye una válvula de oxígeno y las conexiones para fijar el cable de soldar y una manguera de oxígeno

### **1.5. Aplicaciones.**

Durante años a los procesos de corte y soldadura se les reconocieron muchas utilidades para determinadas aplicaciones debajo del agua. Su campo de acción incluye operaciones tales como reflotamiento de buques, reparaciones, construcciones, remoción de maquinaria y accesorios de buques irrecuperables para transferirlos a otros buques, traslado de masas retorcidas de cascos hundidos y naufragios para limpiar los puertos y canales de navegación,

reparación de muelles y barcos deteriorados, así 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 equipo de producción.

La necesidad de producir soldaduras de alta calidad bajo el agua ha ido en aumento a medida que el petróleo y gas se encuentran en aguas más profundas. La mayoría de la exploración en alta mar, la perforación y la producción se realizaba, hasta hace poco, en aguas que tenían una profundidad de 10 a 16 metros. Cuando hay que reparar una tubería, se levanta a la superficie, se repara y se baja de nuevo hasta el fondo del océano

La exploración, la perforación y la producción se están traslapando a aguas más profundas, hasta los 300m. Se deben hacer modificaciones y trabajar en el fondo del océano. Se dañan más tuberías (Submarinas en el fondo) y hay la necesidad de hacer conexiones en las tuberías submarinas en el fondo del océano. Las reparaciones y las conexiones deben tener soldaduras de alta calidad para evitar la posibilidad de fugas o de que se vierta el petróleo. Actualmente este tipo de trabajos se lleva a cabo a profundidades de 61 a 182 m.

### ***1.6. Conclusiones parciales.***

Con el estudio bibliográfico realizado se pudo comprobar que la soldadura subacuática mojada esta en un momento de gran desarrollo, lo cual no es extraño debido a lo bajo de los costos respecto a otros procesos, esto se ha evidenciado en los últimos años un gran número de investigadores han puesto todo su empeño para obtener soldaduras de mejor calidad, muestra de esto es el desarrollo de nuevos electrodos así como recubrimientos, los cuales están encaminados a obtener soldaduras de calidad.

## Capítulo II Materiales y métodos

### 2.1. Introducción.

En este Capítulo se hace un recuento de los materiales y métodos empleados durante todo el proceso, además se realiza un análisis de los perfiles de microdureza en depósitos de soldadura subacuática lo cual es de gran utilidad para diagnosticar el estado de sanidad de los mismos, así como posibilita diagnosticar posibles cambios microestructurales, fases y la determinación aproximada del tamaño de la zona afectada por el calor. El análisis de la dureza del material no es otra cosa que la resistencia de un material a la deformación permanente en su superficie.

### 2.2. Materiales utilizados.

Los depósitos de soldadura subacuática mojada, se realizaron sobre una plancha de acero del tipo API-5L grado B, cuya composición química se muestra en la **tabla 1**.

**Tabla 1:** Composición química del acero API-5L grado B.

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
0,15	0,19	1,37	0,014	0,008	0,0	0,007
<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	
0,003	0,003	0,009	0,0	0,008	0,008	

El electrodo que se utilizó para obtener los depósitos fue el electrodo rutílico E7024 de 5mm de diámetro, recomendado para la soldadura en posición plana. Estos electrodos poseen una alta tasa de deposición y se utiliza comúnmente en la soldadura subacuática mojada. Los electrodos utilizados fueron recubiertos con una mezcla pirometalúrgica exotérmica, con el objetivo de mejorar su comportamiento [8, 9].

### **2.3. Realización de los depósitos.**

Los depósitos de soldadura subacuática mojada fueron realizados en un acuario a 50 metros de profundidad en un tanque presurizado, en todos los casos se empleó un dispositivo de soldadura por gravedad. La figura 2A, muestra una foto del acuario, donde puede apreciarse el dispositivo de soldadura por gravedad utilizado para la soldadura y la figura 2B, muestra una foto del tanque empleado para la realización de las soldaduras a 50 metros de profundidad. Con este dispositivo se pueden realizar simulaciones para profundidades de hasta 300m.



**Figura. 2** Equipamiento empleado para la realización de los depósitos de soldadura, A: Acuario con el dispositivo de soldadura por gravedad, B: Tanque presurizado.

**La tabla. 2,** presenta los parámetros empleados en la soldadura subacuática mojada de los depósitos obtenidos.

**Tabla 2.** Parámetros de Soldadura.

Corriente de soldadura [ A]	290
Tensión del arco [ V]	50
Velocidad de soldadura.[ mm/s]	4
Polaridad	Inversa

## **2.4. Caracterización de los depósitos.**

### **2.4.1. Preparación metalográfica de los depósitos.**

El corte de los depósitos de soldadura subacuática, para extraer las muestras de pruebas, se realizó en la sección transversal a la dirección del depósito. La preparación metalográfica de las muestras se realizó según los procedimientos convencionales de preparación. Las muestras fueron atacadas con Nital al 2%, durante un tiempo de 10 a 15 segundos, con el objetivo de revelar las microestructuras.

### **2.4.2. Caracterización metalográfica y normas utilizadas.**

El análisis microestructural de las muestras, se realizó con ayuda de un microscopio óptico metalográfico, marca Olympus, U-CMAD-2, el cual tiene acoplado un sistema digital de adquisición de imagen con aumento que va desde 10 a 1250X. La realización y análisis de las muestras se hizo teniendo en cuenta una serie de normas internacionales acreditadas por la OAA, según el procedimiento aplicado en cada caso como se muestra a continuación:

- ❖ Ensayo de dureza Vickers: ASTM E 92
- ❖ Ensayo de microdureza: ASTM E 384
- ❖ Estimación del tamaño de grano: ASTM E 112

- ❖ Preparación de las micrografías: ASTM E 2

### **2.4.3. Características técnicas de equipos, instrumentos e instalaciones.**

Para la realización de los ensayos se utilizaron dos equipos, el Microscopio Metalográfico Neophot 32 con un aumento de 25x en el cual cada división equivale a 39  $\mu\text{m}$ . para determinar la ZAC y el Micrómetro Shimadzu con un aumento de 400x para determinar microdureza, para el ensayo se utiliza una carga de 100gf; durante 12 segundos. Los resultados de la microdureza se expresan en  $\text{Kg}/\text{mm}^2$ , pero se acostumbra a darlos en unidades de Hv.

### **2.5. Ensayo de microdureza.**

El cual consiste en aplicar una carga concentrada en la superficie por medio de un penetrador. Los penetradores tienen distintas formas, esféricos, cónicos, piramidales, y se les fabrica de diversos materiales, todos muy resistentes, como el carburo de tungsteno y el diamante. A partir de los penetradores antes mencionados se derivan tres métodos para obtener dureza, el Brinell, el Rockwell y el Vickers, que es el que se ha utilizado en este caso.

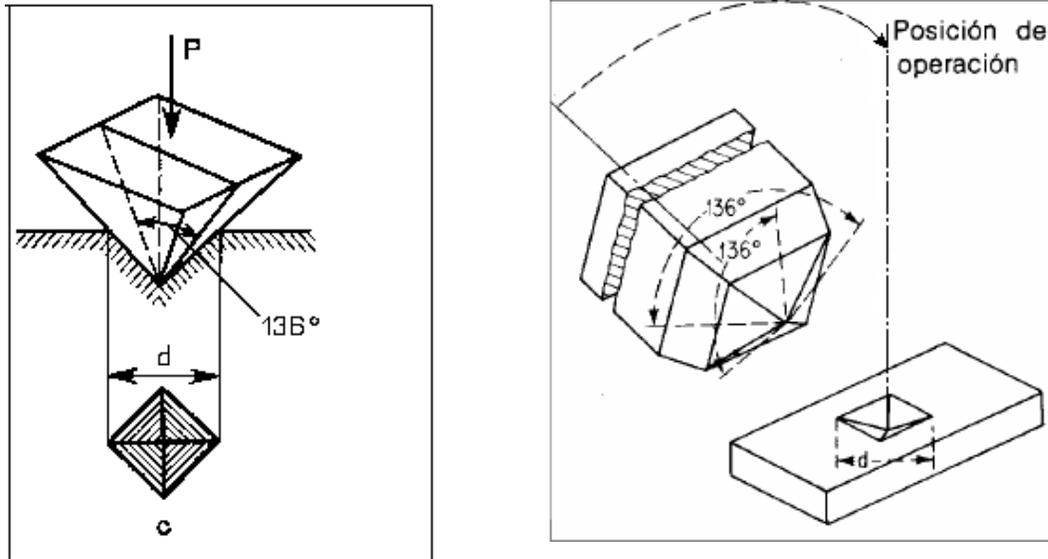
Los métodos antes mencionados de dureza caracterizan la dureza media de la aleación. Para determinar la dureza de las diversas constituyentes estructurales de una aleación, hay que localizar rigurosamente la deformación, presionar con una carga muy pequeña de (1 a 100gf) la pirámide de diamante sobre un punto concreto, hallado en la probeta metalográfica con 100-400 de aumentos, y medir después al microscopio la diagonal de la huella. La característica así obtenida H se llama microdureza y caracteriza la dureza de un constituyente estructural determinado.

El método Vickers consiste en hacer una huella con un penetrador de diamante, en forma de pirámide recta de base cuadrada y medir sus diagonales una vez retirada la fuerza aplicada. En este caso con los valores obtenidos de la diagonal se entra a una tabla donde se obtiene la microdureza, la cual también se define como:

$$H_v = 1854.4 \frac{P}{d^2} \Rightarrow [Kgf / mm^2]$$

$P \Rightarrow fuerza [gf]$

$d \Rightarrow diagonal [\mu m]$



**Figura: 3** Marcador piramidal de diamante Vickers.

El término de microdureza desafortunadamente es algo engañoso ya que podría referirse a la prueba de pequeños valores de dureza cuando que en realidad significa el uso de impresiones pequeñas. Donde las cargas de prueba son pequeñas como se mostró anteriormente. Hay dos tipos de marcadores empleados para la prueba de microdureza: la pirámide de diamante Vickers de base cuadrada de 136°, descrita anteriormente que fue la que se utilizó en este caso y el marcador Knoop de diamante alargado.

El marcador Knoop tiene forma piramidal que produce una impresión en forma de diamante, y tiene diagonales largas y cortas a una razón aproximada de 7:1.

La fórmula piramidal empleada tiene incluidos ángulos longitudinales de 172°30 y ángulos transversales de 130°. La profundidad de impresión es como de 1/30 de su longitud. Como en la prueba Vickers, la diagonal más larga de la impresión es medida ópticamente con el ocular de un micrómetro de rosca. El número de dureza Knoop es el resultado de dividir la carga entre el área de la impresión. Por lo general se utiliza tablas para convertir la longitud diagonal medida al número de dureza Knoop (HK), o mediante la fórmula:

$$H_K = \frac{14.229L}{d^2} \Rightarrow [Kgf / mm^2]$$

$L \Rightarrow$  carga aplicada, en [gf]

$d \Rightarrow$  diagonal [ $\mu m$ ]

**Factores que influyen en la exactitud de cualquier prueba de dureza por indentación:**

- a) Condición del marcador de muescas: Los marcadores de diamante deben revisarse en busca de cualquier señal de astillado.
- b) Exactitud de la carga o esfuerzo aplicado: El probador debe aplicar cargas dentro del intervalo establecido con errores mínimos. Las cargas mayores a la cantidad recomendada no deben utilizarse para obtener así pruebas exactas.
- c) Cargas o esfuerzos aplicados con impacto: Además de producir lecturas de dureza inexactas, el impacto a la carga puede dañar los marcadores de diamante.
- d) Condición de la superficie de la muestra: La superficie de la muestra sobre la cual se va a tomar la lectura de dureza debe ser plana y representativa del material en buen estado. Cualquier orificio, costra o grasa debe eliminarse por esmerilado o pulido.
- e) Espesor de la muestra: La muestra debe ser suficientemente gruesa de modo que no aparezca alguna protuberancia sobre la superficie opuesta a la de la impresión. El espesor de la muestra recomendado es de por lo menos diez veces la profundidad de la impresión.
- f) Forma de la muestra: Se logra mayor exactitud cuando la superficie a prueba es plana y perpendicular al eje vertical del indentador. Una muestra larga debe sujetarse adecuadamente de tal forma que no se ladee. Una superficie plana debe prepararse, si es posible, sobre una muestra de forma cilíndrica y usarse un yunque en V para soportar la muestra, a menos que se esmerilen bases planas paralelas en lados opuestos del cilindro, en cuyo caso se puede utilizar un yunque plano.

g) Localización de las impresiones: Las impresiones deben estar al menos a 2½ diámetros de distancia del borde de la muestra y separadas al menos 3 diámetros cuando se utilice un penetrador piramidal para la prueba de dureza.

h) Uniformidad del material: Si hay variaciones estructurales y químicas en el material, a mayor área de impresión más exacta será la lectura de dureza promedio. Para obtener una dureza promedio verdadera para el material, es necesario tomar muchas lecturas si el área de impresión es pequeña.

### 2.5.1. Determinación de la ZAC para las muestras utilizando el Microscopio Metalográfico.

#### Muestra con recubrimiento de barniz (N).

- ❖ Mediciones en divisiones de la ZAC del cordón de la derecha vista frontal.

45	47
48	49
51	52
48	50



$$X = \sum \frac{x_i}{n} = \frac{45 + 48 + 51 + 48 + 47 + 49 + 52 + 50}{8} = 48.75 Div$$

$$1 Div \Rightarrow 39 \mu m$$

$$48.75 Div \Rightarrow X_1 (\mu m)$$

$$X_1 = 1.9 mm$$

- ❖ Mediciones en divisiones de la ZAC del cordón de la izquierda vista frontal



44	39
46	43
48	44
44	

$$X = \sum \frac{x_i}{n} = \frac{44 + 46 + 44 + 48 + 39 + 43 + 44}{7} = 44Div$$

$$1Div \Rightarrow 39\mu m$$

$$44Div \Rightarrow X_1(\mu m)$$

$$X_2 = 1.7mm$$

**Muestra con recubrimiento de barniz (M).**

- ❖ Mediciones en divisiones de la ZAC para el único cordón.



33	33
35	36
31	32

$$X = \sum \frac{x_i}{n} = \frac{33 + 35 + 31 + 33 + 36 + 32}{6} = 33.3Div$$

$$1Div \Rightarrow 39\mu m$$

$$44Div \Rightarrow X_1(\mu m)$$

$$X_1 = 1.30mm$$

**2.5.2. Determinación de la microdureza y la distancia según la ZAC.**

**Tabla.3. Muestra con recubrimiento de barniz (N)**

**Cordón de la derecha vista frontal    Cordón de la izquierda vista frontal**

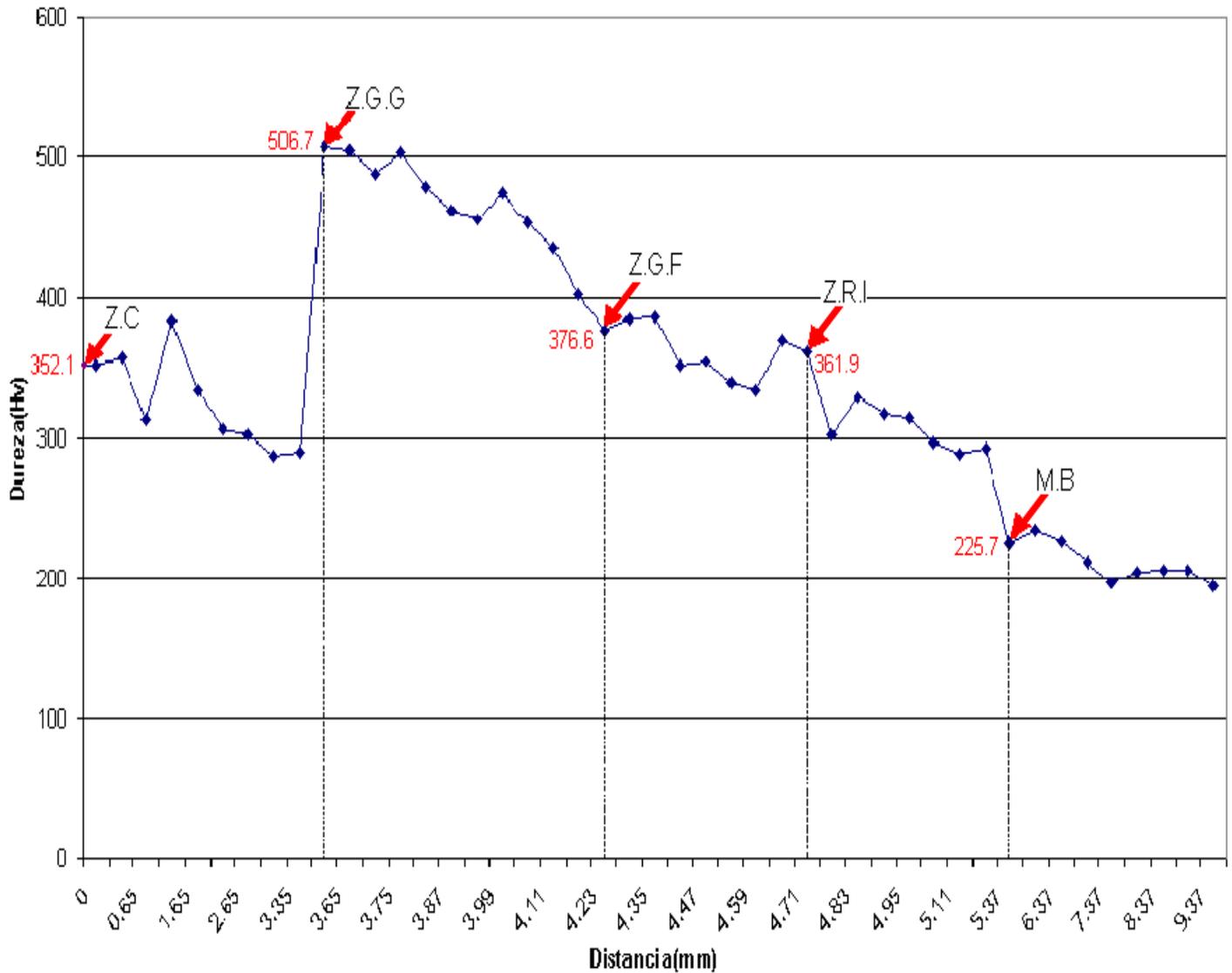
Z.c(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)	Z.c(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)
1	352.1	0	1	322.6	0
2	357.1	0.15	2	312.6	0.5
3	312.8	0.65	3	324.8	1
4	383.4	1.15	4	330.8	1.2
5	334.9	1.65	5	379.7	1.5
6	306.7	2.15	6	356.7	1.6
7	302.2	2.65	7	272.8	2
8	286.8	3.15	8	268.4	2.2
9	290.4	3.35	9	323.8	2.4

Z.G.G(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)	Z.G.G(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)
10	506.7	3.59		516.3	2.6
11	504.9	3.65		517.7	2.8
12	487.5	3.69		503	3
13	503.2	3.75		468.3	3.2
14	478.1	3.81		364.8	3.5
15	462.4	3.87		451.2	3.7
16	456.1	3.93	Z.G.F(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)
17	474.2	3.99		414.1	3.78
18	453.7	4.05		374.9	3.86
19	434.9	4.11		358.8	3.94
20	403.3	4.17		333.6	4.02

Z.G.F (med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)	Z.R. I(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)
21	376.6	4.23		321.4	4.1
22	383.6	4.29		296.9	4.18
23	385.1	4.35		313.9	4.26
24	352.4	4.41		308.6	4.34
25	354.5	4.47	M.B(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)
26	339.4	4.53		245.2	4.44
27	333.9	4.59		225.7	4.54
28	368.8	4.65		235	5.04
Z.R. I(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)		226.2	5.54
29	361.9	4.71		211.3	6.04
30	301.5	4.77		196.4	6.54
31	328.5	4.83		204.6	7.04
32	317.3	4.89		206.5	7.54
33	314.2	4.95		206	8.04
34	296.3	5.03		193.6	8.54
35	288.9	5.11			
36	292	5.19			

M.B(med)	Dureza(Hv)	Distancia(mm)
37	225.7	5.37
38	235	5.87
39	226.2	6.37
40	211.3	6.87
41	196.4	7.37
42	204.6	7.87
43	206.5	8.37
44	206	8.87
45	193.6	9.37

### Analisis de Microdureza



**Figura.4.** Perfil de microdureza de la muestra con recubrimiento de barniz (N. a la derecha).

**Leyenda:**

- (Z.C) Zona del Cordón
- (Z.G.G) Zona de Grano Grueso
- (Z.G.F) Zona de Grano Fino
- (Z.R.I) Zona de Recristalización Incompleta
- (M.B) Metal Base.

Analisis de Microdureza

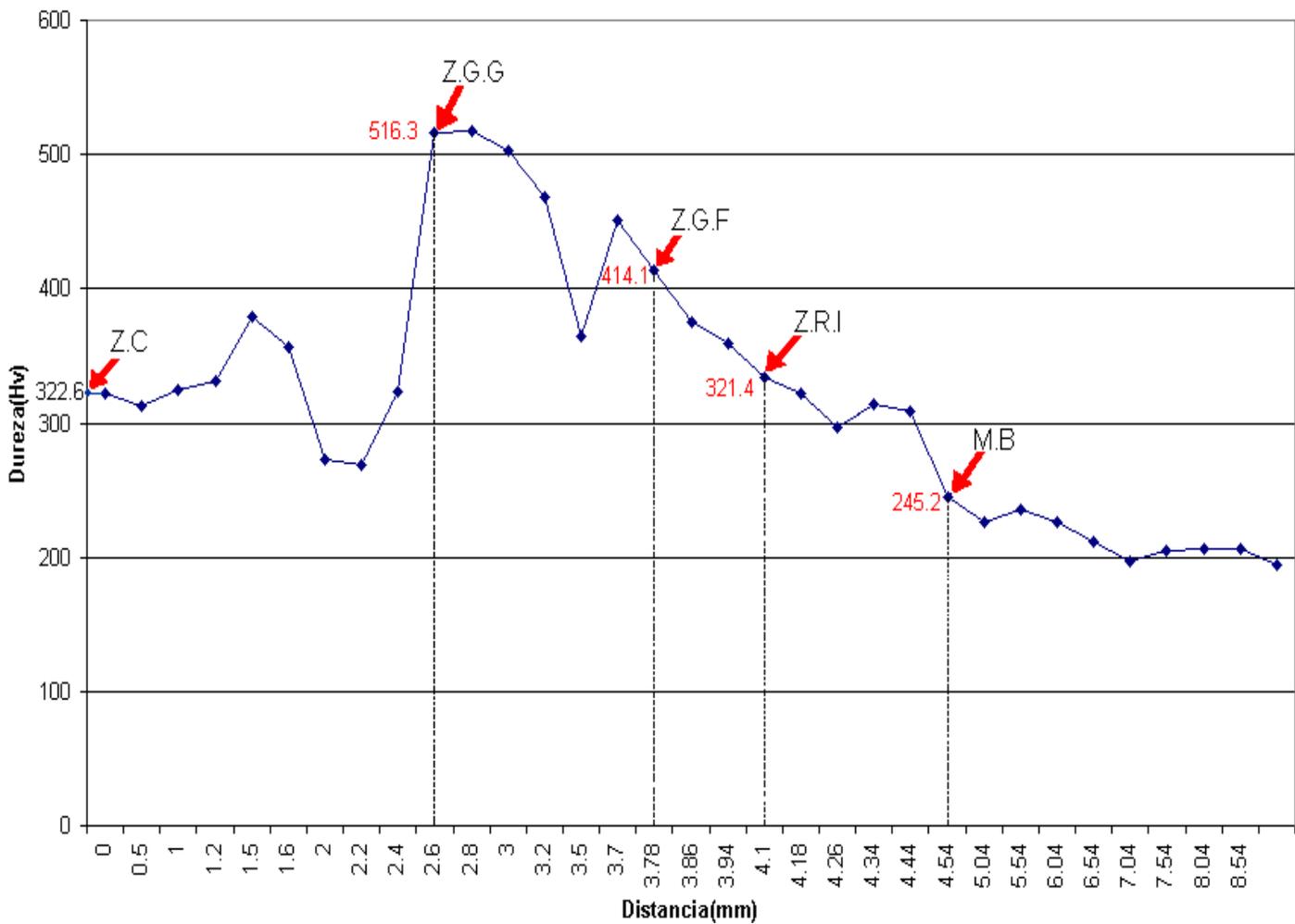


Figura.5. Perfil de microdureza de la muestra con recubrimiento de barniz (N. a la izquierda).

Leyenda:

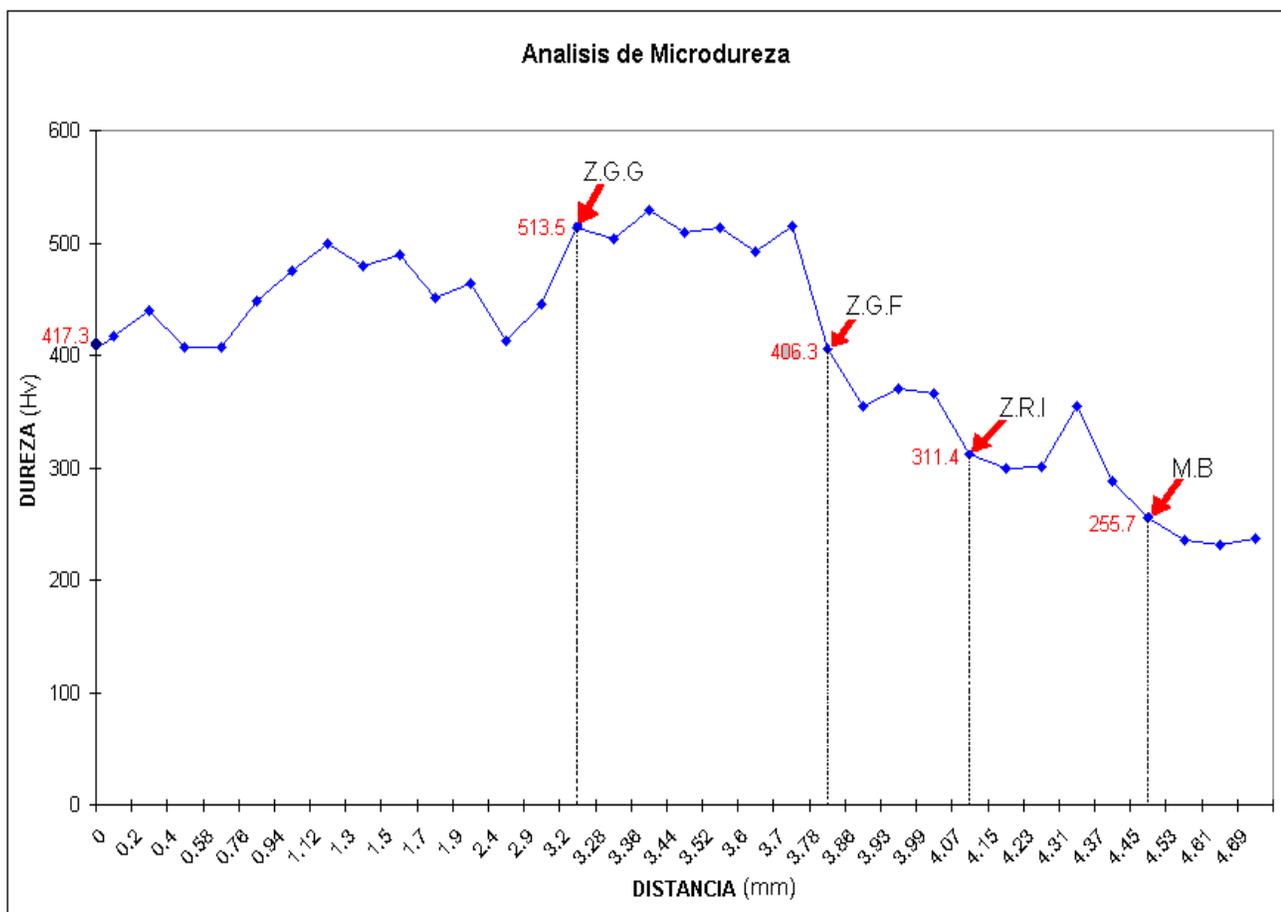
- (Z.C) Zona del Cordón
- (Z.G.G) Zona de Grano Grueso
- (Z.G.F) Zona de Grano Fino
- (Z.R.I) Zona de Recristalización Incompleta
- (M.B) Metal Base.

**Tabla.4. Muestra con recubrimiento de barniz (M).**

**Único cordón.**

Z.c	Dureza(Hv)	Desplazamiento( $\mu$ m)
1	417.3	0
2	439.6	0.2
3	406.8	0.4
4	407.3	0.58
5	447.7	0.76
6	475.5	0.94
7	498.9	1.12
8	480	1.3
9	490	1.5
10	450.6	1.7
11	463.6	1.9
12	412.6	2.4
13	445.8	2.9
Z.G.G	Dureza(Hv)	Desplazamiento( $\mu$ m)
14	513.5	3.2
15	502.9	3.28
16	528.4	3.36
17	509.0	3.44
18	513.8	3.52
19	492.9	3.6
20	515.6	3.7
Z.G.F	Dureza(Hv)	Desplazamiento( $\mu$ m)
21	376.6	3.78
22	383.6	3.86
23	385.1	3.93
24	352.4	3.99

Z.R.I	Dureza(Hv)	Desplazamiento( $\mu$ m)
25	311.4	4.07
26	300	4.15
27	301.1	4.23
28	354.7	4.31
29	287.7	4.37
M.B	Dureza(Hv)	Desplazamiento( $\mu$ m)
30	255.7	4.45
31	236	4.53
32	230.7	4.61
33	236.6	4.69



**Figura.6.** Perfil de microdureza de la muestra con recubrimiento de barniz (M. cordón único).

**Legenda:**

- (Z.C) Zona del Cordón
- (Z.G.G) Zona de Grano Grueso
- (Z.G.F) Zona de Grano Fino
- (Z.R.I) Zona de Recristalización Incompleta
- (M.B) Metal Base.

**2.5.3. Determinación de la ZAC mediante el análisis gráfico de los perfiles de microdureza y establecer una comparación con la determinada en el Microscopio Metalográfico.**

**Determinación de la ZAC para la muestra de barniz (N).**

❖ **Cordón de la derecha vista frontal.**

$$X_1 = \text{Distancia}(MB) - \text{Distancia}(ZGG) = 5.37 - 3.55 = 1.82\text{mm}$$

❖ **Cordón de la izquierda vista frontal.**

$$X_2 = \text{Distancia}(MB) - \text{Distancia}(ZGG) = 4.44 - 2.60 = 1.84\text{mm}$$

**Determinación de la ZAC para la muestra de barniz (M).**

❖ **Cordón único.**

$$X_1 = \text{Distancia}(MB) - \text{Distancia}(ZGG) = 4.45 - 3.18 = 1.27\text{mm}$$

**2.6. Conclusiones parciales**

En este Capítulo se pudo comprobar que los valores de la ZAC de  $X_1$  y  $X_2$  de la muestra con recubrimiento de barniz **(N)** y el de  $X_1$  de la muestra con recubrimiento de barniz **(M)** obtenidos por ambas vías dan muy semejantes lo cual muestra la exactitud de las mediciones. Si se comparan los valores de la ZAC entre ambas muestras se observa que los valores difieren lo cual se debe a que para cada una de ellas se utilizó un recubrimiento diferente.

## Capítulo. III. Análisis y discusión de los resultados

### 3.1 Introducción.

Los resultados experimentales que se discuten a continuación están relacionados con la composición química del metal base. Las microestructuras encontradas en los depósitos, así como con la dureza máxima en la ZAC, conjuntamente con la estimación de posibles errores introducidos.

### 3.2 Composición química.

Introduciendo los datos de la composición química del metal base (**Tabla. 1**), en el programa computacional “Calculation Welding” [12], se calculó:

- ❖ Carbono equivalente (CE), Pcm que es el coeficiente que caracteriza la fragilidad por cambios estructurales, mejor que el CE, para este acero.
- ❖ Las temperaturas de transformación del acero (Ac3, Ac1 y Ms).

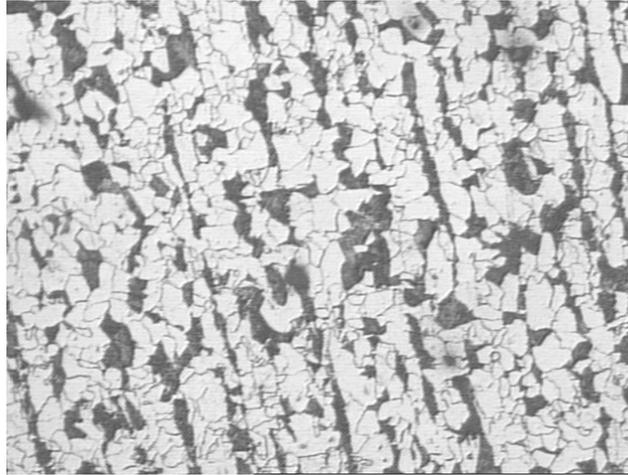
Estos resultados se presentan en la tabla siguiente (**Anexo. 2**).

**Tabla. 5**

<b>Carbono Equivalente----- (%)</b>	
CE(IIW)	0.380
CE(WES)	0.387
Pcm	0.225
CE <sub>n</sub>	0.362
<b>Temperaturas de transf. del acero----- (C°)</b>	
Ac3	857.1
Ac1	734.3
Ms	430.3

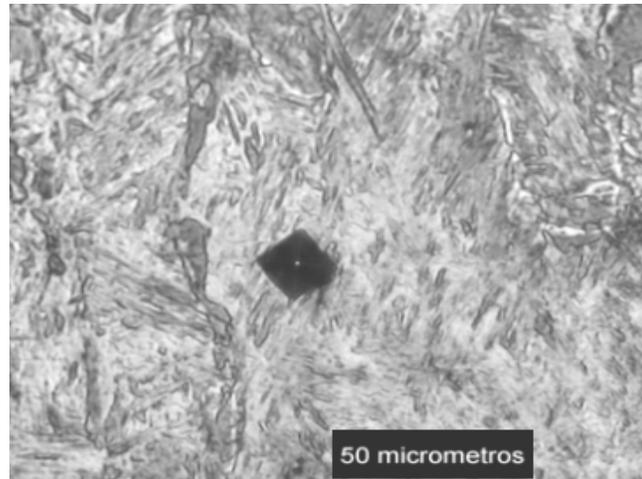
### **3.3. Caracterización microestructural.**

La **figura. 7**, muestra la microestructura del metal base (API -5L grado B), constituida por ferrita poligonal y perlita orientada en la dirección de laminación.

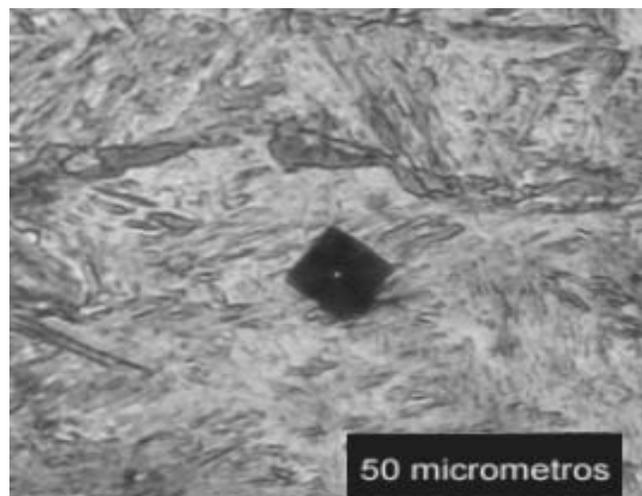


**Figura. 7** Microestructura del metal base. 200x

La **figura. 8** muestra microestructuras del centro del cordón del depósito de soldadura subacuática a 50 m de profundidad, para el electrodo 7024, con recubrimiento modificado (M). La **figura. 9**, muestra en la misma posición, las estructuras de los depósitos obtenidos con un electrodo con recubrimiento de barniz normal (**N**).



**Figura. 8** Microestructura en el centro del cordón. (7024 M). 400x.

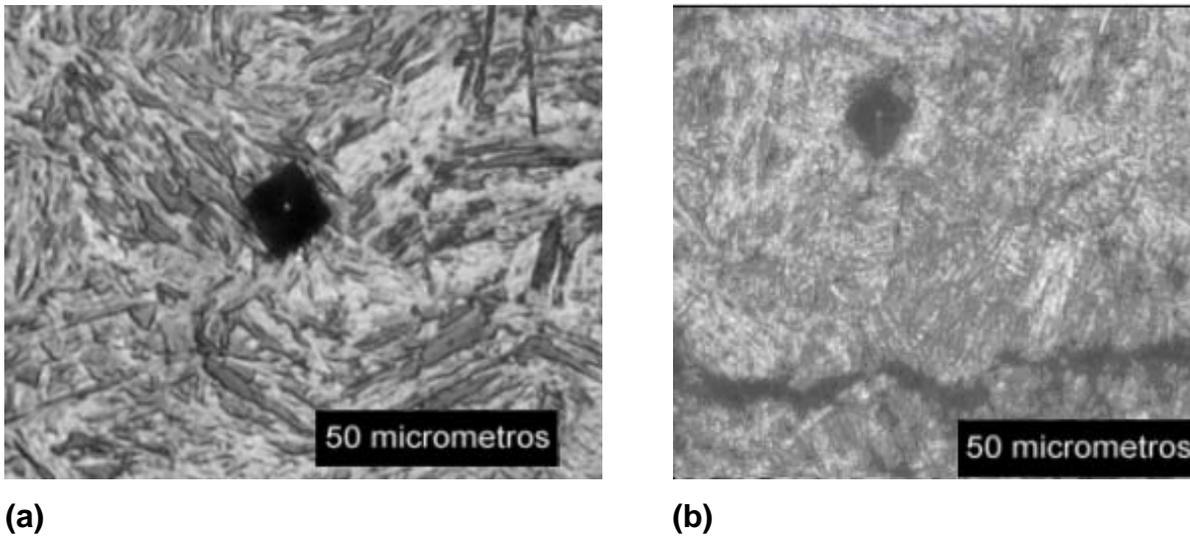


**Figura. 9** Microestructura del centro del cordón (7024 N). 400 x

De las **figuras 4,5** y **6** relacionadas con los perfiles de microdureza de los depósitos analizados, en el caso de las dos primeras (recubrimiento de barniz normal(**N**)), se observa la similitud de los resultados obtenidos en los valores de la microdureza para las diferentes regiones de la ZAC. Estos resultados avalan la repetibilidad de los experimentos realizados en cuanto al régimen de soldadura. En el caso del perfil que se analiza en la **figura. 6** aunque los valores de microdureza son muy similares la ZAC, si es menor, lo cual se debe a que aunque se utilizó el mismo metal base el recubrimiento es modificado (**M**), lo que posibilitó obtener una soldadura no sólo de una menor ZAC sino también con una gran mejoría de los defectos.

Los resultados obtenidos en los depósitos de la soldadura subacuática mojada con el electrodo 7024, recubierto con una capa de barniz normal y modificado demuestran que en el caso en que se utilizó la capa de barniz **(M)**, no se observa un estado de agrietamiento en la zona de granos gruesos, por tal motivo, se considera que su comportamiento tecnológico es mejor. El mismo no presentó grietas en el metal fundido, en ninguno de los depósitos caracterizados, mientras que en el que se aplicó una capa de barniz **(N)** los resultados no fueron satisfactorios.

Por otro lado, la **figura 10**, muestra la zona de granos gruesos de la ZAC, de dos depósitos obtenidos con el electrodo E7024, con barniz normal y modificado. En ambos se observó una estructura martensítica pero en el depósito en el que se aplicó el barniz modificado no se obtuvo ninguna grieta, mientras que en el que se aplicó el barniz normal si se obtuvieron, las cuales se observan en específico en la ZGG (Zona de Grano Grueso) y en algunos casos llegan a ser ramificadas.



**Figura. 10** Microestructura de la zona de grano grueso de la ZAC. 400X. (a) E7024 **(M)**  
(b) E7024 **(N)**.

### **3.4. Ensayos de microdureza.**

De los perfiles se pueden estimar aproximadamente los valores de la longitud de la ZAC, así como la longitud de la subzonas, además se puede establecer una comparación de la microdureza máxima para la ZAC a partir de los resultados obtenidos en los experimentos y los determinados con el software.

**Tabla.6.** Longitud de la ZAC y las subzonas para la muestra que se utiliza barniz **(N)** (figura.4)

Longitud de la ZAC(mm)	1.8
Longitud de la ZGG(mm)	0.64
Longitud de la ZGF(mm)	0.48
Longitud de la ZRI (mm)	0.66

**Tabla.7.** Longitud de la ZAC y las subzonas para la muestra que se utiliza barniz **(N)** (figura.5)

Longitud de la ZAC(mm)	1.8
Longitud de la ZGG(mm)	1.18
Longitud de la ZGF(mm)	0.32
Longitud de la ZRI (mm)	0.34

**Tabla.8.** Longitud de la ZAC y las subzonas para la muestra que se utiliza barniz **(M)** (figura.6)

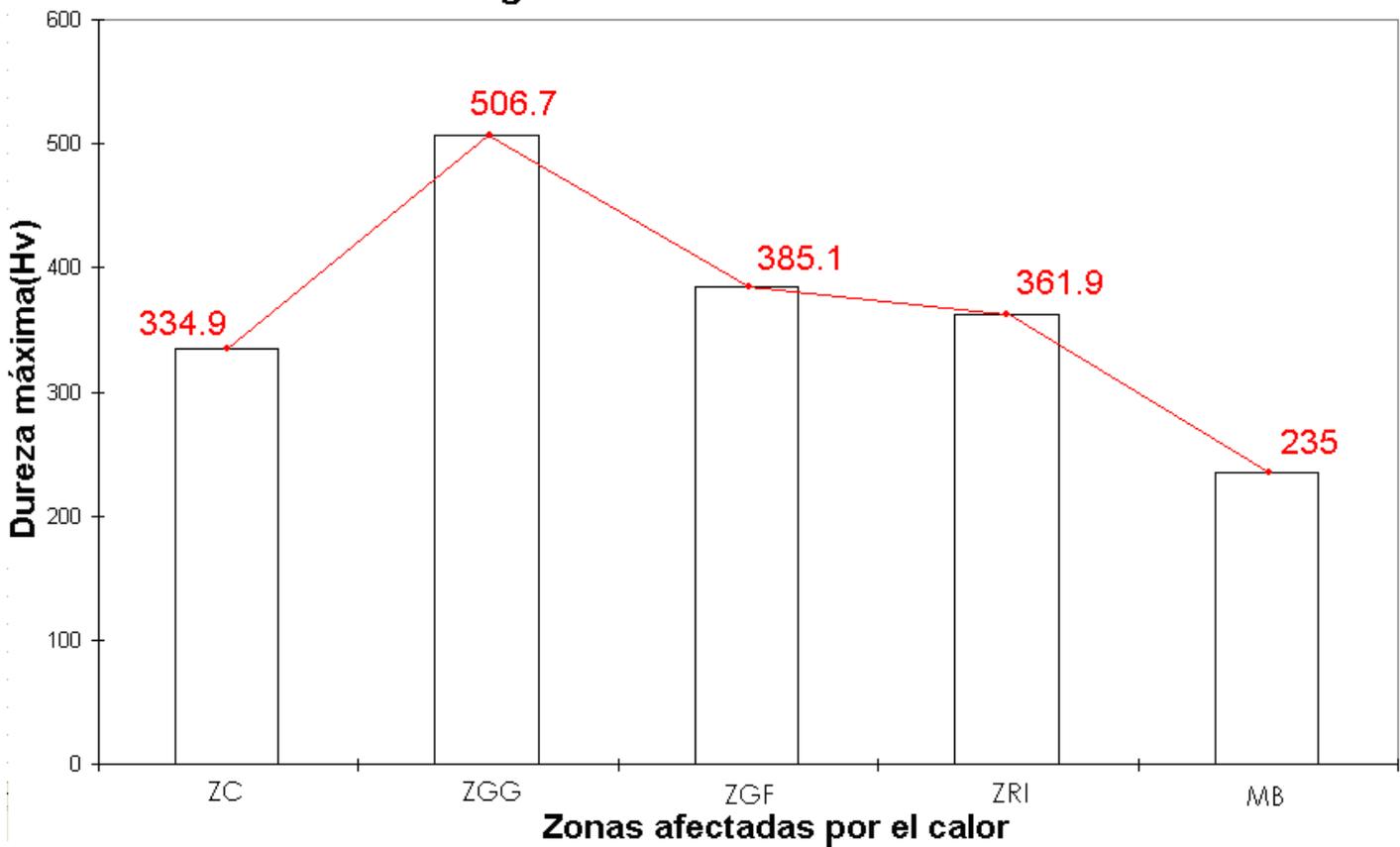
Longitud de la ZAC(mm)	1.25
Longitud de la ZGG(mm)	0.58
Longitud de la ZGF(mm)	0.29
Longitud de la ZRI (mm)	0.38

Los valores obtenidos de la longitud de la ZAC para los dos depósitos de la muestra realizada para el electrodo 7024, con recubrimiento de barniz normal (N), son muy parecidos (1.8mm), y para el depósito de la muestra realizada para el mismo electrodo, pero con recubrimiento modificado (M) es (1.25mm), estos valores de las longitudes para las diferentes subzonas, se corresponde con los valores reportados por otro investigador [19], con

la diferencia que los obtenidos en este trabajo son mas bajos, debido a que como se está en presencia de una soldadura subacuática, la energía neta es menor.

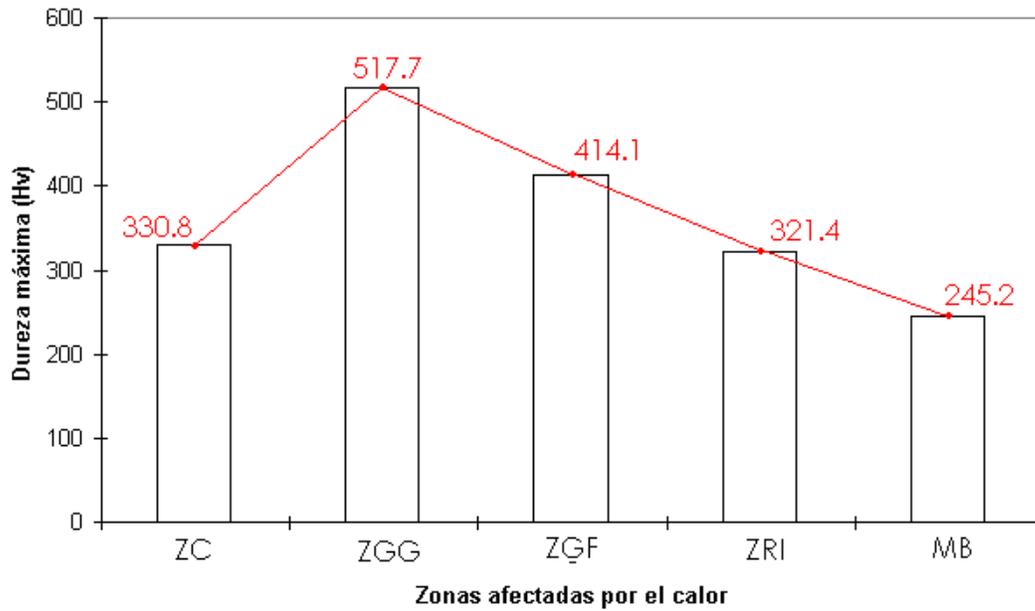
Los histogramas 1, 2 y 3 muestran las diferentes subzonas con los valores máximos de microdureza para cada uno de los depósitos de las muestras analizadas.

**Histograma del cordón de la derecha**



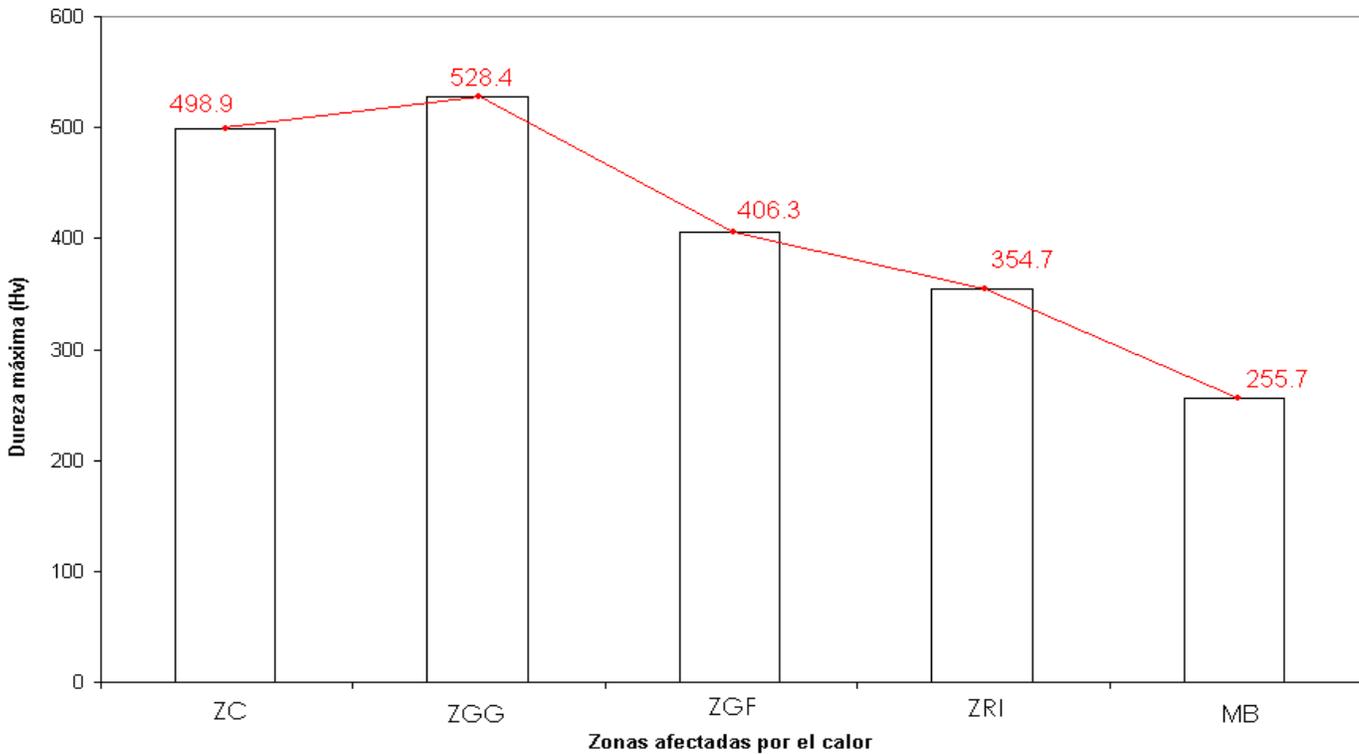
**Histograma.1.** Microdureza máxima de cada subzona para el recubrimiento con barniz (N. a la derecha).

Histograma del cordón de la izquierda



**Histograma.2.** Microdureza máxima de cada subzona para el recubrimiento con barniz (N. a la izquierda).

Histograma del cordón único



**Histograma.3.** Microdureza máxima de cada subzona para el recubrimiento con barniz (M).

Se sabe de la ciencia de los materiales, que la resistencia mecánica está relacionada con los

tamaños de grano a través de la ecuación de Hall Petch,  $\sigma_f = \sigma^* + \frac{K}{\sqrt{d}}$ , donde  $\sigma_f$  representa el límite de fluencia del material,  $\sigma^*$  y K, son constantes del material y d, es el tamaño de grano.

Para los aceros de construcción se cumplen las siguientes relaciones;

$$\sigma_B = 0.3Hv$$

$$\sigma_f \approx (0.6 - 0.7)\sigma_B$$

A partir del análisis de la ecuación de Hall Petch, se observa que, al disminuir el tamaño de grano, se incrementa la tensión de fluencia del material, lo cual implica un aumento de la tensión de rotura  $\{\sigma_f \approx (0.6 - 0.7)\sigma_B\}$  y este incremento implica un aumento de la dureza en el depósito ( $\sigma_B = 0.3Hv$ ], lo cual justifica los valores de microdureza en las diferentes subzonas, no así en la subzona de GG.

Si se hace un análisis del histograma para los valores máximos de dureza en cada uno de los depósitos se observa que la ecuación de Hall Petch se cumple perfectamente excepto para la ZGG lo cual se debe a que en ella se ha formado una estructura martensítica, debido a que esta soldadura se realiza en agua y su enfriamiento es muy rápido, además de que en la misma se produce gran cantidad de hidrógeno, es decir están presentes las condiciones para la formación de grietas inducidas por hidrógeno.

A partir de los resultados obtenidos con el software Yurioka para los recubrimientos donde se utiliza una capa de barniz normal y una modificada con sus respectivos espesores, se puede observar en los **Anexos. 3 y 4** que los valores máximos estimados de microdureza en la zona afectada por el calor son más pequeños que los obtenidos en las **Tablas. 9, 10 y 11** donde se muestra un promedio de la microdureza obtenida en cada subzona y las mayores

diferencias surgen en la Zona de Granos Gruesos (ZGG), lo cual se debe a que en esta zona aparece una estructura martensítica donde la microdureza medida no coincide con la estimada por el software, esto está relacionado con el hecho de que en esta zona el contenido de hidrógeno es del orden de 90ml/100g[23], unido a un alto tensionamiento en dicha zona.

**Tabla. 9** Microdureza en diferentes zonas para el cordón de la derecha con recubrimiento de barniz N.

Zona/región	Mediciones de Microdureza, Hv 100gf				Promedio
<b>ZGG</b>	<b>403.3</b>	<b>434.9</b>	<b>456.1</b>	<b>453.7</b>	<b>437</b>
ZGF	333.9	339.4	354.5	352.4	345
ZRI	292	288.9	296.3	301.5	294.7

**Leyenda:** ZGG = Zona de Granos Gruesos, ZGF = Zona de Granos Finos, ZRI= Zona de Recristalización Incompleta.

**Tabla. 10** Microdureza en diferentes zonas para el cordón de la izquierda con recubrimiento de barniz N.

Zona/región	Mediciones de Microdureza, Hv 100gf				Promedio
<b>ZGG</b>	<b>451.2</b>	<b>364.8</b>	<b>468.3</b>	<b>503</b>	<b>446.8</b>
ZGF	414.1	374.9	358.8	333.6	370.4
ZRI	321.4	296.9	313.9	308.6	310.2

**Leyenda:** ZGG = Zona de Granos Gruesos, ZGF = Zona de Granos Finos, ZRI= Zona de Recristalización Incompleta.

**Tabla. 11** Microdureza en diferentes zonas para el cordón único con recubrimiento de barniz M.

Zona/región	Mediciones de Microdureza, Hv 100gf				Promedio
<b>ZGG</b>	<b>492.9</b>	<b>502.9</b>	<b>509</b>	<b>513.5</b>	<b>504</b>
ZGF	376.6	383.6	385.1	352.4	374
ZRI	287.7	301.1	300	311.4	300.1

**Leyenda:** ZGG = Zona de Granos Gruesos, ZGF = Zona de Granos Finos, ZRI= Zona de Recristalización Incompleta.

### **3.5. Teoría de Errores para las dos formas de obtención de la ZAC.**

$$E = \frac{E_a - E_r}{E_a} * 100$$

#### **Muestra con recubrimiento de barniz (N)**

❖ **Cordón de la derecha vista frontal.**

$$E_N = \frac{1.82 - 1.80}{1.82} * 100$$

$$E_N = 1.1\%$$

❖ **Cordón de la izquierda vista frontal.**

$$E_N = \frac{1.84 - 1.80}{1.80} * 100$$

$$E_N = 2.2\%$$

**Muestra con recubrimiento de barniz (M).****❖ Cordón único.**

$$E_M = \frac{1.27 - 1.25}{1.27} * 100$$

$$E_M = 1.6\%$$

**3.6. Conclusiones parciales**

En este Capítulo se compararon una serie de resultados los cuales arrojaron informaciones de gran valor como son: el análisis microestructural en la ZAC permitió determinar que en la ZGG donde se aplicó el barniz (N) surgen grietas mientras que en la que se aplicó el barniz (M) no. A partir de la determinación de la microdureza para las dos muestras se pudo observar que los mayores valores se obtienen en la ZGG por encima de los 500Hv lo que se debe a la formación de una estructura martensítica que surge debido al enfriamiento rápido de la soldadura. Al comparar los resultados obtenidos en la microdureza con los del software Yurioka se observa que estos son mayores, esto está relacionado con el hecho de que en esta zona el contenido de hidrógeno es del orden de 90ml/100g [23], unido a un alto tensionamiento en dicha zona.

## Conclusiones

1. Los perfiles de microdureza obtenidos permitieron determinar la longitud de la ZAC, así como de cada una de las subzonas de los depósitos.
2. Los electrodos E7024 que presentan como recubrimiento una capa de barniz modificada (mezcla pirometalúrgica exotérmica), producen menor índice de agrietamiento en la zona de granos gruesos, que los electrodos con la capa de barniz normal.
3. La zona de granos gruesos, presenta una estructura martensítica, con una microdureza máxima, que en el caso de la muestra que se aplica un recubrimiento de barniz(N) es de 517,7. Hv para el depósito de la izquierda y de 506,7. Hv para el depósito de la derecha, mientras que en el caso de la muestra con recubrimiento de barniz (M) se obtuvo un valor de 528.4. Hv para su depósito.
4. La comparación de los resultados obtenidos en la determinación de la ZAC, por el Microscopio Metalográfico y por el análisis de microdureza permitió comprobar la similitud de los resultados para ambas muestras.
5. La determinación de los valores máximos de microdureza en la ZAC con el software Yurioka permitió observar que estos difieren de los determinados en las mediciones, lo cual está relacionado con el hecho de que en esta zona el contenido de hidrógeno es del orden de 90ml/100g [23], unido a un alto tensionamiento en dicha zona.

## **Recomendaciones**

1. Realizar perfiles de microdureza del mismo acero con los mismos parámetros de soldadura, pero al aire libre para poder realizar una comparación la cual arrojaría una serie de resultados bien interesantes.
2. Estudiar predicciones de microdureza en depósitos de soldadura subacuática.

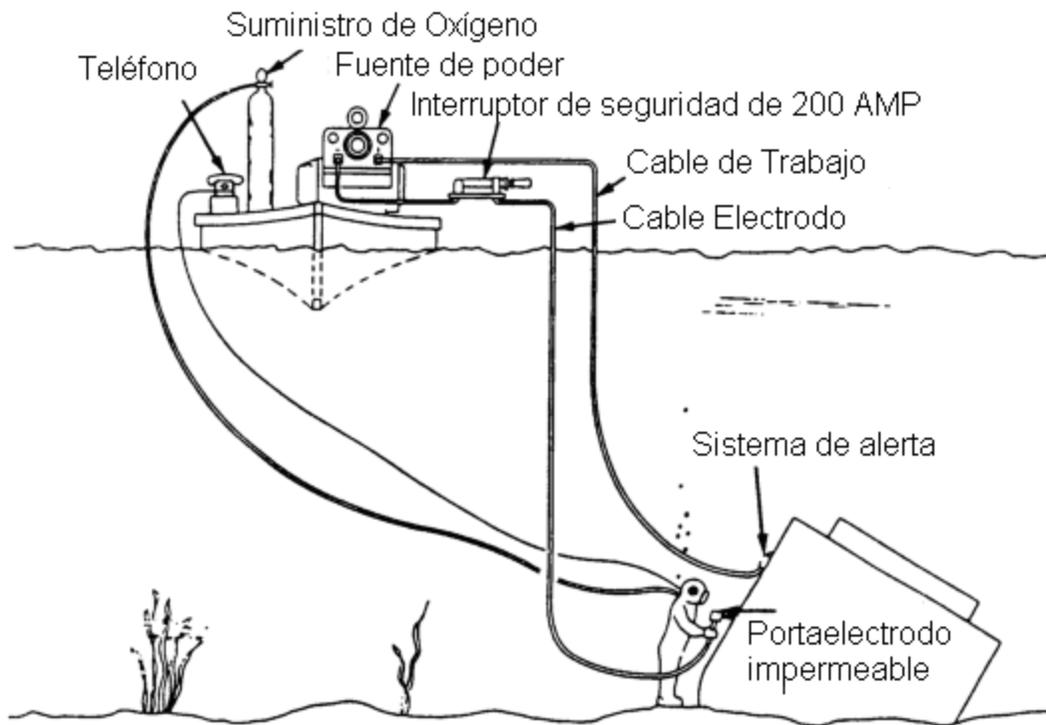
## **Bibliografía**

- [1] Bracarense, A., et al.: Proyecto Soldadura Subacuática No 491530/2004-8, Convenio CNPq/MES. UFMG/UCLV, 2005.
- [2] LIU, S., et al., Final Report (CSM Project 4-42163). Joint Research Program between MMS and Pemes/IMP “Underwater Wet Welding for Offshore Structures and Pipelines in the Gulf of Mexico”: Process Maturation and Technology Transfer, August 2004.
- [3] IBARRA, S., et al. “State of the art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel”. Under Water of Marine Structures, Theme Papers.
- [4] PESSOA, E., “Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas” Tese de Doutorado. UFMG, 2007.
- [5] GONZÁLEZ, L.P.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; PUCHOL, R.Q., “Influencia de la composición física de la capa de barniz de electrodos rútilicos sobre la porosidad en la soldadura subacuática mojada”. XXXIII CONSOLDA, Congresso Nacional de Soldagem, 27-30 de Agosto 2007, Caxias do Sul, Brasil.
- [6] CIESLAK, M.J., “Cracking Phenomena Associated With Welding”. In: ASM Metals Handbook, vol.6, “Welding, brazing and soldering” 10th edition, 1993. pp. 88-96.
- [7] POPE, A.M., LIU, S., “Hydrogen Content of Underwater Wet Welds Deposited by Rutile and Oxidizing Electrodes.” Proceedings OMAE, Vol. III, pp.85-92, USA(1996).
- [8] Master Code by N. Yurioka, Updated in April, 2007. Disponible en: <http://homepage3.nifty.com/yurioka/exp.html>. Acceso el 29 de enero de 2008.

- [9] BRACARENSE, A., et al., “Desarrollo de electrodos tubulares revestidos para la soldadura subacuática mojada”. XXXII CONSOLDA, 2 a 5 octubre de 2006. Belo Horizonte. MG. Brasil.
- [10] GONZALEZ, L. et al. “Factibilidad de mejorar el desempeño de los electrodos rútilicos, para la soldadura subacuática mojada, sólo modificando la primera capa barniz”. XXXIII CONSOLDA, agosto de 2007. Caixas do Sul. Brasil.
- [11] “Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals” IIW Doc.No.IX-1533-88, IXJ-123-87 Revision 2. June 1988.
- [12] Master Code by N. Yurioka, Updated in April, 2007. Disponible en: <http://homepage3.nifty.com/yurioka/exp.html>. Acceso el 11 de junio de 2009.
- [13] YURIOKA, N., et al. “Prediction of HAZ hardness of steels”, Metal Construction, vol 19,(1989), p 217.
- [14] CRUZ, J., et al., Reações Metalúrgicas na Soldagem Subaquática Molhada. Rev. Soldagem & Inspeção. Año 8, No 3, Setembro 2003, pag. 94 – 102.
- [15] STALKER, A.W., “Welding Institute Research on Underwater Welding”, In: Underwater Welding for Offshore Installations, pp.78-84, The Welding Institute, June, England, (1977).
- [16] ROWE, M. AND LIU, S. , “Recent developments in underwater wet welding”, Science and Technology of welding and Joining 2001 vol.6 No. 6, pp. 387-396.
- [17] VEDIA, L.A., SVOBODA, H.G., “Introducción a la metalurgia de la soldadura”, Argentina. 2004.

- [18] KOU, S. "Welding metallurgy", Second edition, a John Wiley & Sons, inc., publication, 2003. 242 p.
- [19] Grabin, B, F. Metalografía de uniones soldadas por fusión., "Hagkoba Dumka", Moscú. 1982
- [20] Bhadeshia. H. K. D. H. CASE STUDY. WELD MICROSTRUCTURES. <http://cml.postech.ac.kr/a/C9-9.pdf> .
- [21] Bhadeshia H. K. D. H. Interpretation of the microstructure of Steel. [http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2008/Steel\\_Microstructure/SM.html](http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2008/Steel_Microstructure/SM.html)
- [22] Perdomo, L., et al.: Factibilidad de mejorar el desempeño de los electrodos rútilicos, para la soldadura subacuática mojada, sólo modificando la primera capa barniz. XXXIII Congresso Brasileiro de Soldagem promovido pela Associação Brasileira de Soldagem realizado em Caxias do Sul – RS entre os dias 26 e 31 de agosto de 2007.
- [23] Duffus, A.; Bracarense, A.; González, L.; Caracterización metalográfica de depósitos de soldadura obtenidos con un electrodo rútilico con capas de barniz impermeabilizante de soldadura subacuática mojada. 2004.

## Anexo. 1



Representación esquemática de la instalación del equipamiento requerido para operaciones de soldadura subacuática mojada.

Anexo. 2

Chemical Composition Input (%)				Carbon Equivalents (%)	
C(<0.8)	<input type="text" value="0.15"/>	Mo(<1.0)	<input type="text" value="0.003"/>	CE(IIW)	0.380
Si(<1.5)	<input type="text" value="0.19"/>	V(<0.1)	<input type="text" value="0.003"/>	CE(WES)	0.387
Mn(<3.0)	<input type="text" value="1.37"/>	Nb(<0.1)	<input type="text" value="0.008"/>	Pcm	0.225
P(<0.025)		Ti(<0.1)	<input type="text" value="0.0"/>	CEn	0.362
S(<0.025)		Al(<0.1)	<input type="text" value="0.008"/>	<b>Transformation Temp ( °C)</b> (Mn<2,Cu<1,Cr<2.5,Mo<0.5)	
Cu(<2.0)	<input type="text" value="0.009"/>	N(<0.01)		Ac3	857.1
Ni(<10.0)	<input type="text" value="0.007"/>	O(<0.01)		Ac1	734.3
Cr(<10.0)	<input type="text" value="0.00"/>	B(<0.003)	<input type="text" value="0.0"/>	Ms	430.3

**Calculate**

**Initialize**

May 12, 2007 updated  
Source code by N.Y

Imagen donde se determina el carbono equivalente por medio del software Yurioka.

### Anexo. 3

**Welding Condition Input**

Current (A)   
50 < A < 5000

Voltage (V)   
5 < V < 100

Velocity, (cm/min)   
1 < Vel < 1000

Arc Efficiency   
0.3 < Eata < 1.0

Thickness, (mm)   
5 < Thick < 200

Ambient Temp, (oC)   
-50 < Temperature < 50

Preheat & Interpass, (oC)   
-50 < Temperature < 400

**Welding Condition Output**

Arc Energy, (kJ/mm) 3.625

Heat Input, (kJ/mm) 1.087

Welding Cooling Time, t8/5(s) **5.365**

**Composition Input (wt%)**

C < 0.8	<input type="text" value="0.15"/>	S < 0.025	<input type="text" value="0.003"/>	Mo < 1.0	<input type="text" value="0.003"/>	Al < 0.1	<input type="text" value="0.004"/>
Si < 1.5	<input type="text" value="0.19"/>	Cu < 2.0	<input type="text" value="0.009"/>	V < 0.1	<input type="text" value="0.02"/>	N < 0.01	<input type="text" value="0.004"/>
Mn < 3.0	<input type="text" value="1.37"/>	Ni < 10.0	<input type="text" value="0.007"/>	Nb < 0.1	<input type="text" value="0.01"/>	O < 0.01	<input type="text" value="0.0000"/>
P < 0.025	<input type="text" value="0.0"/>	Cr < 10.0	<input type="text" value="0.0"/>	Ti < 0.1	<input type="text" value="0.0003"/>	B < 0.003	<input type="text" value="0.0000"/>

Cooling Time, t8/5 (s)

**HAZ Maximum Hardness estimated**

Hv-5 **314.7**

Martensite Volume (%) **49.9**

May 12, 2007, updated  
Source code by N.Y.

Imagen donde se determina la microdureza máxima estimada en la ZAC para la muestra de 19 mm de espesor, por medio del software Yurioka.

### Anexo. 4

**Welding Condition Input**

Current (A)   
50 < A < 5000

Voltage (V)   
5 < V < 100

Velocity, (cm/min)   
1 < Vel < 1000

Arc Efficiency   
0.3 < Eata < 1.0

Thickness, (mm)   
5 < Thick < 200

Ambient Temp, (oC)   
-50 < Temperature < 50

Preheat & Interpass, (oC)   
-50 < Temperature < 400

**Welding Condition Output**

Arc Energy, (kJ/mm) 3.625

Heat Input, (kJ/mm) 1.087

Welding Cooling Time, t8/5(s) **5.517**

**Composition Input (wt%)**

C <0.8	<input type="text" value="0.15"/>	S <0.025	Mo <1.0	<input type="text" value="0.003"/>	Al <0.1
Si <1.5	<input type="text" value="0.19"/>	Cu <2.0	V <0.1	<input type="text" value="0.02"/>	N <0.01
Mn <3.0	<input type="text" value="1.37"/>	Ni <10.0	Nb <0.1	<input type="text" value="0.01"/>	O <0.01
P <0.025	Cr <10.0	<input type="text" value="0.0"/>	Ti <0.1	B <0.003	<input type="text" value="0.0000"/>

Cooling Time, t8/5 (s)

**HAZ Maximum Hardness estimated**

Hv-5	<b>312.3</b>
Martensite Volume (%)	<b>48.8</b>

May 12, 2007, updated  
Source code by N. Y.

Imagen donde se determina la microdureza máxima estimada en la ZAC para la muestra de 17 mm de espesor, por medio del software Yurioka.