

DESARROLLO DE UN PROCESO Y PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN POR SOLDADURA DEL ACERO HY - 80

Samuel Rosario Francia, Héctor Villacorta Arévalo

Resumen

Los aceros HY-80; HY- 130, como HP9-4-20; 10Ni-Cr-Mo-Co son los más resistentes entre los de tenacidad especial y de mayor resistencia a la fluencia, que se han desarrollado para usarse en aplicaciones críticas del hidroe espacio y aeroespacial. En el acero tipo HY-80, los elementos aleantes que conceden características elevadas a los aceros aumentan a su vez el poder de temple y por consiguiente su tendencia al agrietamiento. La relación de la micro estructura con la propiedad de tenacidad se evalúan para el metal soldado y la región de la zona afectada por el calor.

En la fabricación de estructuras metálicas con estos tipos de materiales se emplean procesos de soldadura SAW, SMAW o EBW, sin embargo en las reparaciones o mantenimiento, el proceso de arco metálico manual con electrodos revestidos de bajo hidrógeno, con una secuencia adecuada y control previa a la calificación del soldador así como del proceso en particular, permiten presentar este trabajo con resultados satisfactorio.

I.-INTRODUCCION

Los aceros con bajos porcentajes de elementos aleantes presentan mayor resistencia y tenacidad que los aceros estructurales convencionales con medio porcentaje de carbono, han permitido su empleo en gran extensión en todos los programas de construcciones navales y en recipientes de alta presión.

La naturaleza de estos materiales requiere que se tomen ciertas precauciones para minimizar los problemas asociados con la soldabilidad, más aún cuando el proceso de soldadura es el de arco eléctrico manual empleando electrodos revestidos de bajo hidrógeno, es así que debemos considerar los mínimos requerimientos para asegurar una unión soldada satisfactoria.

Los ensayos en taller con los materiales correspondientes, planchas de acero HY-80, electrodo E 9018-M, el entrenamiento y calificación de soldadores de acuerdo al Código ASME-Sección-9, seleccionando el procedimiento y aplicando las técnicas de control de partículas magnéticas fluorescentes, ultrasonido, placas radiográficas, pruebas de dureza en la zona de trabajo, permitieron seleccionar el proceso y procedimiento que aplicado in situ, garantizan la calidad y confiabilidad de su uso.

II.-ASPECTOS TEORICOS

2.1 Influencia de los Principales Elementos de Adición

2.1.1 Carbono.- Continúa siendo, como siempre, el elemento fundamental que determina la aptitud para la soldadura de los aceros. Interviene en los aceros ferríticos, ya aumentando el poder de temple del empalme en la zona de transformación (agrietabilidad de la capa subyacente), ya dando lugar a carburos bajo la acción de los tratamientos térmicos (aceros al cromo-molibdeno).

En los aceros especiales soldables debe limitarse su contenido: rara vez sobrepasa el 0,25%. A partir de cierta proporción de este elemento, es preciso tomar precauciones especiales para reducir su experiencia perjudicial.

2.1.2 Manganeso.- Elemento gammágeno, favorece el temple del acero, es preciso limitar su contenido, excepto en los casos especiales en que se busque obtener dureza o resistencia al desgaste. Rara vez pasa del 2,0% en los aceros soldables.

El manganeso es un desoxidante enérgico y constituye un ingrediente de los electrodos o las varillas de aporte como elemento favorable por sus reacciones con el metal líquido.

Las curvas de la Figura N°1 representan la influencia del manganeso en la dureza de la zona de sobrecalentamiento de una soldadura por arco, y en consecuencia, en la soldabilidad metalúrgica. Se aprecia en el diagrama que el poder de temple del acero crece muy rápidamente, incluso con pequeñas concentraciones de manganeso (de 1,25 a 1,50%) al aumentar el contenido de carbono.

El carbono equivalente $[C] = C\% + \frac{Mn\%}{4} + \frac{Si\%}{4}$

indica que, desde el punto de vista de la soldabilidad metalúrgica, el manganeso posee un poder templante cuatro veces menor que el carbono. En general, es necesario precalentar los aceros que contienen bastante manganeso y carbono, cuando el equivalente de carbono excede del 0,45%. La relación Mn/C puede constituir así mismo, un criterio de calidad de acero y de su comportamiento en lo que respecta a la soldadura, si bien hasta ahora no se ha determinado cual ha de ser el valor de esta relación, podemos pensar que debe ser por lo menos igual a 4 para que el manganeso desempeñe plenamente su papel.

2.1.3 Silicio.- Elemento alfégeno es un reductor enérgico del acero al igual que el manganeso. Su contenido, que aumenta la tendencia al agrietamiento durante la soldadura y varía según el tipo de acero, el modo de elaboración y las concentraciones de carbono y de manganeso, ha de limitarse en los aceros de construcción de 0,15 a 0,30%, si bien en el metal fundido de los electrodos puede admitirse hasta un 0,40 ó 0,50%.

2.1.4 Níquel.- Elemento gammágeno, favorece el temple, como hacen también el carbono y el manganeso. En los aceros poco carburados ($C < 0,15\%$) y sin elementos de adición puede tolerarse del 3,0 al 5,0% de este elemento sin que la fragilidad del conjunto quede fuertemente afectada. En pequeña cantidad el níquel mejora la capacidad de deformación de la soldadura, afina el grano e interviene favorablemente en la temperatura de transición de fragilidad del acero.

En los aparatos de cracking debe funcionar a temperaturas muy bajas, de hasta -100°C , sin presentar roturas frágiles, se utilizan aceros con 3,5% de níquel.

La influencia de este elemento en la dureza de la zona de transformación de la soldadura está representada en la Figura N°2. El efecto del níquel sobre las características mecánicas es menos apreciable que el del manganeso; así para un 0,25% de carbono, un acero con 1,25% de manganeso es equivalente a uno con 2,5% de níquel ($\text{HB} = 300$)

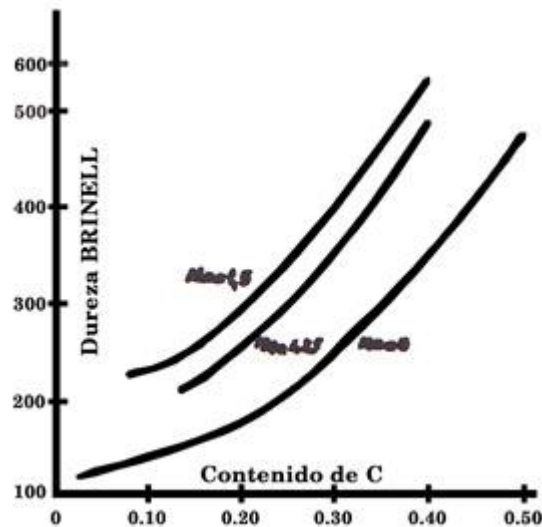


Figura N° 1.- Influencia del contenido de manganeso del acero base en las transformaciones durante el soldeo por arco, en función del contenido de carbono.

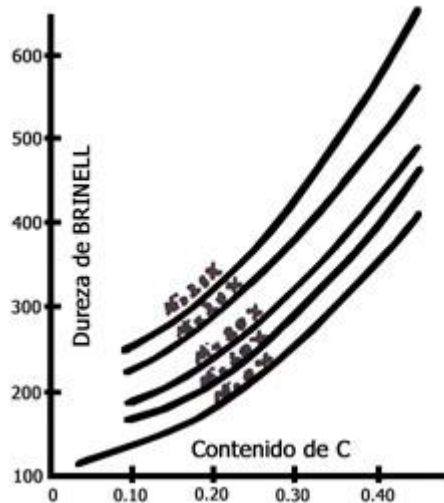


Figura N° 2.- Influencia del contenido de Níquel del acero en las transformaciones durante el soldeo por arco, en función del Contenido de carbono.

2.1.5 Cromo.- Elemento alfégeno, suele estar unido a otros elementos como el níquel y el molibdeno, en los aceros ligeramente aleados de construcción y entonces aumenta la templeabilidad del acero.

El cromo presenta otro inconveniente desde el punto de vista de la soldabilidad operatoria, y es que forma óxido de cromo, material refractario que es indispensable eliminar con un flujo decapante en el soldeo. Dado que el óxido de cromo se elimina más fácilmente con escoria básica, los electrodos con alma de acero al cromo deben poseer preferentemente revestimiento básico.

Este elemento de adición actúa claramente sobre la templeabilidad de la zona de transformación durante el soldeo, Figura N°3. En un acero con 0,50% de cromo y 0,15% de carbono, la dureza en la capa subyacente sobrepasa los 200 Brinell.

2.1.6 Molibdeno.- Aumenta el poder de temple del acero, su contenido suele estar limitado al 0,25 ó 0,35% en los aceros con bastante carbono. Este elemento, incluso en pequeñas concentraciones, confiere a los aceros una mayor resistencia en caliente y la propiedad de resistir a la fluencia lenta, por lo cual presentan gran interés como elemento de adición en los aceros especiales ligeramente aleados. En la Figura N°4 se representa la influencia del molibdeno sobre la dureza de la zona; transformación de las soldaduras.

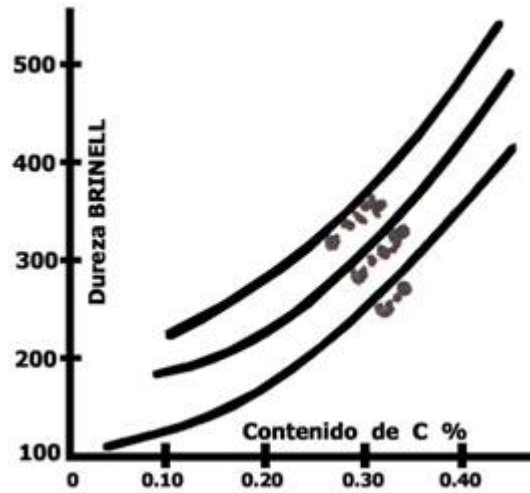


Figura N° 3.- Influencia del contenido de cromo en las transformaciones durante el soldeo por arco, en función del contenido de carbono.

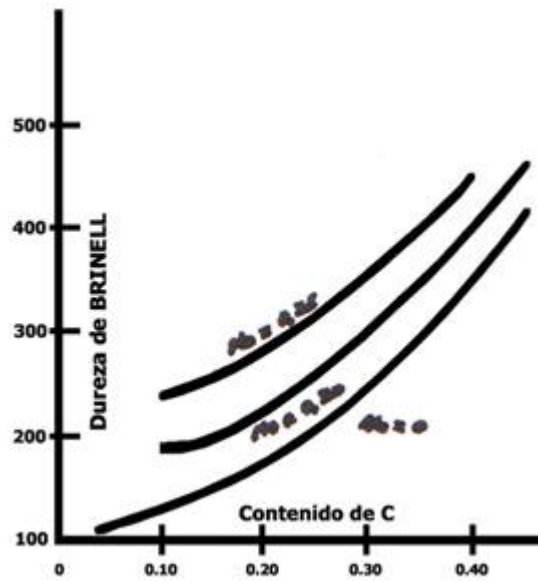


Figura N° 4.- Influencia del contenido de molibdeno en las transformaciones durante el soldeo por arco, en función del contenido de carbono.

Puede observarse que a partir del 0,50% de molibdeno el poder del temple del acero aumenta notablemente y su soldabilidad metalúrgica disminuye; por consiguiente se han de prever ciertas precauciones para el soldeo de los aceros que contengan este elemento.

2.1.7 Vanadio.- Aumenta rápidamente el poder de temple del acero, pero su contenido debe ser muy limitado; rara vez excede del 0,1 al 0,2%.

2.1.8 Aluminio.-Elemento alfégeno, es un poderoso reductor en concentraciones pequeñísimas. Calmando el acero con aluminio se reduce el efecto del nitrógeno en el envejecimiento (endurecimiento secundario) por formación de nitruro de aluminio. Se añade a ciertos aceros en concentraciones grandes (del 0,5 al 1,0%), con el objeto de hacerlo más resistentes a la oxidación en caliente, en estos casos, la operación de soldar resulta embarazosa por la formación de alúmina.

2.1.9 Cobre.- Es soluble en el acero hasta 0,40%, se recomienda no pasar este límite en los aceros destinados a conjuntos soldados, ya que este elemento es un factor de agrietabilidad en estado libre, y por tanto, en concentraciones mayores del 0,50%. Se le atribuye la propiedad de otorgar a los aceros de construcción mayor resistencia a la corrosión por el agua.

2.1.10 Fósforo.- Impureza que favorece el agrietamiento, especialmente en presencia de azufre.

2.2 Templabilidad y Soldabilidad

Los aceros que tienen difícil soldabilidad son aquellos que tienen **TEMPLABILIDAD ALTA**. La templabilidad en un acero es la capacidad de generar **MARTENSITA**. Los elementos de adición que conceden características elevadas a los aceros aumentan a la vez su poder de temple, es decir que por la presencia de estos elementos se inhibe la descomposición de la austenita en perlita durante tiempos relativamente largos y con ello se logra transformar la austenita en martensita aún a bajas velocidades de enfriamiento y, por consiguiente su poder de agrietamiento.

Bajo en concepto anterior y teniendo en cuenta los efectos de la soldadura en la ZAC, se puede comprobar que un gradiente de temperatura originada por la difusión del calor, va desde la solidificación del acero (1535°C) hasta la temperatura ambiente.

Debido a que se alcanza la temperatura de temple en la zona próxima al cordón (900°- 700°C), la cual se convierte en zona sensible y si se origina un enfriamiento brusco, esta zona será susceptible de formarse martensita, con lo que se originan zonas frágiles en estos aceros de difícil soldabilidad, agravándose este efecto cuando se trata de aceros de baja aleación.

Es necesario recordar que los aceros de alta templabilidad son los aceros al carbono, cuyo contenido de carbono son $> 0,45$. Estos aceros, si se calientan a $T^{\circ} > 723^{\circ}\text{C}$ necesitan enfriamientos bruscos para obtener un temple severo. Pero también presentan alta templabilidad, los aceros de baja aleación cuando el CE es $> 0,65\%$, teniendo en cuenta siempre además de Ce, el %C debido a que este elemento es el principal formador de estructura martensítica.

Otro factor importante y muy significativo, es el Ciclo Térmico, su influencia en el charco de soldadura y en la ZAC determinará la micro estructura y por lo tanto las propiedades. Este ciclo térmico depende del proceso de soldadura, de la energía introducida y de las dimensiones de la pieza a soldar.

La soldabilidad de estos tipos de acero es riesgosa en la medida que se desconozcan los parámetros del procedimiento como: Análisis químico, templabilidad, geometría de la pieza, embridamiento, etc.

En la práctica, el soldador generalmente subsana el desconocimiento de estos parámetros precalentando, para evitar los problemas de rajaduras.

Uno de los métodos más rápidos para determinar la soldabilidad es conocer la templabilidad del acero, por lo que es necesario conocer el término CARBONO EQUIVALENTE.

2.3 Carbono Equivalente

Este término fue desarrollado como una fórmula para normalizar la composición química del acero en un solo número que nos indica como la composición química podría afectar el endurecimiento o templabilidad del material, lo que nos serviría para seleccionar la temperatura de precalentamiento más adecuada.

Hay muchas fórmulas, pero la más apropiada para nuestro trabajo es la indicada para aceros de baja aleación, incluso microaleados:

$$[\text{CE}] = \%C + \left(\frac{\%Mn + \%Si}{6} \right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left(\frac{\%Ni + \%Cu}{15} \right)$$

2.4 Clasificación de los aceros Según su Templabilidad

El Diagrama de B.A. Graville muestra la susceptibilidad de los aceros a la fisuración, relacionando el CE% / C%, que nos dará pautas para diseñar el procedimiento de soldadura donde debemos incluir: tratamiento térmico pre y post soldadura, de manera que puedan evitar micro estructuras susceptibles de fisuración. La sensibilidad a la fisura en este diagrama se

atribuye sólo a la composición química del acero y a la predisposición de algunos aceros de formar martensita.

Por otra parte, combinada con el efecto de tensiones locales o de las tensiones desarrolladas por embriado, la presencia del hidrógeno puede ser causa de roturas frágiles de las soldaduras y que por ello se debe emplear con estos aceros electrodos básicos.

Por consiguiente, cuando el poder de temple del acero especial aumenta se hacen intervenir dos factores:

a.- La temperatura de precalentamiento.

b.- El empleo de electrodos con pequeño contenido de hidrógeno, es decir, electrodos con revestimiento básico.

En el límite, cuando el acero es sumamente templable y forma estructuras frágiles en la zonas de transformación, son insuficientes los artificios antes mencionados y se hace menester considerar el problema desde un nuevo punto de vista.

2.5 Distorsión de las Estructuras Soldadas

Durante el proceso de fabricación o de reparación de estructuras soldadas, se vive cara a cara con la distorsión de la soldadura, que afectan la integridad y comportamiento durante el servicio de la estructura. Por lo que hay que es necesario predecir el tipo específico y cantidad de distorsión resultante de la operación de soldadura.

Durante la soldadura, hay ciclos de calentamientos y enfriamientos no uniformes en la soldadura y en el material base adyacente, lo que causa complejos tensiones térmicas, los esfuerzos resultantes de estas tensiones producen fuerzas internas que causan la contracción del material. Se presentan la: Contracción transversal en las juntas a tope, Cambio angular en la junta tope, Cambio angular en una junta en T y Distorsión longitudinal en la junta a filete.

Hay fórmulas empíricas de cuyo análisis se puede definir un método para controlar o minimizar la distorsión de una soldadura, pero que hay que adaptarlas a las condiciones reales del trabajo.

III.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

El objetivo principal era aquí idear un procedimiento de soldadura que permita obtener una combinación óptima de resistencia, ductilidad y tenacidad de la soldadura completa bajo las condiciones de soldadura por

el proceso de arco eléctrico manual. Los estudios de la ZAC, la micro estructura del metal soldado y las propiedades mecánicas fueron hechas en una soldadura a tope depositado en un acero de alta resistencia HY-80, placas de 28,6 mm de espesor, cuya composición se encuentra en la Tabla N°1. La soldadura fue efectuada con proceso arco eléctrico manual con electrodo de bajo hidrógeno con revestimiento básico del tipo E-9018-M.

La especificación para la prueba de impacto, puso algunas restricciones para la técnica de soldeo a emplear, como:

- 1.- La temperatura máxima de precalentamiento y de interface, 150°C.
- 2.- El post tratamiento no es recomendado.
- 3.- El proceso de soldadura debe ser desarrollado para proveer una máxima entrada de calor de 2,15 kJ / mm para un electrodo de 4 mm de diámetro.
- 4.- Sin cepillado del refuerzo de la soldadura.

Adicionalmente existen técnicas estándar, de acuerdo con la buena práctica de la soldadura, que mejoran la tenacidad de la junta, como:

1.- Mantener la entrada de calor lo más baja posible para producir cordones angostos con grano fino, que puede lograrse usando:

a.- Un “cordón de arrastre” para todos los pases, excepto en el pase de la raíz, la técnica incluye la soldadura a lo largo de una línea recta a la máxima velocidad posible de avance, mientras que asegure una fusión completa.

b.- Bajas corrientes de soldar, de manera que la relación profundidad/ancho de la soldadura es minimizada.

2.- Una secuencia de soldeo en que cada pase avanza lo más cerca posible a lo largo del borde de la soldadura de los cordones precedentes. De esta manera se funde la zona dura afectada por el calor, inherentemente susceptible a rajaduras, en el pie de la soldadura y temple (ablanda) la zona afectada por el calor adyacente al pie.

3.- Mantener el refuerzo de soldadura lo más bajo posible, de manera que los efectos geométricos de la concentración de tensión quedan minimizados. En el trabajo realizado, se empleó una técnica adicional para mejorar la performance de la junta soldada. Fue reconocido que la parte más sensible de la soldadura es la zona frágil afectada por el calor al flanco de los dos pases al extremo para cubrimiento en la superficie de la plancha. Estas zonas:

- a.- No pueden ser removidas o templadas por los pases subsiguientes.
- b.- Se presentan en una región donde se experimentan las máximas tensiones de tracción.
- c.- Existen en un sitio donde es muy posible que ocurran defectos de soldadura como socavado y rajaduras por hidrógeno.

En vista que estas dos zonas no pueden ser removidas por otros medios que un tratamiento térmico adicional de la plancha, se decidió colocar los dos pases extremos de cubrimiento donde su influencia sería la menos dañina, o sea ubicándolas a suficiente distancia (8mm) más allá del borde de la preparación de la junta. Se muestra en el esquema de la Figura N° 5 (cordones 19 y 20; 52 y 53), de esta manera fue obtenido un perfil de soldadura de la capa final.

La filosofía en que se basa este perfil, es que cualquier rajadura que comienza en el pie de la soldadura tendrá que avanzar casi en forma paralela a la superficie de la plancha durante alguna distancia, si quiere llegar a la zona afectada por el calor inherentemente frágil a lo largo del lado de la misma junta, ocasionando así serios problemas de rajaduras. Como esta vía de fractura es casi paralela a la fuerza de tensión que actúa a lo largo de la plancha, representa una vía energéticamente desfavorable. Por consiguiente, las rajaduras se presentarán probablemente en forma retardada, o sea cuando ocurre una deformación más extensa.

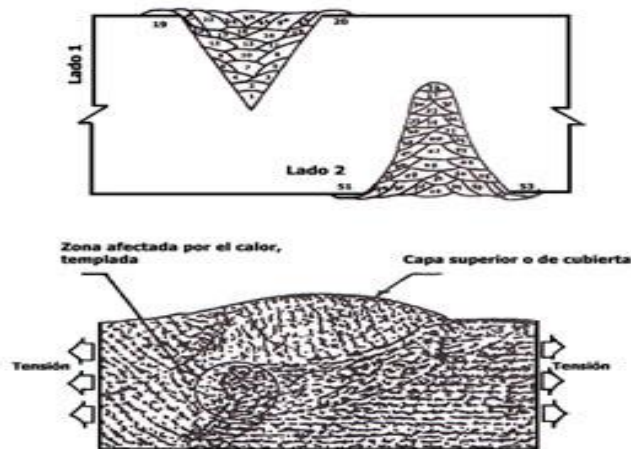


Figura N° 5.- Óptima secuencia de soldadura diagramada.

Esmerilar lado 1 y 2 y controlar por tintes penetrantes antes de depositar el metal de soldadura. Condiciones de soldadura: Corriente 160 - 200 Amp. (excepto para el primer pase), CA o CC (CC para el pase de cubierta); Voltaje 23 a 30 Voltios . Velocidad de avance 160 - 300 mm/min, en cordón longitudinal (de arrastre) (excepto para el primer pase). Temperatura de precalentamiento/ interface 150°C.

Debe notarse que el diseño de la junta mostrada en la Figura N° 5, tienen también un cordón depositado encima de cada uno de los pases finales al lado de la junta (pases 21 y 22; 54 y 55). Estas soldaduras se realizaron con el arco dirigido al borde de la preparación original de la junta y su propósito era templar el pie interior de los pases finales de cubierta en los bordes. Los pases finales de soldadura, que no podían ser templados por un pase subsecuente, estaban localizados en el centro de cada soldadura para estar lo más lejos posible de las regiones dañinas del pie, pases 27 y 60 en la Figura N° 5.

3.1 Evaluación de las propiedades de Consumibles para Soldadura.

El punto de partida para obtener óptimas de soldadura, consistía en encontrar el electrodo con el mayor nivel de resistencia a rajaduras. Esto comprendía la evaluación de electrodos candidatos indicados como adecuados para la soldadura del acero HY-80. De tenían electrodos E 9018-M y E 110.18G calificados por la NAVSEA de los EE.UU., se sabía que estos tipos de electrodos se usaban regularmente en la soldadura de acero HY-80 para aplicaciones críticas, incluyendo la construcción naval. Todos los electrodos tenían un diámetro de 4 mm (5 /32”), eran de tipo de bajo hidrógeno con revestimiento básico que contenía fierro en polvo. Se colocaron los electrodos en estufas manteniéndolos a 150°C, retirándolos en forma individual según la necesidad.

El metal de aporte en estado soldado para la prueba fue obtenida de juntas a tope soldadas en doble V en plancha con un espesor de 28,6 mm (1.1/8”) soldando en la forma descrita anteriormente. Se realizó un control sobre la conveniencia de la técnica de soldadura repitiendo con el electrodo E 9018-M.

Luego de completar la soldadura, fueron radiografiadas todas la planchas, verificando con tintes penetrante y ultrasonido. A parte de trazas de fina porosidad no se encontró otros defectos y las planchas fueron consideradas como aceptables para la extracción de probetas de laboratorio. Se hizo análisis químico en muestras de depósito de pura soldaduras, tomadas de las partes centrales de cada ranura en la soldadura, y, por consiguiente, esencialmente libres de efectos de dilución de la plancha, Tablas N° 2 y 3.

Los consumibles fueron principalmente evaluados mediante pruebas de laboratorio conducidas con el metal de soldadura en estado depositado. Especial atención se dio a aquellas propiedades consideradas como dando una indicación fidedigna respecto a la potencial resistencia a rajaduras bajo carga: Ductilidad tensora tenacidad al impacto Charpy-V micro estructura del metal de aporte y tenacidad a rotura dinámica. En este contexto, la resistencia al punto cedente y a la tracción del metal aportado eran de importancia secundaria.

3.2 Ductilidad

La ductibilidad fue determinada por elongación hasta rotura mediante una prueba de tracción. Probetas de 5,9 mm de diámetro que estaban ubicadas en el metal de soldadura y orientadas en la que estaban ubicadas en el metal de soldadura y orientadas en la dirección longitudinal de la soldadura, se condujo las pruebas de tracción de acuerdo con ASTM E8-81. Fueron determinados los valores de elongación desde un largo medido de cuatro diámetros.

Los resultados de las pruebas de tracción se presentan en las Tablas N°4 y 5. Un valor crítico de referencia de 25%, que representa el nivel mínimo de elongación para asegurar un probable éxito en las pruebas de impacto por explosión, fue alcanzado tomando en consideración la extensa experiencia de las pruebas para NAVSEA. Se ha notado que este valor de referencia excede fuertemente la elongación mínima de 20% especificada para los electrodos AWS E 110.18M frecuentemente usados para la soldadura del HY-80

3.3 Energía de Impacto con Entalladura Charpy - V

Fueron cortadas probetas de impacto Charpy-V en forma transversal a la soldadura y dentro de 3 mm desde la superficie de la soldadura con la entalladura normal a la cara. De esta manera la entalladura sirvió de muestra para varios pases simultáneamente, ya que la fractura avanzaba en la dirección de la soldadura, produciendo así un efecto promedio, las pruebas Charpy se hicieron de acuerdo con ASTM E23-81, usando probetas por triplicado donde era posible, la temperatura de ensayo fue de -50°C, los resultados se encuentran en las tablas correspondientes.

3.4 Dureza de las Zonas Afectadas por el Calor en el Metal de Soldadura y el Metal Base.

En los cupones de ensayo se hizo un trazado de dureza en una sección transversal atacada a lo largo de una línea de 3 mm de distancia desde ambas superficies de la plancha. Esto se hizo para medir el grado de endurecimiento de la zona afectada por el calor del metal base y controlar si había alguna discontinuidad severa, que podría imponer una tensión

indeseablemente concentrada durante la carga de impacto y deformación de las planchas soldadas. Se hicieron controles confirmatorios de chequeo adicional en otro sitio de la micro estructura, si resultaba necesario.

3.5 Consideraciones Prácticas para la Soldadura

El electrodo E 9018-M ha sido identificado por el soldador comercial como el de más fácil uso, con características de un flujo particularmente libre y con poca salpicadura.

En total los resultados demostraron que el electrodo E 9018-M cumplía con los requisitos para las propiedades mecánicas, de manera que en caso de un bien conceptualizado procedimiento de soldadura, había razón para creer que tal soldadura podría sobrevivir una prueba de impacto y aún de pandeo por explosión.

IV.- EVALUACION METALURGICA DEL CONSUMIBLE

Para evaluar en forma más completa el electrodo, se trató de identificar aquellos factores de composición y micro estructura que contribuían a las diferencias en las propiedades mecánicas finales. En vista de que el estado actual de conocimientos no permite la predicción desde los primeros principios de los valores absolutos de estos niveles generalmente altos de las propiedades, esta evaluación es más bien explicativa que cuantitativa. De manera que el primer acercamiento ha sido determinar la óptima composición y micro estructura que proporcionan la ductilidad del punto de referencia y tenacidad en el rango deseado de límites elástico de 565 - 650 MPa a 20°C.

Las desviaciones de la composición química, estructura y propiedades fueron entonces correlacionadas en base a la información disponible con la finalidad de identificar las posibles causas y efectos. Mientras se puede clasificar de esta manera la resistencia y tenacidad, es muy difícil hacerlo con la ductilidad, tomándose como referencia indicativa que la ductilidad varía directamente con la tenacidad e inversamente con la resistencia y dureza.

Las dos principales zonas micro estructurales presentes en el metal de soldadura de múltiples pases son el metal de aporte en estado depositado y aquella parte del cordón en estado depositado que es recalentada por los pases subsecuentes para dar una zona sustancialmente recristalizada. Por lo general, es el metal de aporte depositado que limita la tenacidad y ductilidad total del metal de soldadura en HY-80, siendo la excepción Nb y V, ya que estos elementos pueden ocasionar un segundo endurecimiento por el recalentamiento.

La siguiente discusión se concentra, por esta razón, principalmente en las micro estructuras en estado depositado.

La óptima micro estructura en estado depositado consiste, como se deduce del presente trabajo y otros, de ferrita acicular en forma de finos granos estrechamente entrelazados. Dentro de los anteriores granos de austenita deberían encontrarse, en un mínimo, los otros constituyentes, como por ejemplo los granos gruesos o alineados de ferrita con carburo de segunda fase de varias morfologías (incluyendo bainita), agregados finos de ferrita-carburo, martensita y secciones de austenita retenida. En estas soldaduras casi siempre está presente ferrita proeutectoide, distribuida principalmente en los bordes de los granos anteriormente de austenita. El crecimiento de placas laterales de ferrita desde este material en el límite de grano es indeseable.

La micro estructura más cercana a la óptima consiste de ferrita acicular uniformemente fina y entrelazada, en donde los granos se encontraban en los numerosos planos habituales y con pocas regiones de granos gruesos alineados. Bajo el microscopio óptico, esta micro estructura tenía un aspecto “limpio” de ataque característico, presentando en los ensayos mecánicos buena ductilidad y tenacidad, se mejorarían más aún las propiedades mecánicas reduciendo los ligeros excesos en ferrita proeutectoide gruesa.

A pesar de los buenos niveles de Mn y Ni; Si y Mo, así como una micro estructura generalmente fina, un 40% de la micro estructura de ferrita consiste en granos alineados alargados con abundancia de partículas de carburo que le confieren resistencia.

V.- CONCLUSIONES

1.- Se ha preparado un procedimiento de soldadura para la reparación de una estructura fabricada con planchas de acero HY-80, con el deseo de obtener una máxima resistencia, tenacidad, bajo cargas de impacto. Se emplea una técnica de cordón longitudinal (de arrastre) con limitada entrada de calor y el templado de todos los pases, con excepción de los pases de pie y central de la capa cubierta final. El perfil de soldadura como “top-hat” (recubrimiento en forma de sombrero) asegura que los pases no templados del pie, tendrán menor posibilidad de ocasionar rajaduras a través de todo el espesor.

2.- El examen de dos tipos de electrodos de bajo hidrógeno apropiados para la soldadura de HY-80 mediante el proceso de soldadura de arco eléctrico manual, ha revelado que un electrodo de calidad máxima AWS-E 9018-M, es el tipo indicado para la presente aplicación. Con este electrodo, el metal en estado depositado satisface los valores del punto de referencia

para la ductilidad, la tenacidad al impacto Charpy así como la tenacidad a la fractura dinámica necesarias para tener una buena chance de pasar las pruebas de impacto y de pandeo por explosión a las que se someten este tipo de materiales cuando se emplean en construcciones navales.

3.- La combinación de óptimo electrodo y un procedimiento de soldadura a la medida, ha proporcionado la clave para entrenamiento, calificación y selección de soldadores y pasar las pruebas exigentes de clasificación. Esto representa el resultado del esfuerzo, intercambio de experiencias de trabajo en equipo.

4.- Todo esto representa el haber señalado el camino de aplicación de un proceso, empleo de un electrodo del tipo revisado AWS - E 9018-M adoptado para la soldadura manual SMA en reparaciones de estructuras fabricadas con acero HY-80, de construcciones navales, submarinos y recipientes de alta presión.

VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.- "Factors Affecting The Notch Toughness Properties Of High Strength HY-80 Weldments". J.T. McGrath, J.A. Gianetto, R.F. Orr and M.W. Letts Canadian Metallurgical Quarterly- Vol. 25, N°4, 1986.

2.- "Basic Rules and Guidelines for Maintenance and Repair Welding on HY-80 and STS Steels"- Navships - 250 - 634-5, 1964

3.- "Soldabilidad de los Aceros de Baja Aleación"- Metalurgia de la Soldadura.- Daniel Seferian.- Editorial TECNOS S.A.- 1962

4.- "Soldadura de aceros de Baja Aleación"- Soldadura, Prácticas y Aplicaciones. Henry Horwitz, Editorial Omega - 1976 5.- "Improved Properties in Welded HY-80 Steel for Australian Warships". J.C. Ritter and B.F. Dixon. Welding Journal, March 1987.

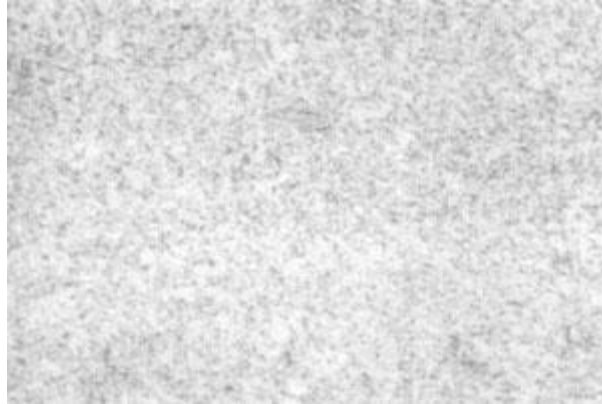
6.- "Control of Distortion of Welded Steel Structures" J. Puchaicela. Welding Journal - August 1998.

7.- "Templabilidad y Soldabilidad de los Aceros" Boletín Técnico de Soldadura N° 82, EXSA. S.A - División Soldaduras.

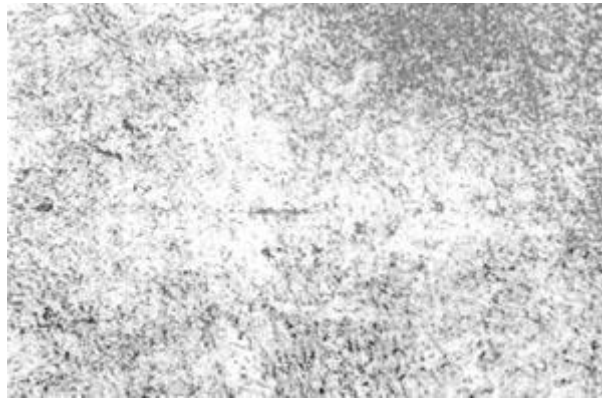
8.- "Welding Processes"- Welding Handbook. Vol-2, Eight Edition. American Welding Society.

ANEXOS

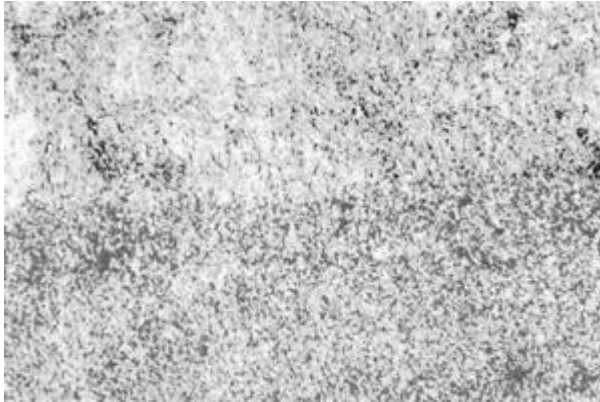
GALERÍA DE MICROFOTOGRAFÍAS



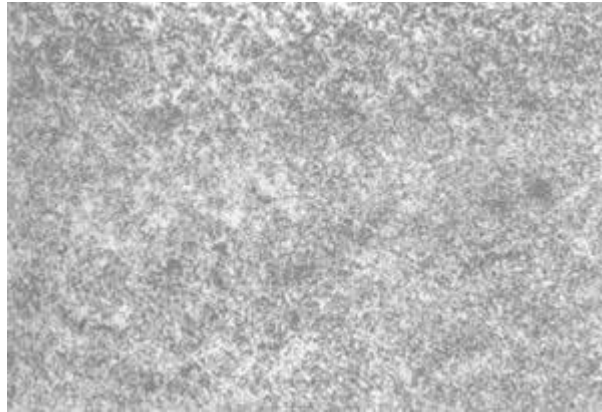
Microfotografía N° 1.- Material Base, fuera de la zona afectada por el calor. Estructura, Martensita revenida. 200 X - Ataque con Nital



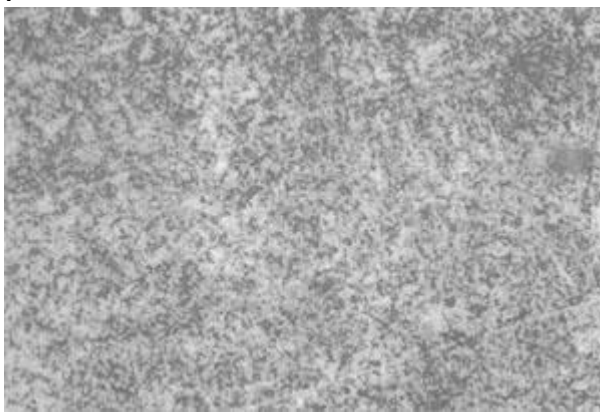
Microfotografía N° 2.- Cerca a la ZAC, interfase con el metal base. Pequeños Carburos oscuros, Ferrita proeutectoide-Ferrita acicular en una matriz de Martensita revenida. 200-X y ataque con Nital.



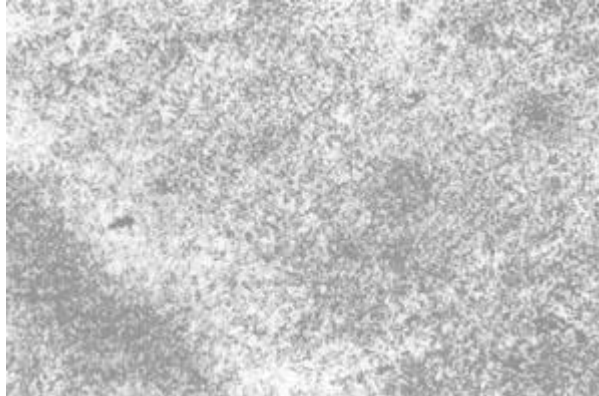
Microfotografía N° 3.- ZAC, Bainita revenida, Ferrita proeutectoide en los límites de la interfase, Ferrita acicular, algunos carburos.



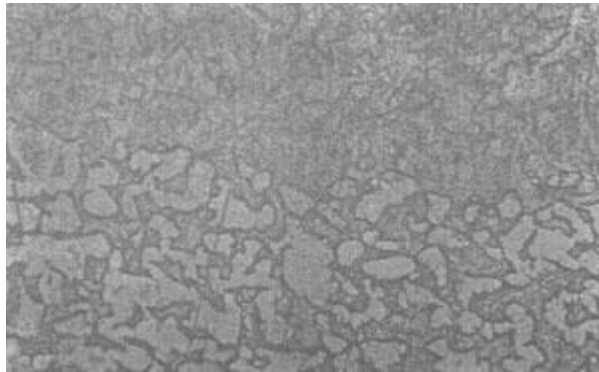
Microfotografía N° 4.- ZAC. Martensita revenida con lago de Austenita retenida



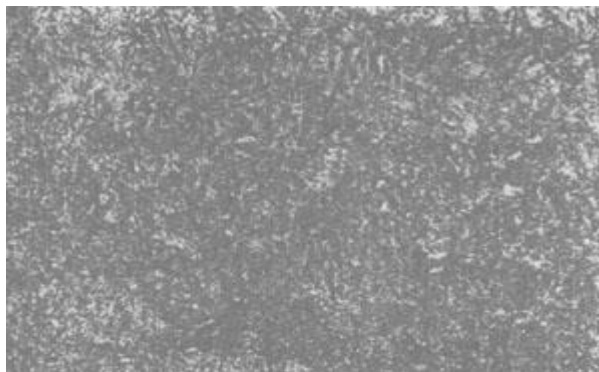
Microfotografía N° 5.- Límite de la ZAC con metal base, Bainita, con Ferrita y Perlita.



Microfotografía N° 6.- Zona de difusión, Martensita con algunos carburos.



Microfotografía N° 7.- Réplica metalográfica tomada in situ, después de soldar, muestra la ZAC, Perlita con Ferrita.



Microfotografía N° 8.- Réplica mecanográfica, tomada in situ, muestra la soldadura, estructura Martensítica.

| Tabla N° 1.- Composición Química del Material Base HY-80 | | | | | | | | | |
|---|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| % C | % Mn | % Si | % P | % S | % Ni | % Cr | % Mo | % Cu | % V |
| 0,17 | 0,30 | 0,19 | 0,007 | 0,014 | 2,59 | 1,53 | 0,42 | 0,03 | 0,01 |
| 0,14 | 0,25 | 0,21 | 0,007 | 0,011 | 2,59 | 1,52 | 0,45 | 0,04 | 0,01 |

| Tabla N° 2.- Análisis Químico de los Consumibles | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| Tipo | % c | % Mn | % Si | % P | % S | % Ni | % Cr | % Mo | % cu | |
| E110.18G | 0,10 | 1,51 | 0,32 | 0,018 | 0,008 | 1,90 | 0,49 | 0,37 | 0,06 | 0,005 |
| | 0,60 | 1,71 | 0,32 | 0,013 | 0,006 | 1,80 | 0,15 | 0,40 | 0,02 | 0,026 |
| | | | | | | | | | | |
| E 9018-M | 0,07 | 1,04 | 0,38 | 0,022 | 0,009 | 1,80 | 0,12 | 0,32 | 0,02 | 0,024 |
| | 0,10 | 1,24 | 0,44 | 0,013 | 0,007 | 1,70 | 0,13 | 0,40 | 0,02 | 0,017 |

| Tabla N° 3.- Ensayos de Tracción en Metal de Soldura Depositado. | | | | |
|---|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Tipo | Límite de Resistencia elástica Mpa | Límite de Resistencia elástica Mpa | Elongación en 4" Diám. % | Reducción en área % |
| E 100.18 G | 685 | 823 | 20,5 | 62 |
| | 694 | 753 | 21,5 | 63 |
| E 9018-M | 696 | 843 | 24,5 | 65 |
| | 605 | 713 | 28,5 | 68 |

| Tabla N° 4.- Ensayos de Calificación de Procedimiento-Soldadores HY 80 | | | | | | |
|---|------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------|
| Probeta N° | Área Pulg2 | Resistencia a la Tracción | | Resistencia a la Fluencia | | Observaciones |
| | | Kg/mm2 | N/mm2 | Kg/mm2 | N/mm2 | |
| 1V-P4 | 0,7215 | 778 | | | | Rompió en |

| | | | | | | |
|--------|--------|-----|--|--|--|----------------------|
| | | | | | | metal base |
| 1V-P8 | 0,7084 | 774 | | | | Rompió en metal base |
| 4SC-P4 | 0,6977 | 781 | | | | Rompió en metal base |
| 4SC-P8 | 0,6827 | 772 | | | | Rompió en metal base |

Tabla N° 5.- Pruebas de Impacto Ensayos de calificación de Procedimiento Soldadores

| Probeta N° | Muestra 1 Joule | Muestra 2 Joule | Muestra 3 Joule |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1V-C | 75,9 | 75,9 | 75,9 |
| 1V-L | 65,1 | 65,1 | 84,1 |
| 1V-Z | 208,1 | 252,1 | 138,2 |
| 4SC-C | 62,4 | 73,2 | 75,9 |
| 4SC-C | 89,5 | 103 | 97,6 |
| 4SC-C | 244 | 268,4 | 268,4 |

Tabla N° 6.- Ensayo de Dureza - Calificación de Procedimiento

| Lado Izquierdo | | | | Lado Derecho | | | |
|----------------|-----|-----|--------|--------------|-----|-----|--------|
| Punto N° | HV | HRC | d (mm) | Punto N° | HV | HRC | D (mm) |
| 10 | 243 | 23 | 24,1 | 1 | 304 | 32 | 3 |
| 9 | 243 | 23 | 21,6 | 2 | 279 | 6,3 | |
| 8 | 262 | 26 | 18,4 | 3 | 290 | 30 | 9,8 |
| 7 | 429 | 43 | 16,7 | 4 | 327 | 34 | 12,2 |
| 6 | 401 | 41 | 15,2 | 5 | 450 | 45 | 13,7 |
| 5 | 292 | 31 | 13,5 | 6 | 405 | 41 | 16,4 |
| 4 | 354 | 36 | 11,6 | 7 | 268 | 25 | 18,3 |
| 3 | 311 | 33 | 9,6 | 8 | 262 | 26 | 20,3 |
| 2 | 294 | 31 | 5,1 | 9 | 262 | 26 | 23,3 |

| | | | | | | | |
|---|-----|----|-----|----|-----|----|------|
| 1 | 297 | 31 | 2,7 | 10 | 258 | 25 | 27,5 |
| 0 | 281 | 29 | 0 | | | | |

