



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS

**“USO DEL FUNDENTE CELULÓSICO, CON PORCENTAJE
DE HUMEDAD DEL 12.5%, EN LA SOLDADURA DE
ACERO PARA TUBERIA API X-60, UNIDA POR EL
PROCESO DE SOLDADURA CON ARCO SUMERGIDO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES

PRESENTA

ING. ANGEL CASCO HERNÁNDEZ

ASESOR:

DR. RAFAEL GARCÍA HERNÁNDEZ

Morelia Michoacán, Agosto 2011

AGRADECIMIENTOS.

- ❖ Agradezco a mis padres por haberme apoyado en todo momento, por impulsarme a seguir adelante en mis estudios, les agradezco mucho Agustina Hernández Coronel y Raymundo Vázquez Miranda.

- ❖ A mi esposa e hijo Argelia y Angelito les agradezco por haber estado en esta etapa de mi vida y estudios conmigo.

- ❖ A mis hermanos por cuestionarme durante los estudios de maestría.

- ❖ A Marco Arturo López y Vanian Granados por haberme acompañado durante la maestría y asesorarlos para la elaboración de sus tesis.

- ❖ A mis amigos y compañeros de generación por haber compartido esta etapa de mi vida.

- ❖ A mi asesor el Dr. Rafael García Hernández por haberme asesorado e instruido en estos estudios.

RESUMEN

En la actualidad se presentan diversos problemas para la industria de la soldadura, muchos de ellos enfocados a la eficiencia y mejoramiento de las propiedades mecánicas en los elementos unidos por soldadura. Por mucho tiempo se ha manejado que el hidrógeno es perjudicial para la soldadura y es por esta razón que en esta investigación se marca la pauta de que no es así, siempre y cuando se maneje de manera apropiada la cantidad de hidrógeno en el proceso de soldadura. En este proyecto de investigación se busco modificar un método de soldadura ya existente con el fin de cambiar el concepto del perjuicio del hidrógeno sobre los elementos unidos por soldadura, para lo cual se utilizaron placas de acero con la denominación API 5L X-60 de media pulgada de espesor, las cuales se unieron por el método de soldadura denominado arco sumergido SAW (Submerged Arc Welding), utilizando un fundente de tipo celulósico extraído del revestimiento de los electrodos E6010, que pertenecen a la familia de los electrodos celulósicos.

El acero que se seleccionó es debido a que en la industria de los hidrocarburos es muy utilizado por su bajo contenido de carbono y su grado de soldabilidad. Este proyecto de investigación se comparara con el fundente F70A tradicional, al fundente extraído se le agregó 12.5 % de humedad, esto con el fin de que al momento de efectuarse el arco eléctrico en la depositación de los cordones, la soldadura disocia la molécula del agua H_2O en conjunto con la molécula de la celulosa del fundente $C_6H_{10}O_5$ y aprovechando la conductividad térmica del hidrógeno se logra una extracción de calor, esto anteriormente se hizo con electrodos E6010 con 100% de humedad, lo cual da un refinamiento de grano uniformemente en la zona afectada térmicamente (ZAT), como se mostrará en las micrografías obtenidas de los análisis de microscopía óptica.

Posteriormente se hizo la extracción de probetas para analizarlas por métodos metalográficos, microscopía óptica y de barrido así como ensayos de microdureza, de tensión e impacto para determinar las propiedades mecánicas obtenidas. Logrando así un aumento en la tenacidad y una mejora en el refinamiento de grano.

Abstract

Actually there are several problems in the welding industry, some of them focused on efficiency and improving of the mechanical properties of the weld and heat affected zone. For a long time the hydrogen has been considered as detrimental in the welds of all kind of metallic materials. For this reason, the development of the present research project has been performed different aspects considering of welding, as subacoustic welding and coated electrode with 100% of humidity, which have been reported in the literature.

The experimental procedure of this project was carried out using the submerge arc welding process with cellulosic flux with 12.5% of humidity to weld API 5L-X-60 tube steel, and compare with weld obtained with F70A traditional flux without humidity. The cellulosic flux was extracted from the E6010 coated electrodes. The API 5L X-60 steel is widely use in the oil industry by its mechanical properties, microstructure and good weldability.

The use of cellulosic flux with 12.5% of humidity in the API 5L X-60 weld was with propose to prove that the hydrogen in some steels not have any problems in welds and their heat affected zones, taken in consideration the principal aspects of the subacoustic welding and coated electrodes with 100% of humidity as was described up. Which was corroborated in this project and improve the tensile mechanical properties, compare with F70A flux weld deposited in the same steel.

INDICE

Contenido

LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABLAS.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
Elementos.....	7
Función eléctrica del recubrimiento	8
Función metalúrgica de los recubrimientos.....	9
TIPOS DE SOLDADURA.....	9
Soldadura por arco manual con electrodo revestido.....	9
SOLDADURA POR ELECTRODO NO CONSUMIBLE PROTEGIDO	11
SOLDADURA CON ELECTRODO METÁLICO CONSUMIBLE PROTEGIDO CON GAS (GMAW).....	13
SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO	14
JUSTIFICACION.	15
OBJETIVO GENERAL.....	16
OBJETIVO PARTICULAR.....	16
HIPÓTESIS	16
CAPITULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
1.1 ANTECEDENTES	17
1.2 Tratamientos térmicos.	26
1.3 Mejora de las propiedades a través del tratamiento térmico	26
1.4 Propiedades mecánicas del acero.....	28
1.5 Problemática de soldaduras en contacto con hidrógeno	29
1.6 Materiales comúnmente aceptados	32
1.6.1 Materiales metálicos.....	32
1.7 Prevención de fragilización por hidrógeno	33
1.8 EL EQUIPO DE SOLDADURA.....	34
1.9 Descripción del proceso	37
1.10 CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS SEGÚN AWS.....	38
CAPÍTULO II. Desarrollo experimental.....	40
2.1 Selección de parámetros para la realización de las juntas a unir	40

2.2 Dimensiones y preparación de las juntas.....	41
2.3 Composición química del acero y material de aporte	42
2.4 Equipo de soldadura y variables operativas.....	43
2.5 Mecanismo de velocidad de enfriamiento.....	46
2.6 Análisis metalográfico	48
2.7 Ensayos mecánicos.....	48
CAPITULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
3.1 Caracterización del metal base	53
3.1.1 Microestructura del metal base.....	53
3.2 Discusión de las micrografías del fundente celulósico y tradicional.....	55
3.3 Ensayo de impacto	63
3.4 Imágenes de microscopia de barrido.....	63
CONCLUSIONES	65
EXPECTATIVAS A FUTURO.	66
BIBLIOGRAFIA.....	67

LISTA DE FIGURAS

Num.	Nombre de figura	pag.
1.1	Macrografías de un acero A36	19
1.2	Unión en acero A36 con electrodos de revestimiento celulósico.	20
1.3	Propiedades termodinámicas del hidrógeno.	21
1.4	Efecto del hidrógeno en función de la presión hidrostática.	22
1.5	Gráfica de esfuerzos cíclicos.	23
1.6	Aspecto de las grietas causadas por el hidrógeno.	24
1.7	Refinamiento de grano de una soldadura A36.	25
1.8	Diagrama hierro-carbono.	27
1.9	Cambio de microestructura del acero de acuerdo a la temperatura.	28
1.10	Soldadura por arco sumergido.	35
1.11	Representación esquemática de la soldadura por arco sumergido.	37
2	Perfil de preparación de las placas para soldar.	41
2.1	Configuración de las placas soldadas.	41
2.2	Soldadura por arco sumergido.	43
2.3	Placas unidas por arco sumergido.	44
2.4	Adherencia del agua en un objeto.	45
2.5	Disociación de la molécula de agua.	46
2.6	Seccionamiento de las probetas para ensayos metalográficos	47
2.7	Configuración de probetas para tensión.	48
2.8	Dimensionamiento para probetas de tensión.	49
2.9	Maquina charphy para ensayos de impacto.	50
2.10	Configuración para probetas de impacto.	51
2.11	Esquematzación de dimensionamiento para probetas de impacto	51
2.12	Esquematzación de probetas para ensayos con fundente celulósico.	52
2.13	Configuración de probetas para ensayos con fundente Tradicional.	52
3.1	Microestructura de material base.	53
3.2	Macros para ensayos de microdureza.	54
3.3	Microestructuras de interface.	55
3.4	Microestructuras de refinamiento de grano.	56
3.5	Microestructuras de cordones sin afectación térmicas.	56
3.6	Zona afectada térmicamente del cordón de soldadura, material base y últimocordón.	57
3.7	Zona afectada térmicamente entre material base y cordón de soldadura.	58
3.8	Gráficas de microdureza.	59
3.9	Ensayos de tensión probetas con fundente celulósico.	61

3.10	Ensayos de tensión probetas con fundente tradicional.	61
3.11	Ensayos de tensión probetas metal base.	62
3.12	Fractura en probeta con fundente celulósico.	63
3.13	Fractura en probeta con fundente tradicional.	64
3.14	Fractura en probeta metal base.	64

LISTA DE TABLAS

Num.	Nombre de la tabla	pag.
2.1	Composición química del acero X 60 y electrodo de alambre.	39
2.2	Cordones depositados y sus variables operativas.	40
3	Valores de ensayos a tensión.	60
3.1	Energía absorbida en probetas de impacto.	64

INTRODUCCIÓN.

En la historia del hombre siempre, se ha distinguido éste por destacar y sobresalir en todos los aspectos, grandes avances se han logrado en la industria de la ingeniería.

Sin duda una de las principales ambiciones ha sido el crear grandes obras por medio de la unión de diferentes piezas, lo cual se ha denominado la industria de la unión soldada, la cual ha tenido un gran auge por unir piezas no solo del mismo tipo de material sino de hacer uniones a las que se les llaman disímiles y esto ha contribuido a que el hombre haga estudios cada día más extensos sobre materiales y su forma de unirlos.

El sistema de soldadura eléctrica con electrodo recubierto se caracteriza, por la creación y mantenimiento de un arco eléctrico entre una varilla metálica llamada electrodo y la pieza a soldar. El electrodo recubierto está constituido por una varilla metálica a la que se le da el nombre de alma o núcleo, generalmente de forma cilíndrica, recubierta de un revestimiento de óxidos metálicos en lo general, cuya composición química puede ser muy variada, según las características que se requieran en su aplicación. El revestimiento puede ser básico, rútilico y celulósico. Para realizar una soldadura por arco eléctrico se induce una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a soldar, con lo cual se ionizan los gases entre ellos y pasa a ser conductor, de modo que se cierra el circuito. El calor del arco funde parcialmente el material base y funde el material de aporte, el cual se deposita y crea el cordón de soldadura.

La soldadura por arco eléctrico es utilizada comúnmente debido a la facilidad de transporte y a la economía de dicho proceso.

Elementos

- **Plasma:** Está compuesto por electrones que transportan la corriente y que van del polo negativo al positivo; de iones metálicos que van del polo positivo al negativo; así mismo, de átomos gaseosos que se van ionizando y estabilizándose conforme pierden o ganan electrones; y de productos de la fusión tales como vapores que ayudarán a la formación de una atmósfera protectora. Esta zona alcanza la mayor temperatura del proceso.
- **Flama:** Es la zona que envuelve al plasma y presenta menor temperatura que éste, formada por átomos que se disocian y recombinan

desprendiendo calor por la combustión del revestimiento del electrodo. Otorga al arco eléctrico su forma cónica.

- Baño metálico: La acción calorífica del arco provoca la fusión del material, donde parte de éste se mezcla con el material de aportación del electrodo, provocando la soldadura de las piezas una vez solidificado.
- Cordón de soldadura: Está constituido por el metal base y el material de aportación del electrodo y se pueden diferenciar dos partes: la escoria, compuesta por impurezas que son segregadas durante la solidificación y que posteriormente son eliminadas, y el sobre espesor, formado por la parte útil del material de aportación y parte del metal base, que es lo que compone la soldadura en sí.
- Electrodo: Son varillas metálicas preparadas para servir como un polo del circuito; en su extremo se genera el arco eléctrico. En algunos casos, sirven también como material fundente. La varilla metálica a menudo va recubierta por una combinación de materiales que varían de un electrodo a otro. El recubrimiento en los electrodos tiene diversa funciones, éstas pueden resumirse en las siguientes funciones:
 - Función eléctrica del recubrimiento
 - Función física de la escoria
 - Función metalúrgica del recubrimiento

Función eléctrica del recubrimiento

La estabilidad del arco para la soldadura depende de una amplia serie de factores como es la ionización de los gases para que fluya adecuadamente la electricidad. Para lograr una buena ionización se añaden al revestimiento del electrodo productos químicos denominados sales de sodio, potasio y bario los cuales tienen una tensión de ionización baja y un poder termoiónico elevado. El recubrimiento, también contiene en su composición química productos como los silicatos, los carbonatos, los óxidos de hierro y óxidos de titanio que favorecen la función física de los electrodos, que facilitan la soldadura en las diversas posiciones de ejecución de la soldadura.

Función metalúrgica de los recubrimientos

Además de las funciones de estabilizar y facilitar el funcionamiento eléctrico del arco y de contribuir físicamente a la mejor formación del cordón de soldadura, el recubrimiento tiene una importancia decisiva en la calidad de la soldadura. Una de las principales funciones metalúrgicas de los recubrimientos de los electrodos es proteger el metal de la oxidación, primero aislándolo de la atmósfera oxidante que rodea al arco y después recubriéndolo con una capa de escoria mientras se enfría y solidifica.

TIPOS DE SOLDADURA

Soldadura por arco manual con electrodo revestido

Electrodos revestidos.

La característica más importante de la soldadura con electrodo revestido, en inglés *Shield Metal ArcWelding* (SMAW) o *Manual Metal ArcWelding* (MMAW), es que el arco eléctrico se produce entre la pieza y un electrodo metálico recubierto. El recubrimiento protege el interior del electrodo hasta el momento de la fusión. Con el calor del arco, el extremo del electrodo funde y se quema el recubrimiento, de modo que se obtiene la atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de metal fundido desde el núcleo del electrodo hasta el baño de fusión en el material base. Además los electrodos en soldadura sirven para soldaduras de diferentes materiales. Por otra parte las gotas de metal fundido caen recubiertas de escoria fundida procedente de la fusión del recubrimiento del arco. La escoria flota en la superficie y forma, por encima del cordón de soldadura, una capa protectora del metal fundido.

Como son los propios electrodos los que aportan el flujo del metal fundido, será necesario reponerlos cuando se desgasten. Los electrodos están compuestos de dos piezas: el alma y el revestimiento.

El alma o varilla es alambre (de diámetro original 5.5 mm) que se comercializa en rollos continuos. Tras obtener el material, el fabricante lo decapa mecánicamente (a fin de eliminar el óxido y aumentar la pureza) y posteriormente lo trefila para reducir su diámetro.

El revestimiento se produce mediante la combinación de una gran variedad de elementos (minerales varios, celulosa, óxidos metálicos, aleaciones, etc.)

convenientemente seleccionados y probados por los fabricantes, que mantienen el proceso, cantidades y dosificaciones en riguroso secreto.

La composición y clasificación de cada tipo de electrodo está regulada por la AWS (*American Welding Society*), organismo de referencia mundial en el ámbito de la soldadura.

Este tipo de soldaduras pueden ser efectuados bajo corriente tanto continua como alterna. En corriente continua el arco es más estable y fácil de encender y las salpicaduras son poco frecuentes; en cambio, el método es poco eficaz con soldaduras de piezas gruesas. La corriente alterna posibilita el uso de electrodos de mayor diámetro, con lo que el rendimiento a mayor escala también aumenta. En cualquier caso, las intensidades de corriente oscilan entre 70 y 500 amperios.

El factor principal que hace de este proceso de soldadura un método tan útil es su simplicidad y, por tanto, su bajo precio. A pesar de la gran variedad de procesos de soldadura disponibles, la soldadura con electrodo revestido no ha sido desplazada del mercado. La sencillez hace de ella un procedimiento práctico; todo lo que necesita un soldador para trabajar es una fuente de alimentación, cables, un portaelectrodo y electrodos. El soldador no tiene que estar junto a la fuente y no hay necesidad de utilizar gases comprimidos como protección. El procedimiento es excelente para trabajos, reparación, fabricación y construcción. Además, la soldadura SMAW es muy versátil. Su campo de aplicaciones es enorme: casi todos los trabajos de pequeña y mediana soldadura de taller se efectúan con electrodo revestido; se puede soldar metal de casi cualquier espesor y se pueden hacer uniones de cualquier tipo.

Sin embargo, el procedimiento de soldadura con electrodo revestido no se presta para su automatización o semiautomatización; su aplicación es esencialmente manual. La longitud de los electrodos es relativamente corta: de 230 a 700 mm. Por lo tanto, es un proceso principalmente para soldadura a pequeña escala. El soldador tiene que interrumpir el trabajo a intervalos regulares para cambiar el electrodo y debe limpiar el punto de inicio antes de empezar a usar electrodo nuevo. Sin embargo, aun con todo este tiempo muerto y de preparación, un soldador eficiente puede ser muy productivo.

El objetivo de la explicación sobre el proceso de soldadura con electrodo revestido es con la finalidad de hacer una referencia de este proceso de unión, ya que el fundente utilizado para la realización del presente proyecto de tesis,

procede del revestimiento de los electrodos celulósicos, ya que no se fabrica comercialmente.

SOLDADURA POR ELECTRODO NO CONSUMIBLE PROTEGIDO

El objetivo fundamental, en cualquier operación de soldadura es el de conseguir una junta con las mismas características del metal base. Este resultado sólo puede obtenerse si el baño de fusión está completamente aislado de la atmósfera durante toda la operación de soldadura. De no ser así, tanto el oxígeno como el nitrógeno del aire serán absorbidos por el metal en estado de fusión y la soldadura quedará porosa y frágil. En este tipo de soldadura se utiliza como medio de protección un chorro de gas que impide la contaminación de la junta. Tanto este como el siguiente proceso de soldeo tienen en común la protección del electrodo por medio de dicho gas. La soldadura por electrodo no consumible, también llamada Soldadura TIG (siglas de *Tungsten Inert Gas*), se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente que normalmente, como indica el nombre, es de tungsteno.

Este método de soldadura se patentó en 1920 pero no se empezó a utilizar de manera generalizada hasta 1940, dado su costo y complejidad técnica.

A diferencia con las soldaduras de electrodo consumible, en este caso el metal que formará el cordón de soldadura debe ser añadido externamente, a no ser que las piezas a soldar sean específicamente delgadas y no sea necesario. El metal de aportación debe ser de la misma composición o similar que el metal base; incluso, en algunos casos, puede utilizarse satisfactoriamente como material de aportación una tira obtenida de las propias placas a soldar.

La inyección del gas a la zona de la unión se consigue mediante una canalización que llega directamente a la punta del electrodo, rodeándolo. Dada la elevada resistencia a la temperatura del tungsteno (funde a 3410 °C), acompañada de la protección del gas, la punta del electrodo apenas se desgasta tras un uso prolongado. Es conveniente, revisar la terminación en punta, ya que una geometría poco adecuada perjudicaría en gran medida la calidad de la soldadura. Respecto al gas de protección los más utilizados son el argón, el helio, y mezclas de ambos. El helio, gas noble (inerte, de ahí el nombre de soldadura por gas inerte) es más usado en los Estados Unidos, dado que allí se obtiene de forma económica en yacimientos de gas natural. Este gas deja un cordón de soldadura más plano y menos profundo que el argón. Este último, más utilizado en Europa por su bajo precio en comparación con el helio, deja

un cordón más abultado y que se infiltra en la soldadura. Una mezcla de ambos gases proporcionará un cordón de soldadura con características intermedias entre los dos. La soldadura TIG se trabaja con corrientes continua y alterna.

Con corriente continua y polaridad directa, las intensidades de corriente son del orden de 50 a 500 amperios. Con esta polarización se consigue mayor penetración y un aumento en la duración del electrodo. Con polarización inversa, el baño de fusión es mayor pero hay menor penetración; las intensidades oscilan entre ± 5 y 60 A. La corriente alterna combina las ventajas de las dos anteriores, pero se debe utilizar alta frecuencia para ciertos materiales.

La gran ventaja de este método de soldadura es, básicamente, la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos, ya que el gas protector impide el contacto entre la atmósfera y el baño. Además, dicho gas simplifica notablemente la soldadura de metales no ferrosos, por no requerir el empleo de desoxidantes, con las deformaciones o inclusiones de escoria que pueden implicar. Otra ventaja de la soldadura por arco con protección gaseosa es la que permite obtener soldaduras limpias y uniformes debido a la escasez de humos y proyecciones; la movilidad del gas que rodea al arco eléctrico permite al soldador ver claramente lo que está haciendo en todo momento, lo que repercute favorablemente en la calidad de la soldadura. El cordón obtenido es por tanto de un buen acabado superficial, que puede mejorarse con sencillas operaciones de acabado, lo que incide favorablemente en los costes de producción. Además, la deformación que se produce en las inmediaciones del cordón de soldadura es menor. Como inconvenientes está la necesidad de proporcionar un flujo continuo de gas, con la subsiguiente instalación de tubería de conducción, etc., y el encarecimiento que supone. Además, este método de soldadura requiere una mano de obra muy especializada, lo que también aumenta los costos. Por tanto, no es uno de los métodos más utilizados sino que se reserva para uniones con necesidades especiales de acabado superficial y precisión, en ciertos materiales como Al, Mg, Ti, aceros inoxidables.

SOLDADURA CON ELECTRODO METÁLICO CONSUMIBLE PROTEGIDO CON GAS (GMAW)

Este método resulta similar al anterior, con la salvedad de que en los dos tipos de soldadura por electrodo consumible protegido, MIG (*Metal Inert Gas*) y MAG (*Metal Active Gas*), el electrodo es consumido y participa como metal de aporte en el cordón de soldadura. El arco eléctrico está protegido, como en el caso anterior, por un flujo continuo de gas que garantiza una unión limpia y en buenas condiciones.

En la soldadura MIG, como su nombre indica, el gas es inerte; no participa en modo alguno en la reacción de soldadura. Su función es proteger la zona crítica de la soldadura de oxidaciones e impurezas exteriores. Se emplean usualmente los mismos gases que en el caso de electrodo no consumible, argón, menos frecuentemente helio, y mezcla de ambos.

En la soldadura MAG, en cambio, el gas utilizado participa de forma activa en la soldadura. Su zona de influencia puede ser oxidante o reductora, ya sea que se utilicen gases como el dióxido de carbono o el argón mezclado con oxígeno. El problema de usar CO₂ en la soldadura es que la unión resultante, debido al oxígeno liberado, resulta muy porosa. Además, sólo se puede usar para soldar acero, por lo que su uso queda restringido a las ocasiones en las que es necesario soldar grandes cantidades de material y en las que la porosidad resultante no es un problema a tener en cuenta.

El uso de los métodos de soldadura MIG y MAG es cada vez más frecuente en el sector industrial. En la actualidad, es uno de los métodos más utilizados en Europa occidental, Estados Unidos y Japón en soldaduras de fábrica. Ello se debe, entre otras cosas, a su elevada productividad y a la facilidad de automatización, lo que le ha valido abrirse una oportunidad en la industria automovilística. La flexibilidad es la característica más sobresaliente del método MIG / MAG, ya que permite soldar aceros de baja aleación, aceros inoxidable, aluminio y cobre, en espesores a partir de los 0,5 mm y en todas las posiciones. La protección por gas garantiza un cordón de soldadura continuo y uniforme, además libre de impurezas y escorias. La soldadura MIG / MAG es un método limpio y compatible con todas las medidas de protección para el medio ambiente.

En contra, su mayor problema es la necesidad de aporte tanto de gas como de electrodo, lo que multiplica las posibilidades de fallo del equipo, además del

lógico encarecimiento del proceso. La soldadura MIG/MAG es intrínsecamente más productiva que la soldadura SMAW, donde se pierde productividad cada vez que se produce una parada para reponer el electrodo consumido. Las pérdidas materiales también se producen con la soldadura SMAW, cuando la parte última del electrodo es desechada. Por cada kilogramo de electrodo revestido comprado, alrededor del 65% forma parte del material depositado (el resto es desechado). La utilización de electrodos sólidos y electrodos tubulares ha aumentado esta eficiencia hasta el 80-95%. La soldadura MIG/MAG es un proceso versátil, pudiendo depositar el metal a una gran velocidad y en todas las posiciones. El procedimiento es muy utilizado en espesores delgados y medios, en fabricaciones de acero y estructuras de aleaciones de aluminio, especialmente donde se requiere un gran porcentaje de trabajo manual. La introducción de hilos tubulares está encontrando cada vez más, su aplicación en los espesores grandes que se dan en estructuras de acero pesadas.

SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

El proceso de soldadura por arco sumergido, también llamado proceso SAW (*Submerged Arc Welding*), tiene como detalle más característico el empleo de un flujo continuo de material protector en polvo o granulado, llamado fundente. Estefundente protege el arco eléctrico y el baño de fusión de la atmósfera, de tal forma que ambos permanecen invisibles durante la soldadura. Parte del fundente, y con ello protege y estabiliza el arco eléctrico, genera escoria que aísla el cordón, e incluso puede contribuir a la aleación. El resto del fundente no fundido, se recoge tras el paso del arco para su reutilización. Este proceso está totalmente automatizado y permite obtener grandes rendimientos.

El electrodo de soldadura utilizado es consumible, con lo que no es necesaria aportación externa de material. Se comercializa en forma de alambre, macizo o hueco con núcleo de fundente.

El fundente, o mejor dicho, los fundentes, son mezclas de compuestos minerales varios (SiO_2 , CaO , MnO , etc...) con determinadas características de escorificación, viscosidad, etc. Obviamente, cada fabricante mantiene la composición y el proceso de obtención del fundente en secreto, pero, en general, se clasifican en fundidos (se obtienen por fusión de los elementos), aglomerados (se cohesionan con aglomerantes; cerámicos, silicato de potasio, etc.) y mezclados mecánicamente (simples mezclas de otros fundentes). Ya

que el fundente puede actuar como elemento fundente, la adición en polvo metálico optimiza bastante el proceso, mejora la tenacidad de la unión y evita un indeseable aumento del tamaño de grano en el metal base.

Dependiendo del equipo y del diámetro del alambre del electrodo, este proceso se trabaja con intensidades de hasta 1600 amperios, con corrientes continuas (electrodo positivo y base negativa) o alternas.

Este proceso es bastante versátil; se usa en general para unir metales férricos y sus aleaciones, y para recubrir materiales contra la corrosión. Además, permite la soldadura de piezas con poca separación entre ellas. El arco actúa bajo el fundente, evitando salpicaduras y contaminación del cordón, y alimentándose, si es necesario, del propio fundente, que además evita que el arco se desestabilice por corrientes de aire. La soldadura por arco sumergido puede aplicarse a gran velocidad en posiciones planas, para casi cualquier tipo de material y es altamente automatizable. El cordón obtenido en este proceso es sano y de buen aspecto visual. Una característica mejora del proceso SAW es la soldadura en tándem, mediante la cual se aplican dos electrodos a un mismo cordón de soldadura. Así se aumenta la calidad de la soldadura, ya que uno de los electrodos se encarga de la penetración y el volumen del cordón, mientras que el segundo maneja los parámetros de geometría y tamaño.

En cambio, la mayor limitación de este proceso es que solo puede aplicarse en posiciones planas y cornisa, ya que de otra manera el fundente se derramaría. El fundente que ha de ser continuamente aportado, lo cual encarece el procedimiento y aumenta sus probabilidades de fallo (hay que alimentar tanto el rollo de electrodo como el fundente); además, si se contamina por agentes externos, la calidad del cordón disminuye bastante. A pesar de que puede unir materiales poco separados, no es recomendable para unir espesores menores de 5mm.

Este proceso tiene su mayor campo de aplicación en la fabricación de tuberías de acero en espiral y, en general, en la soldadura de casi cualquier tipo de aceros (especialmente los inoxidables).

JUSTIFICACION.

El desarrollo del presente proyecto de investigación fue con la intención de demostrar que en los procesos de soldadura existentes se pueden obtener resultados favorables con la modificación de los mismos en su forma de operación, al soldar como es el caso del proceso por arco sumergido, el cual se

modificó la forma de usar el fundente sustituyéndolo por fundente celulósico húmedo, con el fin de obtener un conocimiento apropiado sobre el manejo adecuado del hidrógeno o en ciertos materiales y no en forma generalizada.

OBJETIVO GENERAL

Demostrar que los procesos de soldaduras existentes pueden ser modificados en sus características de operación para encontrar mejores conceptos sobre ciertas aplicaciones de los electrodos celulósicos en los elementos soldados y así establecer nuevos procedimientos para soldar en la industria Metal-mecánica.

Así también demostrar que el hidrógeno no es tan perjudicial como actualmente se tiene contemplado manejándolo de forma adecuada en aceros de buen grado de soldabilidad como es el caso del acero API X-60.

OBJETIVO PARTICULAR

Desarrollar un estudio de investigación tomando en cuenta las propiedades que presenta el hidrógeno, que proviene de la celulosa de madera que se encuentra en un 30% en el revestimiento del electrodo, más el hidrógeno que proviene de la absorción de la humedad, tomando en cuenta sus características de conductividad térmica y entalpía, para utilizarlo en beneficio de la tenacidad de la unión soldada y zona afectada térmicamente, Así mismo hacer los estudios correspondientes para determinar las propiedades mecánicas obtenidas por este método de soldadura y corroborar que en ciertos aceros no es tan perjudicial como se tiene el concepto generalizado.

HIPÓTESIS

Esta investigación se basa en el uso del fundente celulósico con un porcentaje de humedad para aprovechar las características del hidrógeno desprendido de la celulosa y de la humedad sobre la microestructura del cordón de soldadura y zona afectada térmicamente. [4]

CAPITULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 ANTECEDENTES

Estudios anteriores sobre el efecto nocivo del hidrógeno en la soldadura, es de uso generalizado y en cierta forma mal utilizado, ya que en la actualidad se utiliza generalmente sin considerar el avance que se ha obtenido en el desarrollo de los aceros de bajo carbono microaleado con Nb, V y Ti, en donde se ha minimizado el uso del porcentaje de carbono de medio porcentaje a bajos porcentajes e incrementando el porcentaje de Mn de medio porcentaje a porcentajes altos, por lo que se han denominado aceros al Mn, microaleados [4]. Lo que ha llevado a obtener aceros al Mn, microaleados con una estructura ferrítica de grano fino, con un 2% de perlita y elevadas propiedades mecánicas excelentes, sin ser afectadas por el hidrógeno, como serían afectados estos aceros hace 30 a 40 años atrás, por contrario en su composición química porcentajes de carbono entre 0.2 – 0.3%C.

Otro aspecto importante es el uso de los electrodos E6010, en la pasada de raíz en soldaduras de multipasadas de acero al carbono y baja aleación, en donde las multipasadas requieren que la pasada de raíz, tenga una excelente tenacidad y penetración para soportar los esfuerzos generados durante las pasadas de soldadura subsiguientes, sin generar defectos como origen de fisuración [2] a pesar de que los electrodos celulósicos en su revestimiento contienen un 30% de celulosa de madera y además hasta un 5% de humedad, la molécula de celulosa contiene la siguiente estequiometría ($C_6H_{10}O_5$).

Lo cual proporciona una cierta cantidad de hidrógeno durante la soldadura sin dañar una soldadura de multipasadas en la soldadura de raíz, por esta razón se puede afirmar que existan contradicciones en cuanto al concepto nocivo del hidrógeno en ciertos aceros soldados. Tal es el caso reportado por R. García y colaboradores [3] quienes utilizando el electrodo E6010, 100% de humedad y 100% seco, realizaron soldadura sobre un acero A36, reportando que las mejores características físicas y metalúrgicas así como propiedades mecánicas fueron obtenidas en la soldadura obtenida con el electrodo E6010 con 100% de humedad ya que la característica más importante de estos electrodos, durante la soldadura es el desprendimiento de una gran cantidad de gases y poca escoria, lo que favorece una elevada penetración y un refinamiento de la microestructura de la ZATy cordón de soldadura.

Tal como se ilustran en las figuras 1.1 y 1.2, también se reportó que los electrodos revestidos que depositan mayor cantidad de escoria son los que

presentan los problemas de porosidad debido al hidrógeno cuando estos electrodos contienen humedad en su revestimiento, tal es el caso de los electrodos básicos E7018 etc.

Por otra parte recientemente M. Suban y colaboradores [4] realizaron una investigación sobre el efecto del 5 y 10% de hidrógeno en una mezcla de gases (Ar + H₂) sobre la penetración de la soldadura, reportando que a medida que el porcentaje de H₂ en la mezcla incrementa, también la penetración incrementa, lo anterior lo atribuyen a la conductividad térmica del hidrógeno, lo cual lo ejemplifica con la figura 1.3.

Por otra parte si el hidrógeno fuera tan nocivo, las reparaciones subacuáticas de tuberías, plataformas marinas y cascos de barcos no se harían bajo el agua, aunque sean soldados de reparación emergentes y las investigaciones sobre estos aspectos tampoco se realizarían, más sin embargo, tanto las reparaciones como las investigaciones que se han estado reportando, muestran que a profundidades elevadas, la presión hidrostática influye en la presencia de porosidades debidas al hidrógeno, tal es el caso de P.S. Maslennikov y colaboradores [5] entre otros [6-10] quienes resumen los resultados en la figura 1.4, sobre la influencia del hidrógeno en la soldadura en función de la presión hidrostática, reportando a la vez que a profundidades pequeñas la disociación del agua y la generación del hidrógeno no tiene ningún efecto sobre porosidad y difusión en el cordón de soldadura y zona afectada térmicamente.

Lo anterior también fue reportado por R. García y colaboradores [11,12], quienes realizaron soldaduras subacuáticas y en aire con tres tipos de electrodos E6010, E6013 y E7018 con el 100% de humedad y sobre un acero 1018 y acero API 5L X-70 para tubería, reportando que la soldadura subacuática realizada con los tres electrodos no presenta porosidades y la única difusión es que la ZAT del acero 1018, obtenida con el electrodo E6010, presenta mayor microdureza por lo enérgico del arco eléctrico de igual forma los cordones depositados en forma tradicional con el 100% de humedad presentan situaciones similares de refinamiento en la microestructura de la ZAT y parte del cordón de soldadura, con la única diferencia de que el electrodo E7018 deposita mayor cantidad de escoria y por consiguiente el hidrógeno disuelto en la soldadura no tiene el tiempo suficiente de difundir hacia el exterior y dentro del material base, por lo cual son los únicos cordones de soldadura que presentan porosidades en el exterior del cordón de soldadura.

Por otra parte, para demostrar el daño que causa el hidrógeno en la soldadura de aceros, realizaron estudios sobre probetas soldadas con presencia de hidrógeno y probetas soldadas sin la presencia de hidrógeno someténdolas a cargas de fatiga reportando que las probetas con hidrógeno en solución sólida en la soldadura fracturan a un esfuerzo inferior, comparadas con las probetas que no tenían hidrógeno en solución sólida como se muestra en la figura 1.5, esto es debido a que el hidrógeno monoatómico, se ubica en los defectos cristalinos como vacancias y dislocaciones, así como en el espacio vacío entre las inclusiones no metálicas combinándose entre sí y formando hidrógeno molecular (H_2), el cual ejerce cierta presión y ayuda a que el esfuerzo aplicado sea inferior al esfuerzo requerido, para la fractura en condiciones normales. [13]

Por su parte E. Saldaña y colaboradores [14] analizaron el comportamiento de los aceros para tuberías que transportan petróleo y gas amargo (H_2S) ácido sulfhídrico, encontrando que debido al desprendimiento del hidrógeno monoatómico, las tuberías presentan el fenómeno de ampollamiento, debido a la presencia de hidrógeno molecular (H_2) que se forma entre las inclusiones y la matriz del acero, provocando la falla por ampollamiento, la figura 1.6 en donde se observan inicios de las fisuras a lo largo de la tubería en sentido de la laminación.

Por otra parte R. García y colaboradores [3] demostraron que realizando uniones del acero A36 en múltiples pasadas con el electrodo E6010 con 100% de humedad se obtiene mayores propiedades mecánicas que secando el mismo electrodo. Esto fue posible debido al refinamiento del grano tanto en la ZAT, como en el cordón tal como se ilustra en la figura 1.7.

En la figura 1.1 se muestra una investigación en un acero A36, utilizando electrodos celulósicos E6010, seco y con 100% de humedad.

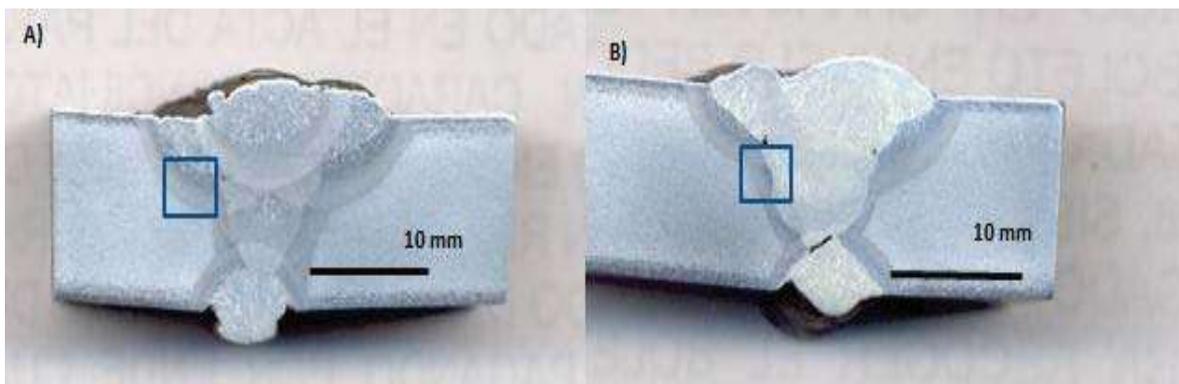


Figura 1.1 ilustra los cordones de soldadura del acero A36 depositados con a) E6010 con 100% de humedad y b) E6010 seco.

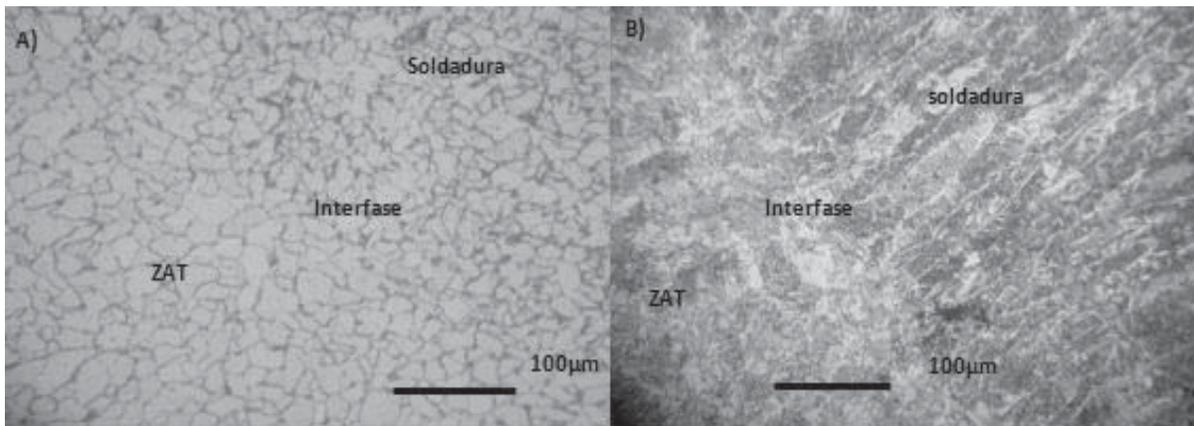


Figura 1.2. Interface de los cordones de soldadura a) con electrodo húmedo y b) electrodo seco [3]

En las imágenes 1.1 y 1.2 podemos apreciar una unión en acero A36 con electrodos de la familia E6010 que contiene revestimiento celulósico. Se soldaron dos placas con el mismo electrodo solo que uno fue humedecido y el otro en estado normal de humedad, lo que podemos apreciar en dichas macrografías y micrografías es que su zona afectada térmicamente en la probeta que se soldó con electrodo húmedo es más ancha que la probeta que se unió con electrodo seco todo esto debido a un efecto que se explicara más adelante en el mecanismo del arco eléctrico, así mismo podemos observar las micrografías que se presenta un refinamiento de grano en la probeta con electrodos húmedos. [3]

Ahora bien, si se ha adoptado desde siempre que el hidrógeno es perjudicial para las uniones en soldadura y lo perjudicial que es para los elementos soldados, entonces cabe destacar que en la industria de los recipientes a presión para unir dichos recipientes y efectuar la pasada de raíz siempre utilizan electrodos con revestimiento celulósico aun conociendo su alto contenido de hidrógeno en la molécula de la celulosa.

Esta es la oportunidad para demostrar que el hidrógeno no es tan perjudicial como se ha contemplado si se maneja de una forma adecuada.

A continuación se mencionarán investigaciones acerca del hidrógeno y su participación en las uniones soldadas.

USO DEL HIDRÓGENO EN LA INGENIERÍA DE LA SOLDADURA EN OTROS TIEMPOS Y HOY EN DÍA.

Esto habla de que de una forma directa o indirecta el hidrógeno siempre ha estado presente en las uniones soldadas, además recordemos que todo lo que existe está formado por hidrógeno.

En esta investigación podemos tomar la parte que habla de la cualidad que tiene el hidrógeno con respecto a los demás elementos químicos, la cualidad de conductividad térmica que posee la más alta como lo muestra la siguiente gráfica de la figura 1.3. [4]

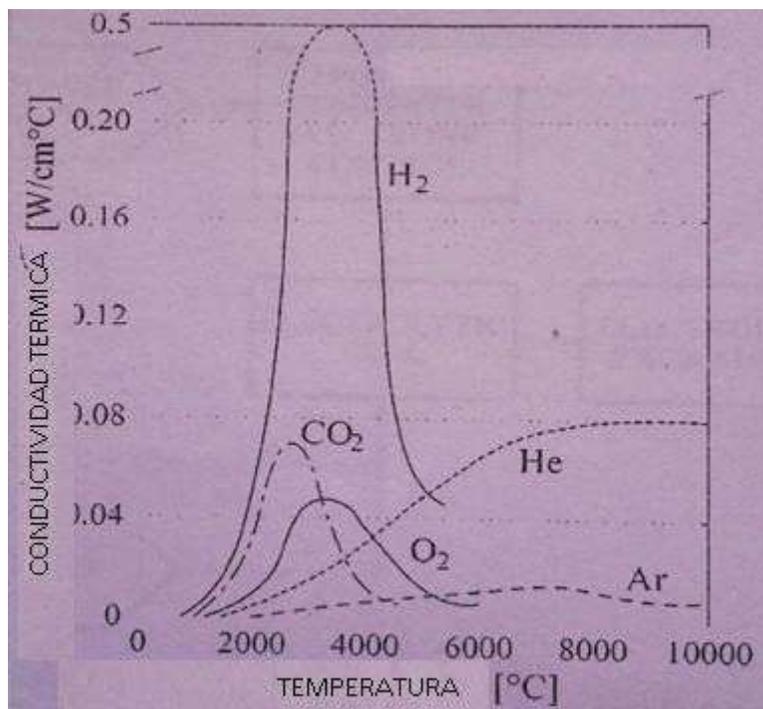


Figura 1.3. Propiedades termodinámicas del hidrógeno

CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL EFECTO DEL HIDRÓGENO EN LA SUSCEPTIBILIDAD DEL ACERO ESTRUCTURAL EN LA SOLDADURA BAJO EL AGUA.

Esta investigación se basa en las uniones que se realizan bajo el agua como las reparaciones de naves marinas o tuberías de las plataformas de productos petroquímicos lo cual muestra que a mayor profundidad para soldar mayor es la cantidad de hidrógeno atrapado entre la soldadura debido a la presión hidrostática lo cual nos puede acarrear problemas de grietas e imperfecciones en la unión. [5]

La figura 1.4 muestra gráficamente lo anterior explicación.

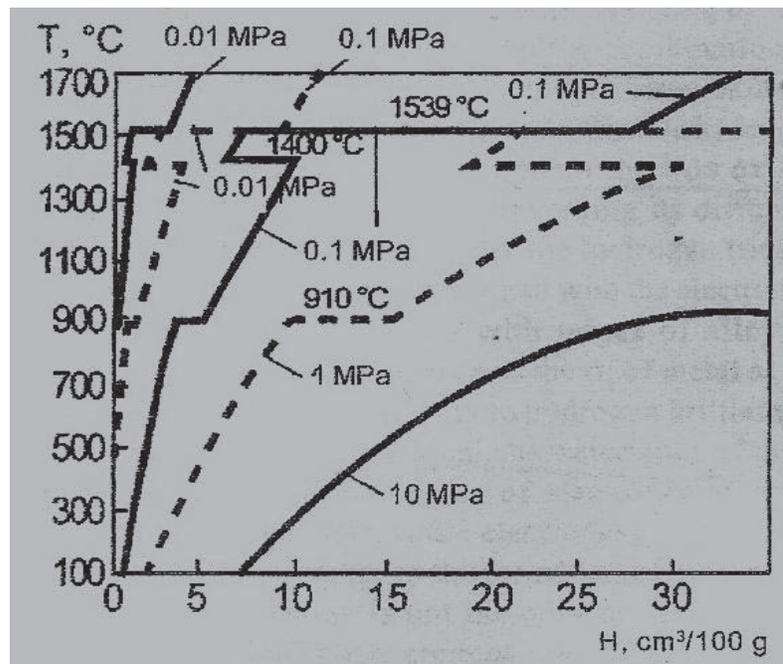


Figura 1.4 Efecto del hidrógeno en función de la presión hidrostática. [5]

RETRASO DE GRIETAS EN LA SOLDADURA DE ACEROS.

Se estableció que una unión soldada en presencia de hidrógeno fracturará dentro de un tiempo y para comprobarlo se hicieron estudios en probetas cargadas con cierta cantidad conocida de hidrógeno y la sometieron a esfuerzos de carga cíclica para determinar el momento en que fracturarían como lo demuestra la figura 1.5 en la que se observa que la probeta que no contiene hidrógeno tardó más tiempo en fracturar.[13]

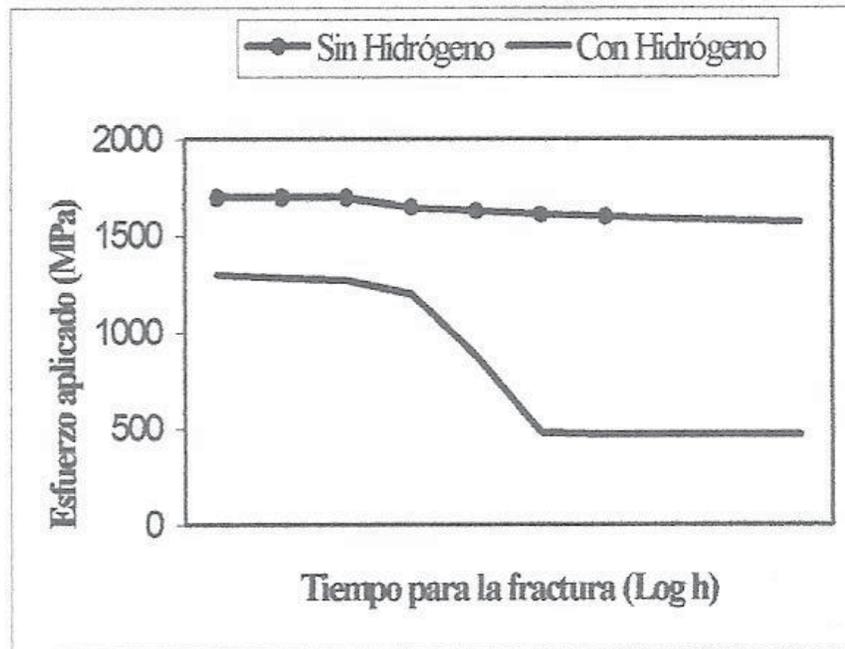


Figura 1.5. Gráfica de esfuerzos cíclicos. [13]

El H₂ en solución supersaturada afecta la ferrita y la martensita, fisuras por esfuerzos cíclicos.

ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE FRACTURA EN PRESENCIA DE HIDRÓGENO DE ACEROS RESISTENTES AL MEDIO ACIDO.

Todos los elementos que están en contactos con medios ácidos como las tuberías para transportar productos petroquímicos son muy susceptibles a sufrir ampollamientos por el hidrógeno con ayuda de la presión que se maneja en el transporte del producto, dicho hidrógeno entra en los pequeños poros o imperfecciones del material y se nuclea hasta producir un ampollamiento, y da origen a una fractura, cabe mencionar de gran importancia que el hidrógeno monoatómico no afecta a los elementos sino es el hidrógeno molecular que se forma cuando un hidrógeno monoatómico se une a otro formando hidrógeno molecular H_2 como se puede apreciar en la siguiente imagen. [14]

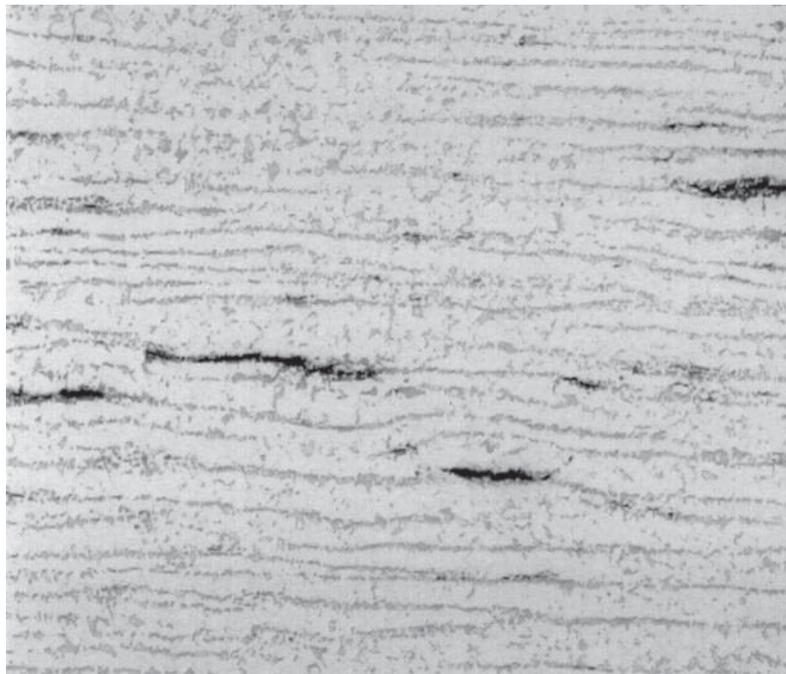


Figura 1.6. Aspecto de las grietas causadas por hidrógeno. [14]

USO DEL HIDRÓGENO EN LA SOLDADURA COMO MEDIO DE MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA UNIÓN EN ACEROS DE BAJO CARBONO.

Esta investigación marca una pauta en las uniones soldadas en presencia de hidrógeno, lo cual hasta hace poco indicaba el mal que hace dicho elemento a las uniones soldadas.

Se encontró en el uso de los electrodos con revestimiento celulósico con 30% de humedad en contacto con el arco eléctrico se logra un gran refinamiento de grano de la microestructura en un acero A36; así mismo, el aumento de sus propiedades mecánicas comparadas con el mismo acero y electrodo soldado en ambiente seco.[3], como se ilustra en la imagen 1.7.

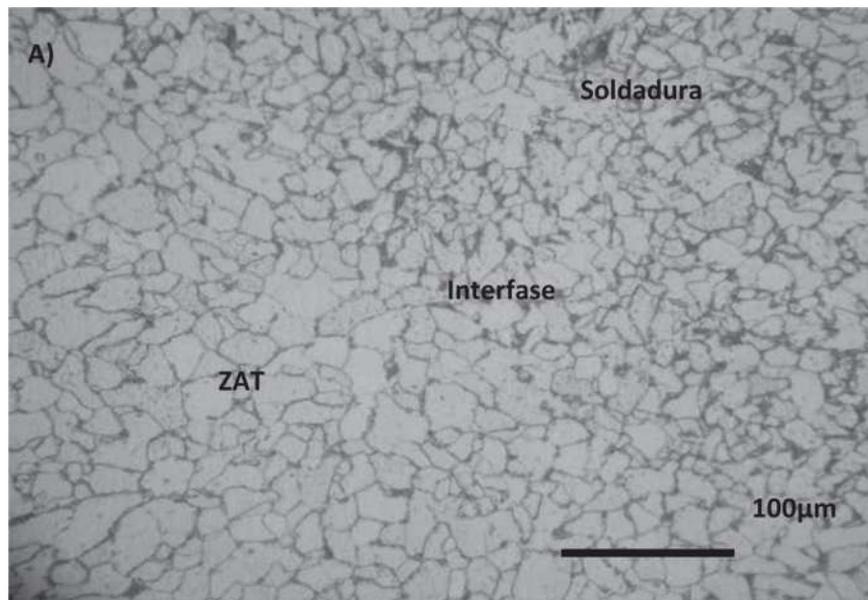


Figura 1.7. Refinamiento de grano de una soldadura en acero A 36. [3]

1.2 Tratamientos térmicos.

Se conoce como **tratamiento térmico** al proceso que comprende el calentamiento de los metales o las aleaciones en estado sólido a temperaturas definidas, manteniéndolas a esa temperatura por suficiente tiempo, seguido de un enfriamiento a las velocidades adecuadas con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tensión. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono. También se aplican tratamientos térmicos diversos a los sólidos cerámicos.

Los tratamientos térmicos modifican la microestructura y la estructura cristalina sin alterar la composición química, dando a los materiales características mecánicas concretas, mediante un proceso de calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la microestructura deseada.

Entre estas características se encuentran las siguientes:

- Resistencia al desgaste: Es la resistencia que ofrece un material a dejarse erosionar cuando está en contacto de fricción con otro material.
- Tenacidad: Es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin producir fisuras (resistencia al impacto).
- Maquinabilidad: Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.
- Dureza: Es la resistencia que ofrece un acero a la indentación. Se mide en unidades BRINELL (HB), unidades ROCKWEL C (HRC), VICKERS (HV), etc. Dureza Vickers mediante el test del mismo nombre.

1.3 Mejora de las propiedades a través del tratamiento térmico

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de un metal, y en particular de los aceros, residen en la composición química y el tipo de tratamiento térmico a los que se les somete. Los tratamientos térmicos modifican la estructura cristalina y la microestructura que forman los aceros sin variar la composición química de los mismos.

Esta propiedad de tener diferentes estructuras cristalinas con la misma composición química se llama polimorfismo. Técnicamente el polimorfismo es la capacidad de algunos materiales de presentar distintas estructuras

crystalinas, con una única composición química, el diamante y el grafito son polimorfismos del carbono. La ferrita- α , la austenita y la ferrita- δ son polimorfismos del hierro.

Por lo tanto las diferentes estructuras de grano pueden ser modificadas, obteniendo así aceros con nuevas propiedades mecánicas, pero siempre manteniendo la composición química. Estas propiedades varían de acuerdo al tratamiento que se le dé al acero dependiendo de la temperatura hasta la cual se le calienta y de cómo se enfría el mismo. La forma que tendrá el grano y los microconstituyentes que componen al acero, sabiendo la composición química del mismo (esto es porcentaje de carbono y hierro) y la temperatura a la que se encuentra, se puede ver en el Diagrama Hierro Carbono de la figura 1.8.

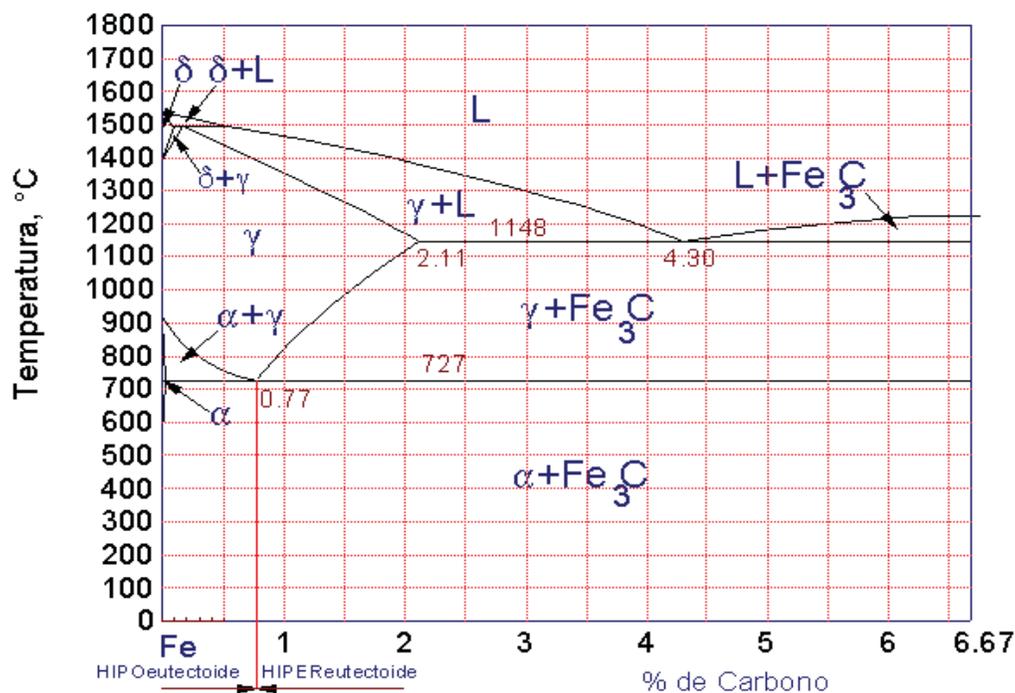


Figura 1.8. Diagrama hierro-carbono [15]

A continuación se adjunta a modo de ejemplo una figura que muestra como varía el grano a medida que el acero es calentado y luego enfriado. Los microconstituyentes a los que antes se hizo referencia en este caso son la perlita, la γ y la ferrita.

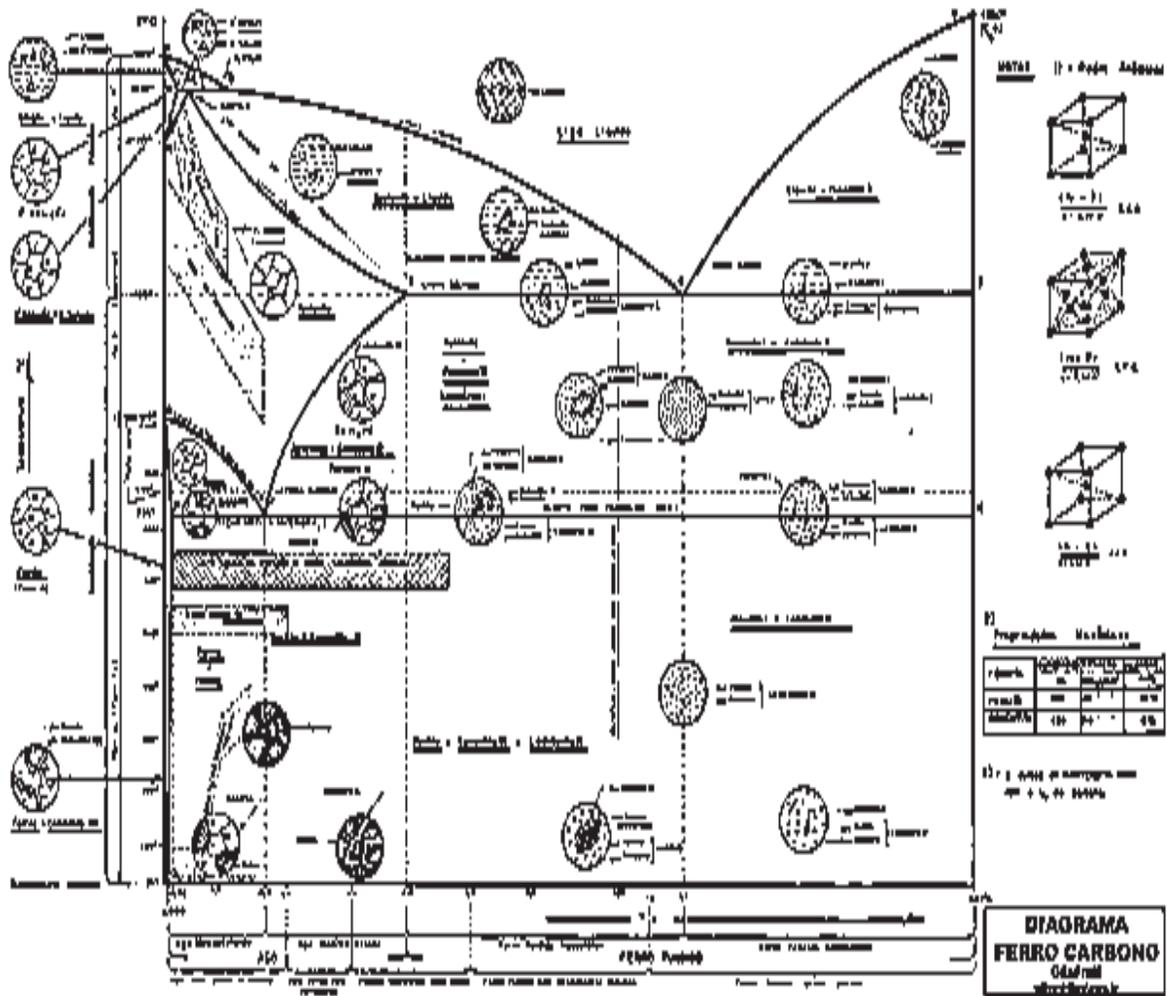


Figura 1.9. Cambio de microestructuras del acero dependiendo la temperatura a la que se encuentre el acero. [15]

1.4 Propiedades mecánicas del acero

El acero es una aleación de hierro y carbono que contiene otros elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas específicas para su utilización en la industria metal-mecánica. Los otros elementos principales de composición son el cromo, tungsteno, manganeso, níquel, vanadio, cobalto, molibdeno, cobre, azufre y fósforo. A estos elementos químicos que forman parte del acero se les llama aleantes y a las distintas estructuras cristalinas o combinación de ellas constituyentes. Los elementos constituyentes, según su porcentaje, ofrecen características específicas para determinadas aplicaciones, como herramientas, cuchillas, soportes, etcétera. La diferencia entre los

diversos aceros, tal como se ha dicho depende tanto de la composición química de la aleación de los mismos, como del tipo de tratamiento térmico.

El hecho de mencionar los tratamientos térmicos es por el ciclo térmico sufrido por los aceros cerca de la línea de fusión en la ZAT. La cual en un ancho de aproximadamente 3-10mm, tiene un rango de temperatura de 1550°C-800°C en donde se puede observar, tamaño de grano grueso, fino y transformación parcial [11].

1.5 Problemática de soldaduras en contacto con hidrógeno

Materiales en la tecnología del hidrógeno

La fragilización por hidrógeno ha sido definida como la pérdida de resistencia y ductilidad inducida por el hidrógeno que puede derivar en la iniciación o propagación de fracturas mecánicas.

La interacción del hidrógeno con diferentes materiales es causa de fallo prematuro en distintas situaciones, tal y como sucede en los trenes de aterrizaje de los aviones, los depósitos de combustible de refinerías y plantas petroquímicas, las turbinas para la generación de energía eléctrica o las tuberías y válvulas para el transporte de líquidos y gases.

La fragilización por hidrógeno es especialmente devastadora debido a la naturaleza del fallo originado. Dicho fallo sucede a tensiones muy pequeñas (en comparación a las que serían necesarias en ausencia de hidrógeno), es bastante frágil y tiene un periodo de “incubación” tan variable que lo hace prácticamente impredecible.

El problema de la fragilización por hidrógeno afecta a los tres sistemas básicos de cualquier industria que emplee el hidrógeno:

Producción

Transporte/Almacenamiento

Utilización

La elección de los materiales para el confinamiento del hidrógeno para una aplicación específica dependerá de la fiabilidad y costo que requiera el sistema.

Materiales empleados con el hidrógeno

Por las especiales propiedades del hidrógeno es importante conocer los efectos que producen dichas propiedades y las temperaturas criogénicas sobre el comportamiento de los distintos materiales.

Existen distintos materiales que funcionan satisfactoriamente en las distintas condiciones de servicio. Estas condiciones pueden variar desde baja

presión/baja temperatura hasta alta presión/alta temperatura. La sección del material dependerá de las condiciones de operación específicas.

La selección de materiales deben considerar los siguientes conceptos:

Propiedades adecuadas para el diseño y condiciones de funcionamiento.

Corrosión y resistencia.

Compatibilidad con el ambiente de trabajo.

Toxicidad.

Facilidad para su fabricación, montaje e inspección.

Fragilización por hidrógeno.

Disponibilidad del material y de los ensayos realizados sobre él.

Consecuencias del fallo del material.

Cambio en las propiedades a temperaturas criogénicas.

Capacidad de exposición a las altas temperaturas de un fuego por hidrógeno.

Fragilización en frío.

Contracción térmica.

No sólo se debe tener un especial cuidado con la selección de los materiales sino que además se deben llevar a cabo controles de calidad adecuados. A este respecto es conveniente observar ciertos aspectos:

1.- Los proyectistas deben manejar con cautela los valores de las propiedades que aparecen en los manuales convencionales ya que las condiciones de ensayo son muy variables especialmente en función de la temperatura.

2.- Si se desconoce si un material es compatible con el hidrógeno no debe ser empleado hasta que se hayan realizado las pruebas y análisis correspondientes que determinen su idoneidad.

3.- Los materiales empleados deben ser compatibles con el hidrógeno bajo las condiciones de funcionamiento proyectadas (temperatura, presión, vibración) y cumplir con las especificaciones.

4.- Las propiedades manejadas en el diseño deben estar basadas en pruebas que simulen las condiciones de servicio o las condiciones más desfavorables.

5.- Los métodos de ensayo a los que someta el material para determinar su compatibilidad con hidrógeno deben incluir la exposición directa al hidrógeno.

6.- Los materiales seleccionados deben pasar pruebas en las que se compruebe su comportamiento frente a los esfuerzos, la presión, la temperatura y la exposición al ambiente.

Daños producidos por el hidrógeno

Aunque la degradación producida por el hidrógeno puede aparecer bajo distintas formas, los casos más importantes se agrupan en tres categorías, que pueden combinarse entre sí.

Confinamiento del hidrógeno [21]

Materiales específicos de confinamiento

La extensión y modo de degradación por hidrógeno en cualquier sistema de confinamiento depende de múltiples factores relacionados con el material, el diseño y las condiciones de servicio. Existen distintas directrices que se pueden emplear para seleccionar los materiales a utilizar en los sistemas de hidrógeno. La mayoría de ellas recoge aspectos metalúrgicos como la composición, la microestructura, la resistencia, la soldabilidad y sus interacciones con la temperatura y presión del hidrógeno. De manera que la solubilidad y concentración del hidrógeno junto con su difusión marcan la fragilización por hidrógeno.

- Aleaciones de hierro.
- Aceros martensíticos y ferríticos.
- Aceros de mediana y alta resistencia.
- Aceros austeníticos.
- Aleaciones de níquel.
- Aleaciones de titanio.
- Aleaciones de cobre.
- Aleaciones de aluminio.
- Aleaciones de zirconio.

Operatividad de los sistemas de confinamiento

Influencia de la temperatura

El éxito en el diseño de los sistemas de confinamiento depende del control de variables como la temperatura, la presión, las cargas cíclicas, las condiciones de exposición o la pureza del gas.

La tendencia al agrietamiento en los aceros disminuye con el incremento de la temperatura. Sin embargo, la reducción de área en los ensayos de tracción de los aceros en hidrógeno a 152 bares muestran un mínimo en la reducción de área en torno a los -40°C . Para temperaturas mayores de 160°C y para menores a -80°C la fragilización por hidrógeno disminuye.

Influencia de la presión [21]

La influencia de la presión del hidrógeno gaseoso en la solubilidad del hidrógeno en el hierro es proporcional a la raíz cuadrada de la presión parcial del hidrógeno en el ambiente (Ley de Sievert):

$$S = K \cdot p^{1/2}$$

Esta relación es válida excepto para altas presiones (>120 atm) y para altas temperaturas.

La presión también afecta a la permeabilidad del hidrógeno en el hierro y acero de manera que se obtiene una expresión análoga a la anterior:

$$P = K \cdot p^{1/2}$$

1.6 Materiales comúnmente aceptados

1.6.1 Materiales metálicos

Los metales con estructura cúbica centrada en las caras como el acero inoxidable austenítico, las aleaciones de aluminio, el cobre y las aleaciones de cobre realizan un servicio satisfactorio con el hidrógeno.

El níquel que también tiene una estructura centrada en las caras es una excepción ya que es susceptible a sufrir un fuerte efecto de fragilización por hidrógeno por lo que no se emplea normalmente.

Los aceros austeníticos no estabilizados (algunos de las series 300) pueden convertirse en martensíticos cuando sufren un esfuerzo por encima del límite elástico a baja temperatura reduciéndose la ductilidad del acero.

Los aceros al carbono ordinarios se pueden emplear con hidrógeno gaseoso pero pierden ductilidad a las temperaturas de servicio del hidrógeno líquido por lo que no son aconsejables para este tipo de aplicación.

Hierro, aceros de baja aleación, cromo, molibdeno, niobio, cinc y la mayoría de los metales con estructura cúbica centrada en el cuerpo no son aceptables para un uso a temperaturas criogénicas.

Materiales no metálicos

El uso de elastómeros y plásticos debe limitarse a obturación y elementos de sellado.

Materiales prohibidos

La fundición gris, la fundición dúctil o el hierro fundido no deben emplearse en el servicio con hidrógeno (NFPA 50A 1994).

Selección de materiales para sistemas de hidrógeno líquido

La selección de un determinado material para su uso con hidrógeno líquido está basada, inicialmente, en sus propiedades mecánicas (como por ejemplo: resistencia a la tracción, límite elástico, ductilidad, resistencia al impacto,

sensibilidad a la entalladura). El material debe reunir ciertos valores mínimos de las características anteriores dentro del rango de temperaturas de funcionamiento. Por otro lado el material debe ser metalúrgicamente estable para que con el paso del tiempo o con los ciclos de temperatura no sucedan cambios de fase en la estructura cristalina.

Se deben considerar **tres categorías principales** en cuanto al comportamiento de los materiales:

Transición de dúctil a frágil en función de la temperatura.

Modo de **deformación plástica**, sobre todo a muy bajas temperaturas.

Efecto de la **inestabilidad metalúrgica** y de los cambios de fase de la estructura cristalina en las propiedades mecánicas y elásticas.

Además hay que considerar las propiedades térmicas de fragilización a baja temperatura y las contracciones térmicas cuando se realiza la selección de materiales para los sistemas con hidrógeno líquido.

Medidas preventivas y técnicas de minimización de riesgos

Selección de materiales, dependencia del nivel de resistencia, materiales a evitar

Algunos aceros están sujetos a fragilización por hidrógeno y consecuentemente deben ser evitados para minimizar el riesgo de fallas.

1.7 Prevención de fragilización por hidrógeno

Materiales resistentes[21]

Usar aquellos materiales que son muy resistentes al hidrógeno como el AISI 316 y 310 (acero inoxidable)

Materiales susceptibles

Para aquellos materiales que sean susceptibles a la fragilización como los aceros de alta resistencia y las aleaciones ferríticas se recomienda atender ciertos criterios de diseño de seguridad.

Prevención de ataque por hidrógeno

La combinación de altas temperaturas con altas presiones en un ambiente con hidrógeno impone especiales requerimientos para los materiales que se empleen. El ataque por hidrógeno tiene dos formas de actuación. La primera se denomina descarburación superficial y da lugar a una pérdida de resistencia y a un incremento de la ductilidad. La segunda forma es la presión interna que ataca desde el interior del acero provocando una pérdida de resistencia y ductilidad en la que las fisuras aparecen en el borde de grano.

Soldadura

Las soldaduras en general tienen una alta tendencia a verse afectadas por el hidrógeno de manera que la fragilización por hidrógeno puede aparecer mediante fisuras espontáneas tanto en el metal de aporte como en la zona afectada térmicamente. Por esta razón se han efectuado numerosos ensayos al respecto.

Inhibidores de la fragilización

La pureza del hidrógeno es importante. Ciertas impurezas pueden emplearse para retardar o evitar el fenómeno de agrietamiento debido al hidrógeno. Esto es debido a que la permeabilidad del hidrógeno en los metales puede reducirse por reacción de la superficie del metal con los inhibidores.

Proceso de soldadura por arco sumergido.

El sistema de soldadura automática por arco sumergido permite la máxima velocidad de deposición de metal, entre los sistemas utilizados en la industria, para producción de piezas de acero de mediano y alto espesor (desde 5 mm a 50 mm) que puedan ser posicionadas para soldar en posición plana u horizontal: vigas y perfiles estructurales, tanques, cilindros de gas, bases de máquinas, fabricación de barcos, etc. También puede ser aplicado con grandes ventajas de relleno de ejes, ruedas de ferrocarriles y polines.

En el sistema de soldadura por Arco Sumergido, se utiliza un alambre sólido recubierto por una fina capa de cobrizado, para evitar su oxidación y mejorar el contacto eléctrico.

Generalmente contiene elementos desoxidantes, que junto a los que aporta el fúndente, limpian las impurezas provenientes del metal base o de la atmósfera y aportan elementos de aleación seleccionados según sean las características químicas y mecánicas del cordón de soldadura que se desee.

1.8 EL EQUIPO DE SOLDADURA

En la figura 1.10 se muestra el diagrama de los componentes de un equipo de soldadura de arco sumergido.

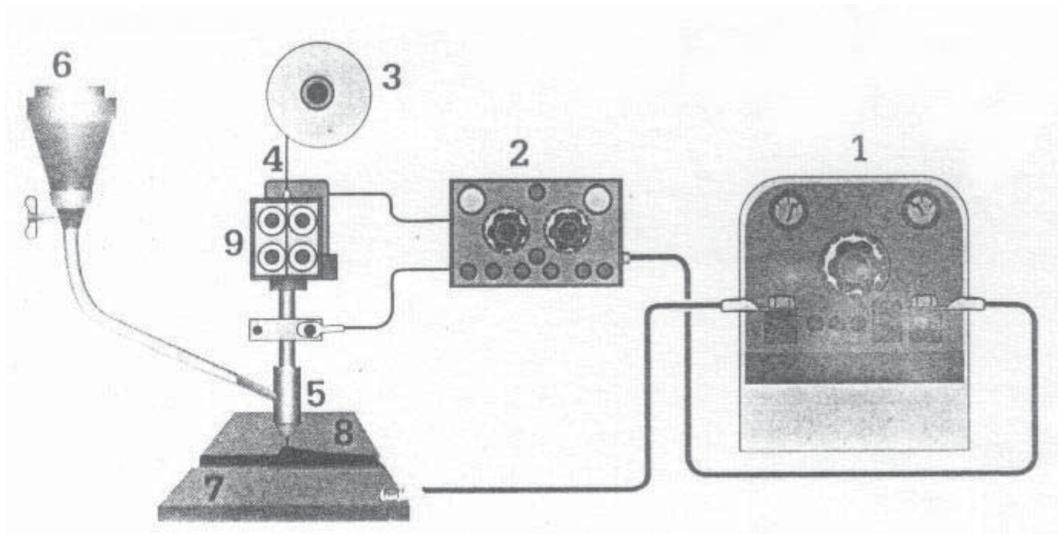


Figura 1.10 Soldadura por arco sumergido.

1-Fuente de poder de CC o CA.

La fuente de poder empleada en arco sumergido es una fuente de potencial constante, la cual puede utilizar por lo general corriente directa o continua y solo en ciertas condiciones donde se usan varios electrodos alguno de ellos usa corriente alterna, la eficiencia de la fuente de poder es recomendada del 100% por ser un proceso automático.

2- Sistema de control.

Este sistema se encarga de controlar las velocidades de alimentación del electrodo de alambre y de avance en la depositación del cordón.

3- Porta carrete de alambre.

Cada carrete de alambre se coloca en el porta carrete para que esté suministrando el electrodo del alambre para soldar.

4- Alambre-electrodo.

Es el material de aporte en el cordón de soldadura, estos pueden ser de diferentes diámetros y configuraciones como alambre o alambre con fundente en su núcleo.

5- Tobera para boquilla.

Su función es direccionar el alambre electrodo hacia la pieza de unión y los diámetros de las toberas cambian según el diámetro de cada alambre electrodo.

6- Recipiente porta-fundente.

Es donde se deposita el fundente para que por medio de gravedad se vaya suministrando hasta la tobera para boquilla y vaya cubriendo la unión de las piezas así mismo el arco eléctrico.

7- Metal base.

Son las piezas que están listas y van a hacer unidas por el método de soldadura, están preparadas a tope, con bisel en V o doble V según el espesor de la pieza a unir.

8- Fundente.

brinda la función de darnos las condiciones de control de la atmosfera que rodeara al arco eléctrico y proporcionar hasta de cierto modo propiedades mecánicas en la unión de las piezas.

9- Alimentador de alambre.

Este mecanismo nos brinda control en la alimentación del alambre electrodo, teniendo como característica adicional que la velocidad de alimentación es regulable.

VENTAJAS

Entre las principales ventajas podemos citar:

- Alta velocidad y rendimiento: con electrodos de 5/32" y 3/16" a 800 y 1000 Amperes, se logra depositar hasta 15 kg de soldadura por hora. Con electrodos de 1/4" y 1300 Amperes, se depositan hasta 24 kg. Por hora (tres a cuatro veces más rápido que en la soldadura manual).
- Propiedades de la soldadura: Este proceso permite obtener depósitos de propiedades comparables o superiores a las del metal base.
- Rendimiento: 100%.

- Soldaduras homogéneas.
- Soldaduras 100% radiográficas.
- Soldaduras de buen aspecto y penetración uniforme.
- No se requieren protecciones especiales.

1.9 Descripción del proceso

De los métodos de soldadura que emplean electrodo continuo, el proceso de arco sumergido desarrollado simultáneamente en EE.UU. y Rusia a mediados de la década delos 30, es uno de los más difundidos universalmente.

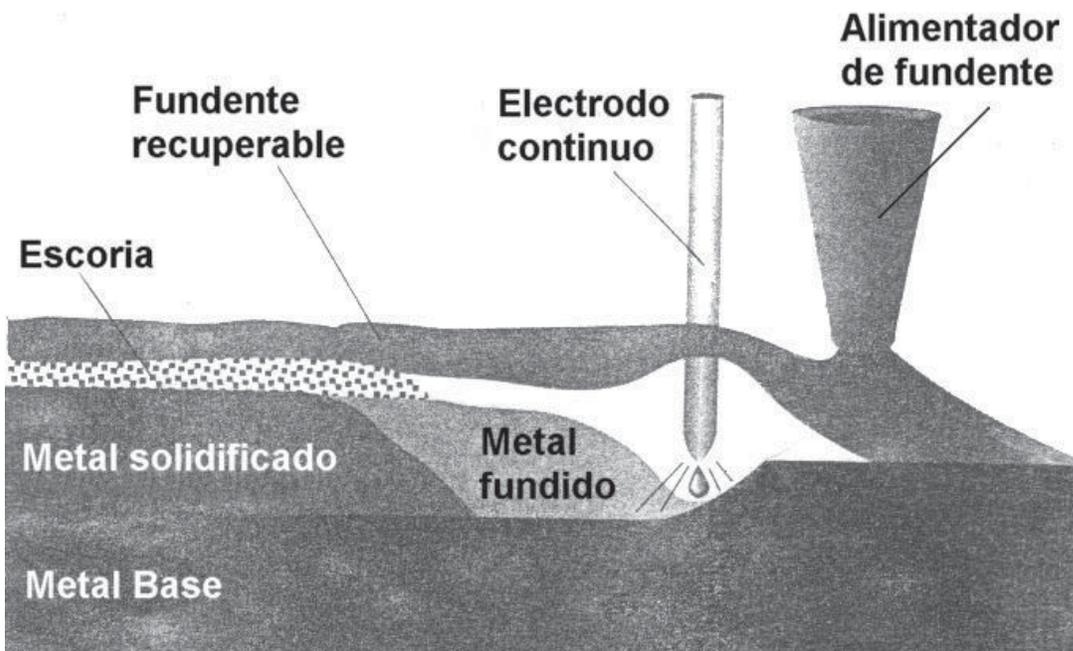


Figura 1.11 representación esquemática de la soldadura por arco sumergido.

Es un proceso automático, en el cual, como lo indica la figura 1.11, un alambre desnudo es alimentado hacia la pieza. Este proceso se caracteriza por que el arco se mantiene sumergido en el de fundente, provisto desde la tolva, que se desplaza delante del electrodo.

De esta manera el arco resulta invisible, lo que constituye una ventaja, ya que evita el empleo de elementos de protección contra la radiación ultravioleta e infrarroja, que son imprescindible en otros procesos de soldadura.

Las intensidades de corrientes utilizadas en este proceso varían en un rango que va desde los 200 hasta los 2000 amperes, y los espesores que es posible soldar varían entre 5 mm y hasta más de 50mm.

Usualmente se utiliza corriente continua con electrodo positivo, cuando se trata de intensidades inferiores a los 1000 amperes, reservándose el uso de corriente alterna para intensidades mayores, a fin de evitar el fenómeno conocido como sopló magnético.

El proceso se caracteriza por sus elevados regímenes de deposición y es normalmente empleado cuando se puede soldar grandes espesores de acuerdo al carbono o de baja aleación.

1.10 CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS SEGÚN AWS

Según la AWS, los alambres se clasifican por dos letras y dos números, que clasifican la composición química de ellos:

$EX_1X_2X_3$

Letras dígitos

E significa electrodo para soldadura de arco

X_1 significa el compuesto máximo de manganeso, o sea:

L : 0.60% Mn max.(bajo contenido de manganeso)

M: 1.25% Mn max. (contenido medio de manganeso)

H : 2.25% Mn max. (alto contenido de manganeso)

“ X_2X_3 ” números que indican el contenido aproximado de carbono en centésimos de 1%

Si hay un sufijo K este indica un acero calmado al silicio.

Nota: Los alambres se entregan en rollos de 25 Kg. Aproximadamente y con un diámetro interior de 300 mm.

Se pueden encontrar en el mercado con los siguientes diámetros: $5/64''$, $3/32''$, $7/64''$, $1/8''$, $5/32''$ y $1/4''$. [20]

CAPÍTULO II. Desarrollo experimental

El método de soldadura utilizado es ya muy común y conocido en todo el mundo, el arco sumergido es muy empleado para la unión de tuberías desde diámetros pequeños hasta diámetros muy grandes, pero ahora la idea consistió en hacer una modificación en la forma de operación del proceso.

Los fundentes que se utilizan tradicionalmente para este proceso ya están establecidos en tablas así como parámetros de voltaje, amperaje y velocidades de avance, la presente idea se basó en utilizar fundente de tipo celulósico extraído del revestimiento de los electrodos E6010, los cuales son de la familia de los electrodos de revestimiento celulósico que es un derivado de la madera.

Una vez obtenido el fundente se le agregó un porcentaje de humedad. Esto con la finalidad de que al establecerse el arco eléctrico entre el material de aporte y la pieza a unir, la humedad contenida en el fundente se disociara de la siguiente forma: de la molécula de agua H_2O , el hidrógeno se separara del oxígeno y aprovechando la alta conductividad térmica del hidrógeno esto sirvió como medio de disipación de calor, lo cual nos ayuda a controlar la forma y tamaño de grano de la microestructura de nuestra pieza a unir, y este efecto se aprecia en forma de humos que son expulsados durante el proceso de soldadura, la molécula de agua se disocia de la siguiente manera:



2.1 Selección de parámetros para la realización de las juntas a unir

Los parámetros utilizados para la unión de las juntas se determinaron en forma experimental hasta se encontraron la calibración óptima de voltaje, amperaje y velocidad de avance, así como la velocidad de alimentación del alambre como material de aporte.

Todos los parámetros se mostraran más adelante en la tabla 2.2 de parámetros de soldadura.

2.2 Dimensiones y preparación de las juntas

Se prepararon cuatro placas de acero API 5L X-60, este tipo de acero es muy empleado para la construcción de tuberías para la industria petroquímica, debido a su bajo contenido de carbono y su buen grado de soldabilidad, las dimensiones de las placas fueron de 12.7mm de espesor por 150mm de largo y 100mm de ancho con una preparación de simple V de 35 grados y un talón de 3 mm. Soldadas con una separación de 2mm. Como se muestra un las figuras 2 y 2.1.

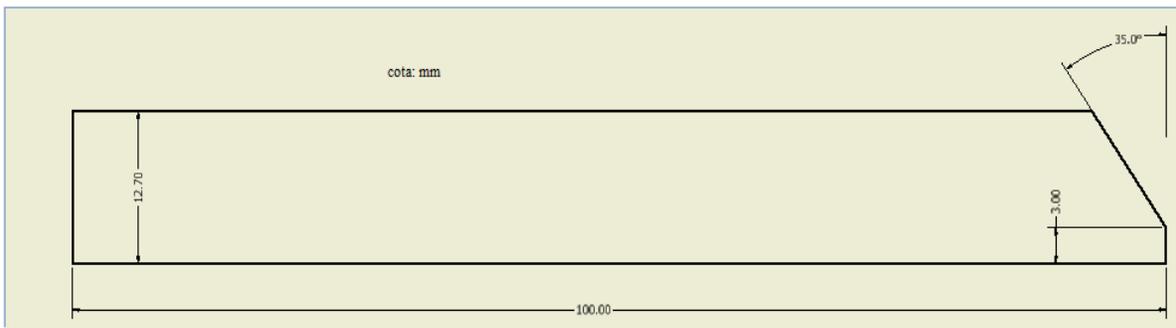


Figura 2: perfil de la preparación de las placas.

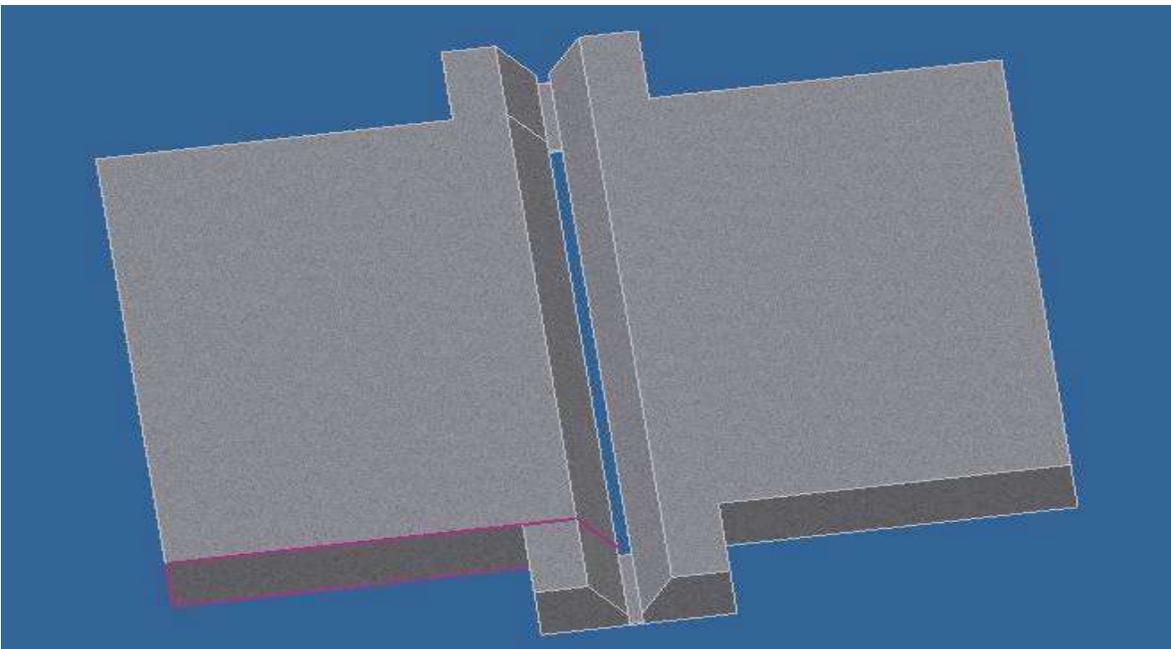


Figura 2.1. Configuración de las placas a soldar.

2.3 Composición química del acero y material de aporte

El análisis químico siguiente fue extraído del manual de especificaciones para aceros AHMSA.

Tabla 2.1. Composición química del acero X 60 y electrodo de alambre, % en peso.

Material	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Nb	%V
API X - 60	0.15	1.5	0.025	0.025	0.35	0.050	0.060
Electrodo EM13K	0.12	1.0	0.03	0.03	0.2		
Fundente F70A							

2.4 Equipo de soldadura y variables operativas

El equipo utilizado para la unión de las placas fue el equipo tradicional para soldadura por arco sumergido que se ilustra en la siguiente imagen.

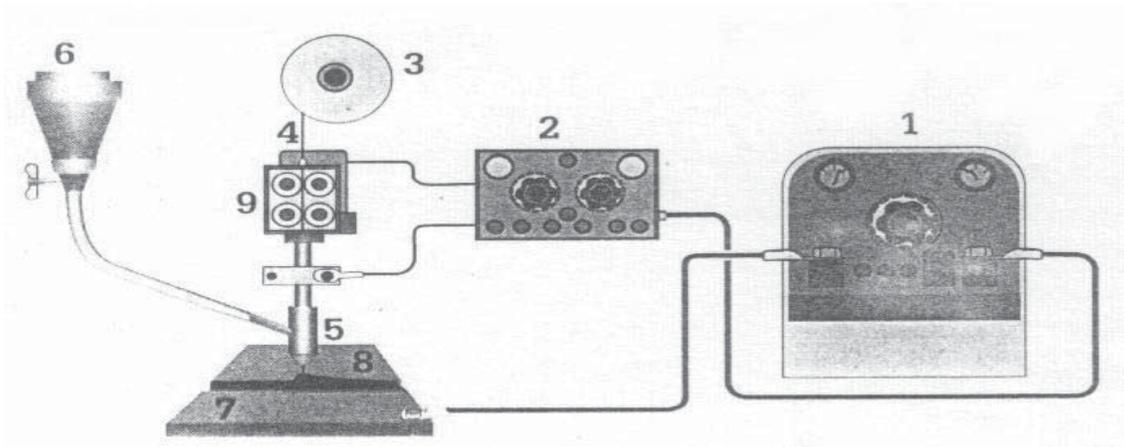


Figura 2.2. Soldadura por arco sumergido.

Este equipo de soldadura utiliza una fuente de poder de potencial constante y un ciclo de trabajo del 60%, una capacidad de 650A en forma automática.

Variables operativas del proceso de soldadura

Tabla 2.2 Cordones depositados y sus variables operativas.

No de cordón	A (Amperios)	V (Voltios)	V (mm/s)	C. A. (kJ/mm)
1Fc	369	30.7	2.9	3.91
2Fc	344	30.2	3.4	3.06
3Fc	384	29.4	3.4	3.3
1Ft	388	29.8	2.9	3.98
2Ft	378	29.8	3.4	3.3
3Ft	376	29	2.9	3.76

La figura 2.3 ilustra la preparación e inicio del arco eléctrico para soldadura de arco sumergido con fundente celulósico

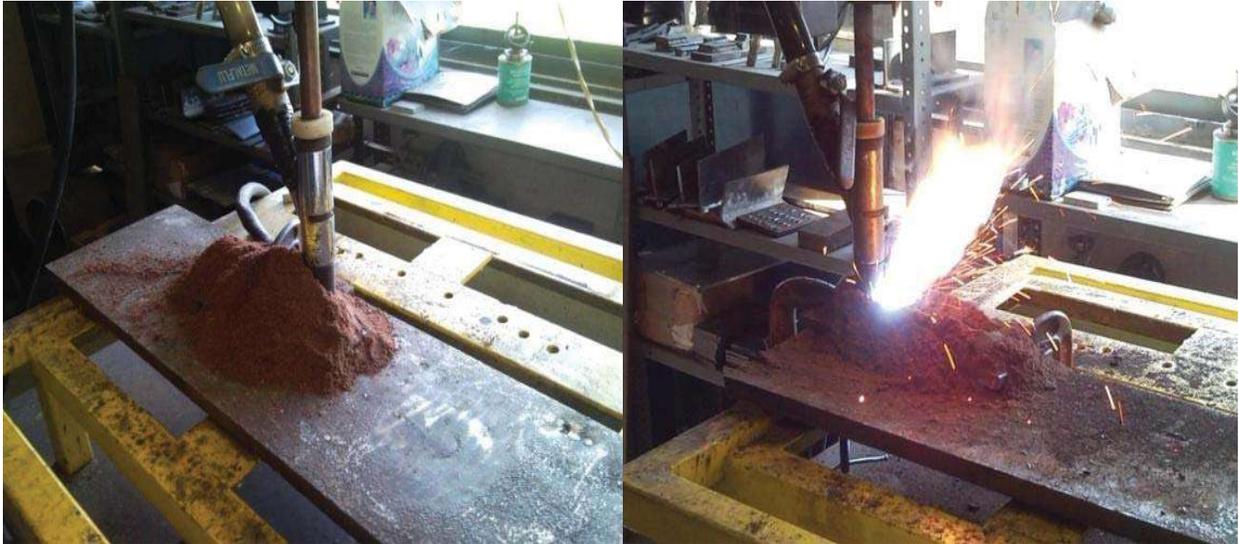


Figura 2.3. Placas unidas por arco sumergido.

La figura 2.3 ilustra la forma de la depositación de los cordones de soldadura con fundente tradicional y celulósico con 12.5% de humedad, observándose la diferencia que el fundente celulósico propicia el desprendimiento de una gran flama detrás del avance de la soldadura.

Una forma esquemática de representar el efecto del intercambio de temperatura por medio del desprendimiento de humos y el efecto de humedecer el fundente celulósico se presenta en la figura 2.3 imagen derecha.

Empezaremos describiendo como es que una gota de agua se adhiere a un objeto de la siguiente forma:



La figura 2.4 ilustra la distribución de una molécula de agua en un objeto o la forma en que se adhiere humedad a un sólido.

La siguiente figura ilustra esta absorción.

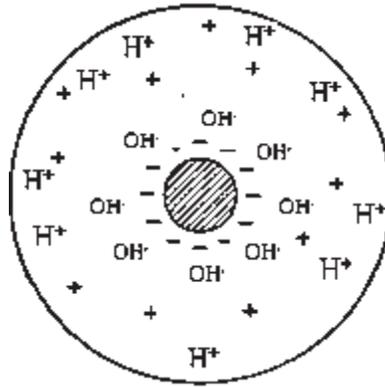


Figura 2.4. Adherencia de agua en contacto con un objeto, [17]

2.5 Mecanismo de velocidad de enfriamiento

La figura 2.5 se describe el efecto de enfriamiento debido al H₂ [18] para establecer un arco eléctrico se necesita de una diferencia de potencial, una vez establecido el arco eléctrico todo lo que lo circunda se empieza a disociar debido a la elevada temperatura que se genera en dicho arco eléctrico, la molécula de agua se disocia en dos hidrógenos y un oxígeno así como otros elementos como carbono, monóxido de carbono, bióxido de carbono entre otros elementos en pequeñas cantidades, todos estos elementos salen del arco eléctrico en una forma de gases los cuales hacen la extracción de calor de la piletta de soldadura, cabe destacar que dentro de las conductividades térmicas de los elementos involucrados en el arco eléctrico y descritos anteriormente el hidrógeno hace la mayor parte ya que es el que tiene la mayor conductividad térmica de todos los elementos químicos.

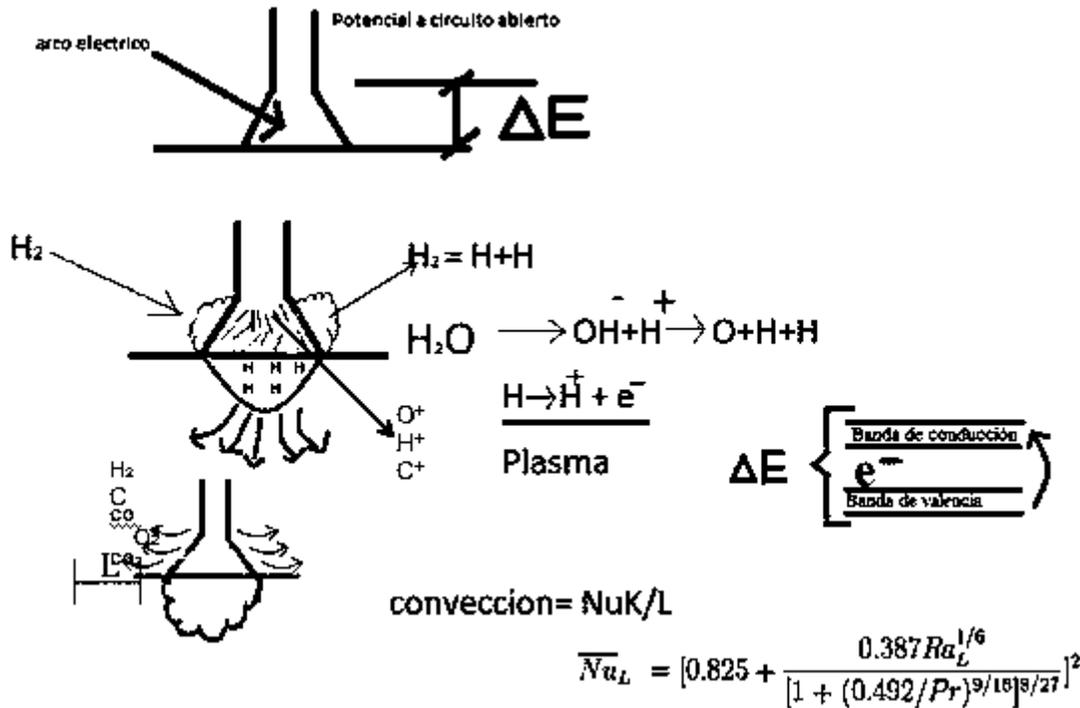


Figura 2.5. Disociación de la molécula de agua.

Para la preparación de probetas destinadas a análisis microestructural, se cortaron secciones transversales del metal base tal y como sale de fábrica así como de las placas unidas con fundente celulósico y fundente tradicional como se ilustra en la figura 2.6 tal y como se marca en la ASM, esto indica que a través de corte y maquinado adecuado de las probetas a una velocidad que no afecte las características microestructurales de la aleación del metal base y del metal de aporte, seguido de esto se desbastaron con papeles de carburo de silicio de diferentes granulometrías, (80 a 2500). Para el pulido a espejo se utilizó pasta de diamante de 3 y 6 μm .

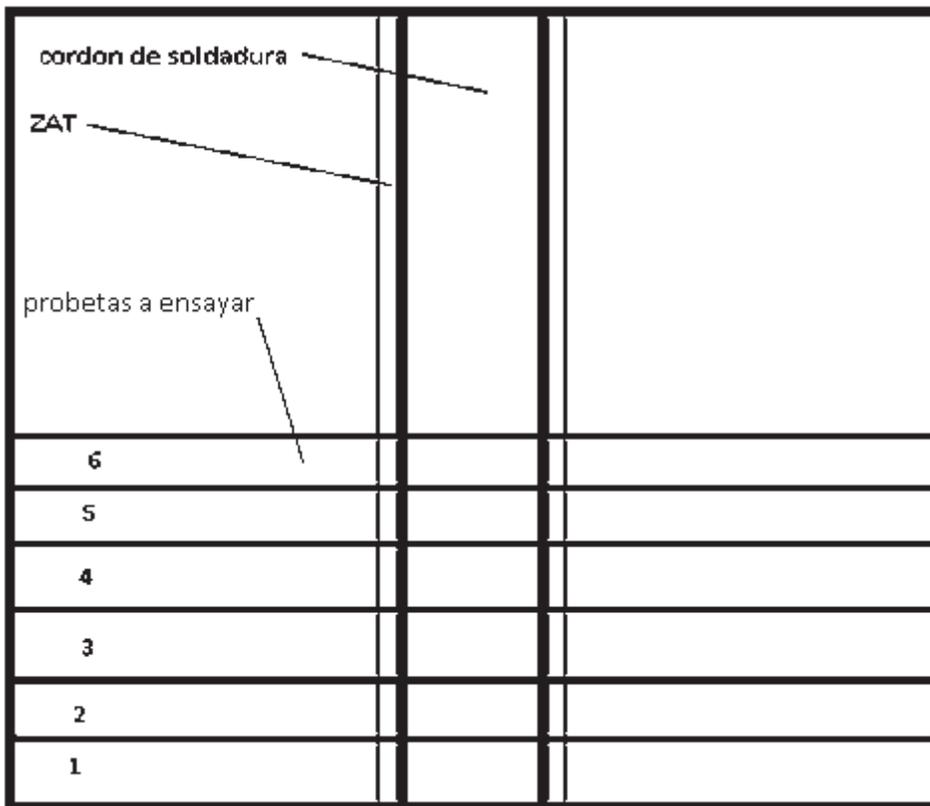


Figura 2.6. Seccionamiento de las probetas para ensayos metalográficos.

2.6 Análisis metalográfico

Se analizó el metal base en su condición inicial además del análisis de las uniones, para ello, fueron atacadas por medio de una solución llamada ácido nítrico, (nital), al 4% lo cual permitió observar la composición microestructural de las uniones, revelando así las diferentes zonas como la ZAT en tiempos de inmersión de 20 segundos.

2.7 Ensayos mecánicos

Se realizaron mediciones de microdureza Vickers (HV) del metal base, con la finalidad de determinar la correcta correspondencia de las propiedades mecánicas en metal base y en las uniones, como lo marca la sociedad americana para metales (ASM) y de las uniones soldadas por medio de la técnica tradicional aplicando una carga de 100 grs durante 15 segundos con un espaciamiento entre indentaciones de 250 micras, de acuerdo a la ASTM E92-82 e2.

El método de preparación para este análisis fue el mismo que se utilizó para la preparación metalográfica.

Por otra parte para los ensayos de tensión primeramente se ensayó el metal base en condiciones tal y como se recibió para determinar cuánto esfuerzo-deformación soportaba así mismo se ensayaron las probetas de las uniones soldadas para determinar el esfuerzo y la deformación que soportaron. La configuración de las probetas de ensayo de acuerdo a la norma de fabricación norma ASTM 638 como se ilustra en la figura 2.7 y 2.8

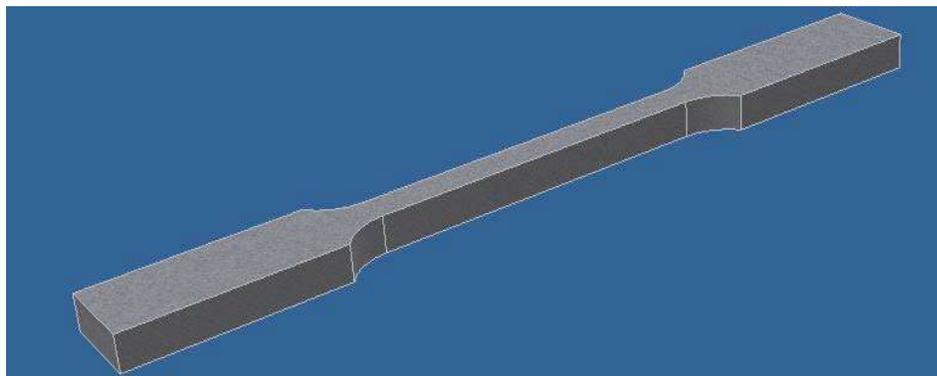


Figura 2.7. Configuración de probeta de tensión.

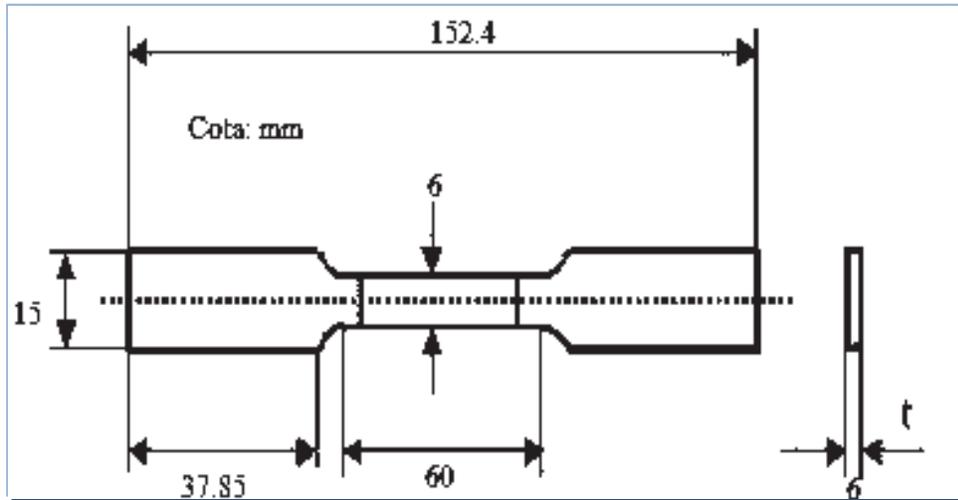


Figura 2.8. Dimensionamiento para probeta de tensión.

También se realizaron los ensayos de impacto con la finalidad de comprobar la energía absorbida entre las soldaduras realizadas y el material base correspondiente, utilizando un equipo de impacto charpy como se ilustra en la figura 2.9, las probetas se maquinaron de acuerdo a la norma ASTM E 23 y su configuración se ilustra en las figuras 2.10 y 2.11.



Figura 2.9 Máquina charpy para ensayos de impacto.

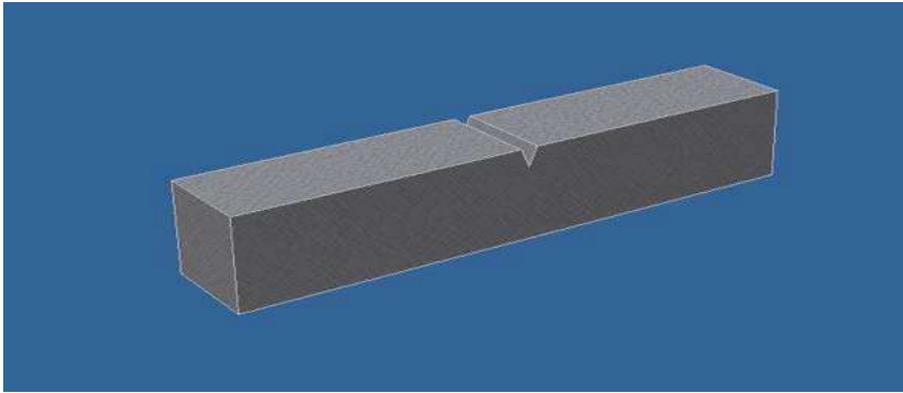


Figura 2.10. Configuración de la probeta de impacto. Norma ASTM E 23

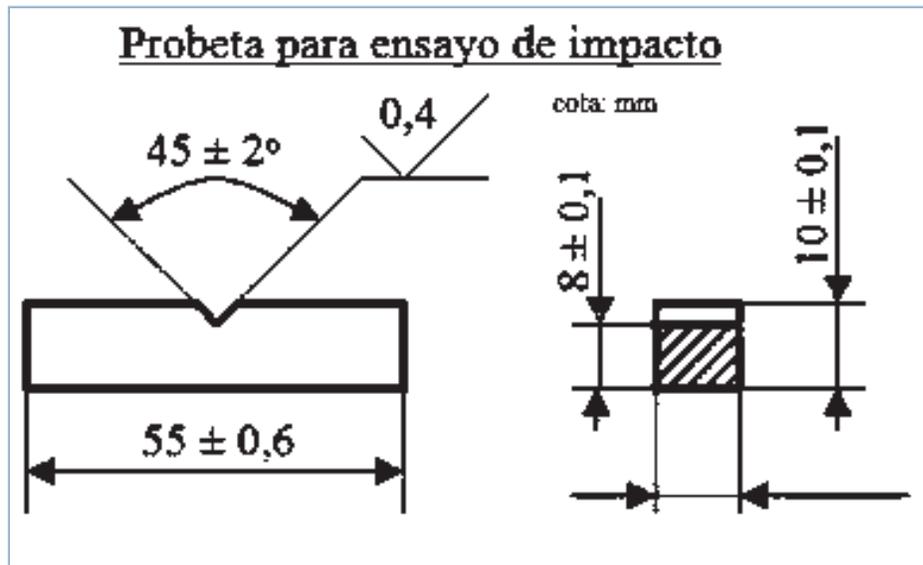
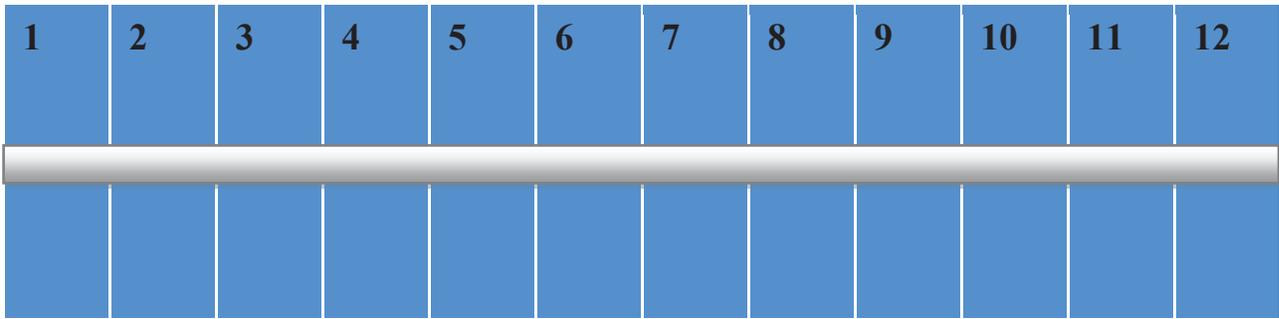


Figura 2.11. Esquematzación de dimensionamiento para probetas de impacto

La extracción de las probetas se realizó de acuerdo a la configuración de las figuras 2.12 y 2.13.

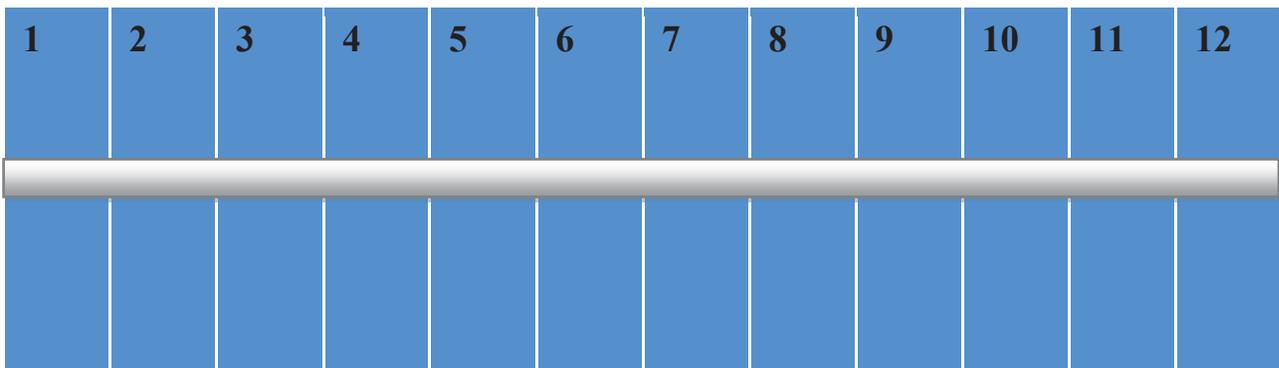


Probeta 1, 2, y3
Se emplearon para
Prueba de impacto

Probeta 4, 6, y 7 se
emplearon para tensión

Probeta 5 se empleo
para microdureza

Figura 2.12. Configuración de probetas para ensayos fundente celulósico



Probeta 1, 2, y3
Se emplearon para
Prueba de impacto

Probeta 4, 5, y 8 se
emplearon para tensión

Probeta 7 se empleo
para microdureza

Figura 2.13. Configuración de probetas para ensayos de probetas soldadas con fundente tradicional.

La figura 2.12 y 2.13 son una representación esquemática de la extracción de probetas de las placas soldadas con los dos distintos fundentes.

CAPITULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Caracterización del metal base

3.1.1 Microestructura del metal base.

La figura 3.1 muestra la microestructura del material, la cual está constituida de 98% de granos de ferrita y aproximadamente de 2% de perlita. Esto es debido a su composición química, la cual consta de un bajo contenido de carbono del 0.15% C y alto porcentaje de manganeso de 1.5% Mn, así como de 0.05% Nb, el manganeso tiene la particularidad de incrementar la resistencia mecánica de la ferrita, por encontrarse en solución sólida sustitucional, que en conjunto con el niobio, el cual actúa como refinador del tamaño grano, debido a que forma carburos, los que precipitan en el borde de grano, anclándolos y evitando el crecimiento y favoreciendo la nucleación, su temperatura de precipitación y disolución, se ha reportado que esta entre 1050 °C. Esta acción del niobio ayuda que el porcentaje de perlita sea bajo y que el bajo porcentaje de carbono del acero se consuma en solución sólida y en la formación de carburos de niobio.

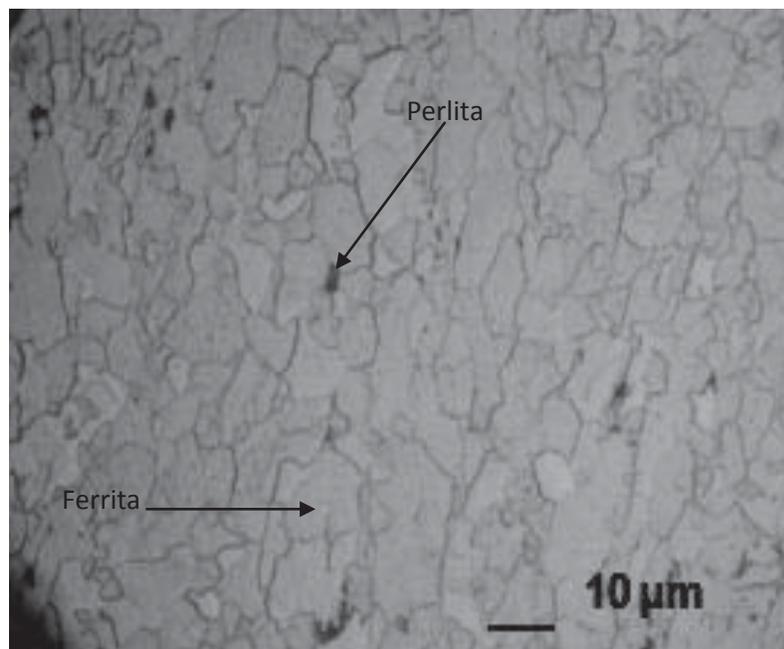


Figura 3.1 microestructura del material base.

Para el estudio de microdureza ensayaron dos probetas de las juntas soldadas, una soldada con fundente tradicional y la otra con fundente celulósico, la finalidad fue hacer la comparación de la microdureza en la zona de soldadura, zona afectada térmicamente y la zona de la interface que se da entre material base y zona afectada térmicamente.

La figura 3.2 muestra las probetas ensayadas, las líneas horizontales en negro indican la trayectoria de los puntos de la microdureza en cada una de las probetas, en donde se muestra los perfiles de soldadura de los cordones depositados con el proceso de soldadura por arco sumergido utilizando el fundente celulósico y fundente tradicional, en donde se puede apreciar la forma uniforme del cordón de soldadura depositado con fundente celulósico en su forma interior, mientras que en la parte exterior esto es la superficie o acabado, la forma es irregular debido a la baja cantidad de escoria depositada, mientras que el cordón de soldadura depositado con el fundente tradicional, la configuración interna es de forma irregular y el acabado superficial es de una configuración excelente, característica importante del proceso de arco sumergido con el fundente tradicional. Un aspecto que habrá que remarcar y que se observa claramente en el perfil de soldadura es que debido a la capa de escoria depositada en cada uno de los tres cordones de soldadura depositados, con el fundente tradicional, el perfil de soldadura fue más irregular y los primeros cordones de soldadura fueron refinados en su totalidad lo que da como consecuencia en su comportamiento mecánico una mayor tenacidad.

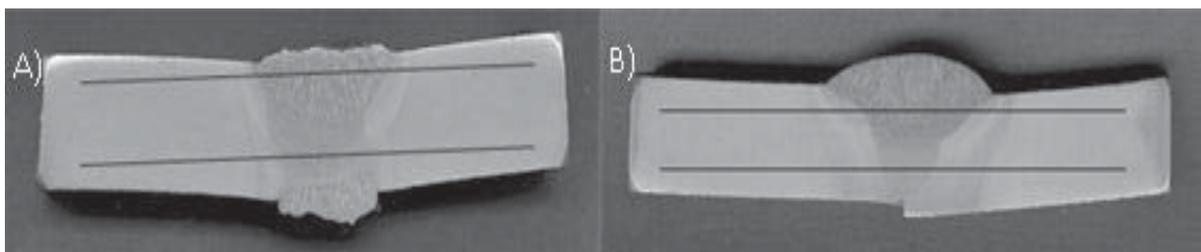


Figura 3.2. Macrografías para ensayos de microdureza, A) unión con fundente celulósico y B) unión con fundente tradicional.

3.2 Discusión de las micrografías del fundente celulósico y tradicional

En las figura 3.3 a) y b) podemos apreciar una microestructura uniforme y una distribución de grano muy buena, el efecto que causa el refinamiento de grano de un cordón con respecto al subsiguiente se ha establecido en la literatura explicándose de la siguiente forma: la distribución del refinamiento de grano se debe al calor aportado del subsiguiente cordón con respecto a un anterior lo cual ayuda a refinar la microestructura pero esto tiene un efecto marcado por el crecimiento del mismo grano, debido a la temperatura proporcionada.

Ahora bien si esto es cierto también cabe recordar que el efecto de humedecer el fundente utilizado es con la finalidad de que dicha humedad sirva como un medio de intercambiador de calor con la disociación de la molécula de agua, para con este efecto ayude a controlar el tamaño de grano, ya que como se ilustra en la figura 2.3, el fundente celulósico a pesar del 12.5% de humedad propicia una flama detrás del desplazamiento del arco eléctrico, por la combustión de celulosa del fundente.

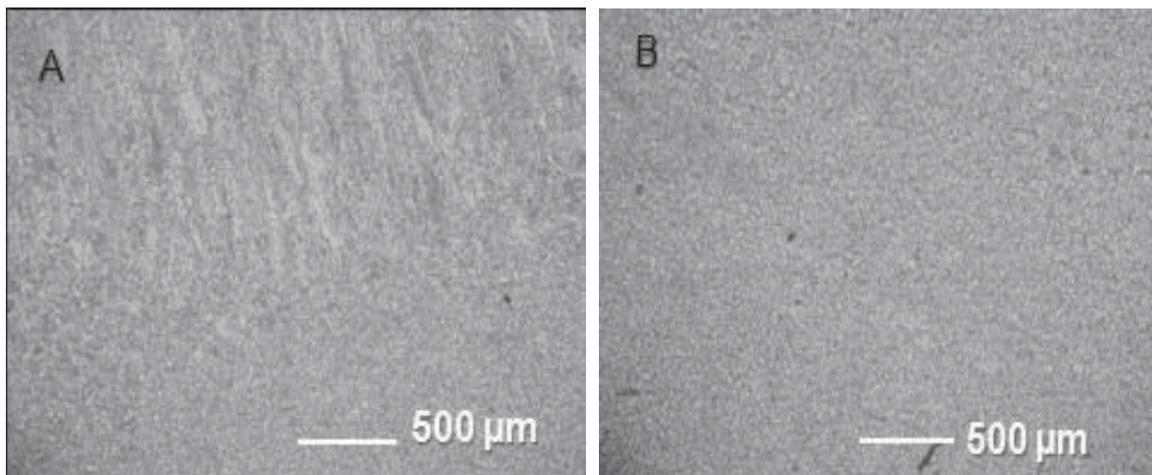


Fig. 3.3. Muestra la microestructura de las interfaces del primer cordón de soldadura afectado por el segundo a) fundente celulósico y b) fundente Tradicional.

En las figura3.4 se puede apreciar una microestructura de grano de ambas placas soldadas con fundente celulósico y tradicional que presentan un gran refinamiento de grano, aun así la microestructura correspondiente al fundente celulósico presenta un refinamiento de grano mayor, de igual forma en la figura 3.5 se tienela presentación de micrografías de cordones en la parte superior de la unión, los cuales no presentan afectación térmica por los demás cordones, lo cual demuestra el efecto que marca el fundente celulósico húmedo en la participación de refinamiento de grano.

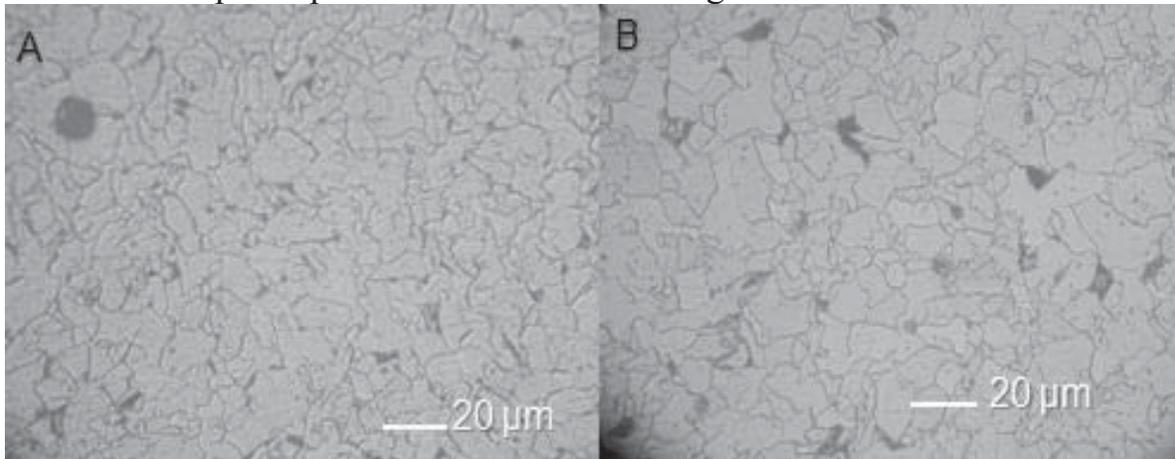


Figura 3.4. Microestructuras de refinamiento de grano en los cordones de soldadura a) Fundente celulósico y b) fundente tradicional.

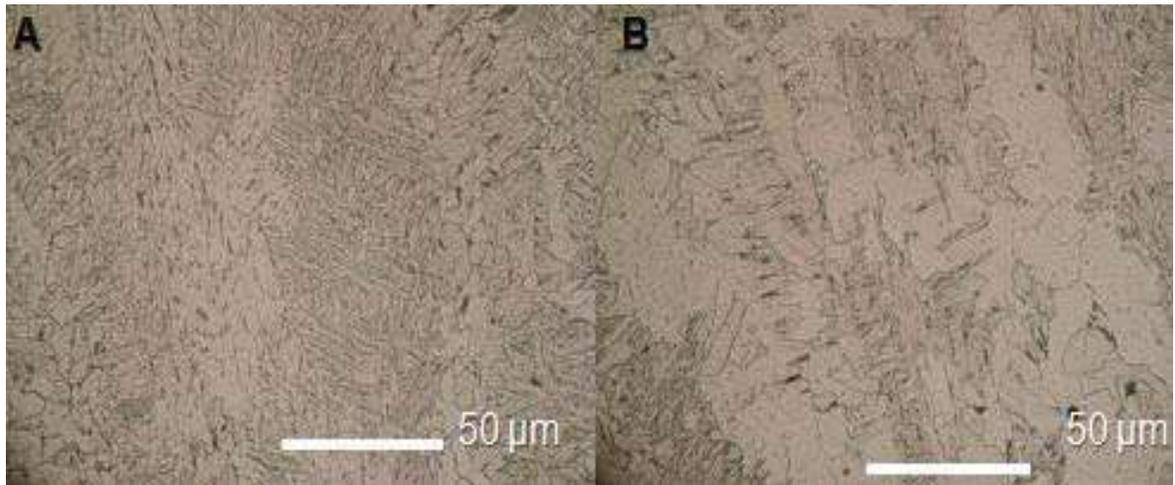


Figura 3.5 Microestructura de los cordones de soldadura sin afectación térmica a) Fundente celulósico y B) fundente tradicional

Por otra parte en la figura 3.6 se muestra la interface del último cordón de soldadura sin afectación térmica posterior en donde no se observa ningún tipo de fisuras en la ZAT y el cordón de soldadura, debido al hidrógeno, tal como es del conocimiento generalizado, que donde existe la presencia de hidrógeno durante la soldadura, siempre existe el riesgo de la fisuración en frío, la cual aparece después de haberse utilizado la soldadura un día o hasta treinta días después [4, 13].

La figura 3.7 muestra la zona afectada térmicamente entre material base y cordón de soldadura donde no se observan fisuras ni defectos significativos.

Esto es erróneo, considerando en forma generalizada, ya que se contradice con lo estipulado en [1, 2] en donde se recomiendan los electrodos celulósicos para la pasada de raíz, en soldaduras de multipasadas, ya que es lo más exigido por las deformaciones causadas, debido a los esfuerzos generados por los ciclos térmicos de los cordones subsiguientes, de igual forma también contradicen las investigaciones de las soldaduras subacuáticas y las reparaciones de emergencia [6-10], realizadas con electrodos revestidos en tuberías subacuáticas, de conducción de petróleo, plataformas y cascos de barcos, porque en donde puede haber mayor cantidad de humedad que afecte la soldadura subacuática, disociando el agua, estableciendo el arco eléctrico en el seno de agua

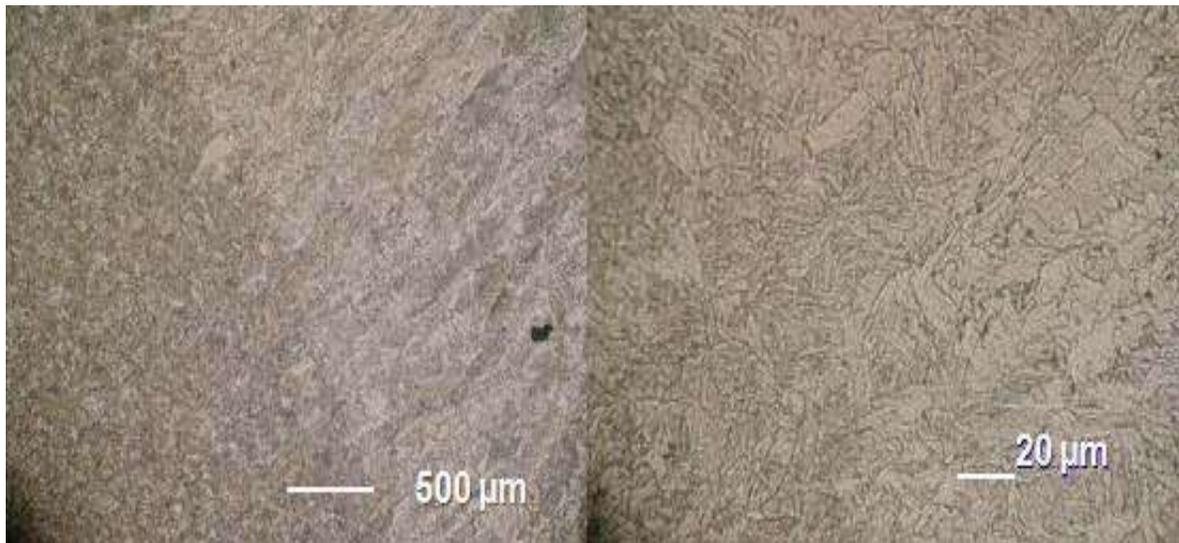


Figura3.6. Muestra la ZAT del cordón de soldadura entre el material base y el último cordón de soldadura, en donde no se observa ninguna presencia de posibles micro fisuras, debidas al hidrógeno por el fundente celulósico

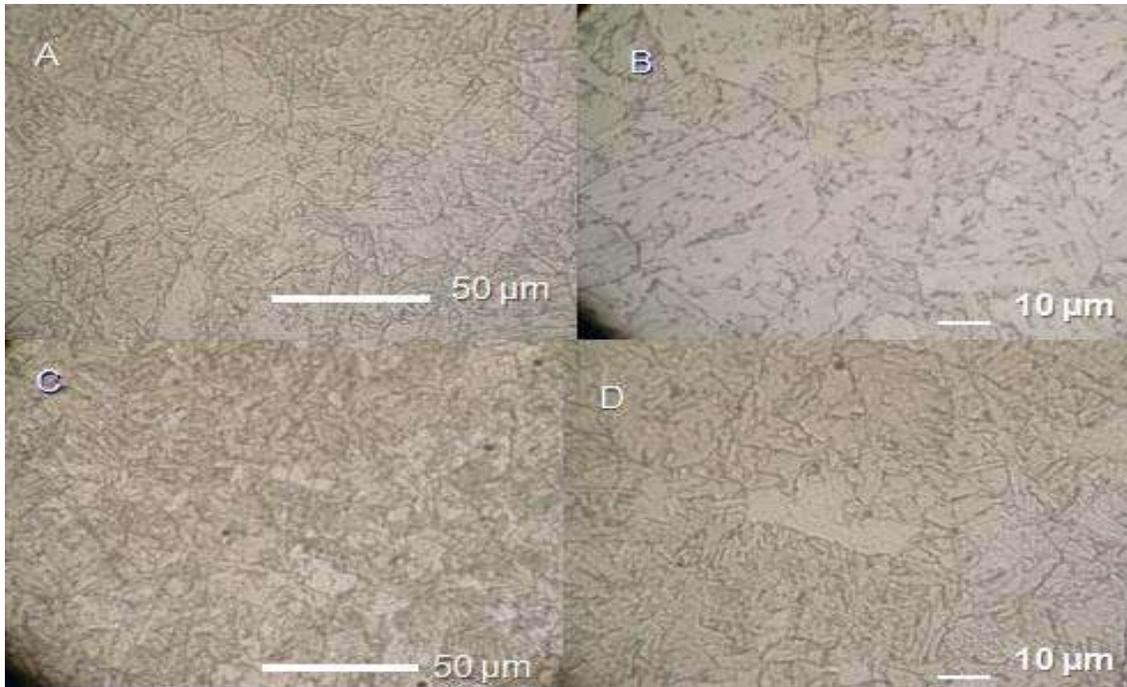


Figura 3.7. Zona afectada térmicamente entre el material base y el cordón de soldadura a y b) fundente celulósico y c y d) fundente tradicional.

En cuanto a los perfiles de microdureza realizados sobre los perfiles de soldadura mostrados en la figura 3.2 se puede expresar lo siguiente: que la diferencia del comportamiento a la microdureza no es tan significativa ya que el promedio es muy similar tanto en el cordón de soldadura como en la ZAT, mientras que en los resultados del ensayo de tensión, si se observan diferencias más significativas entre los cordones de soldaduras y el material base. El material base tiene una resistencia mecánica superior a cualquiera de los dos cordones de soldadura, en cuanto al fundente celulósico da un 15% mayor y al fundente tradicional da un 24% superior esto tiene su explicación en el tipo de electrodo utilizado ya que el electrodo utilizado fue el EM13K, que de acuerdo a su composición química tiene menos porcentaje de carbono y manganeso que el acero, puesto que el acero tiene 0.15% C y 1.5% Mn mientras que el electrodo tiene 0.12% C y 1% Mn. La figura 3.8 muestra los perfiles gráficos de microdureza.

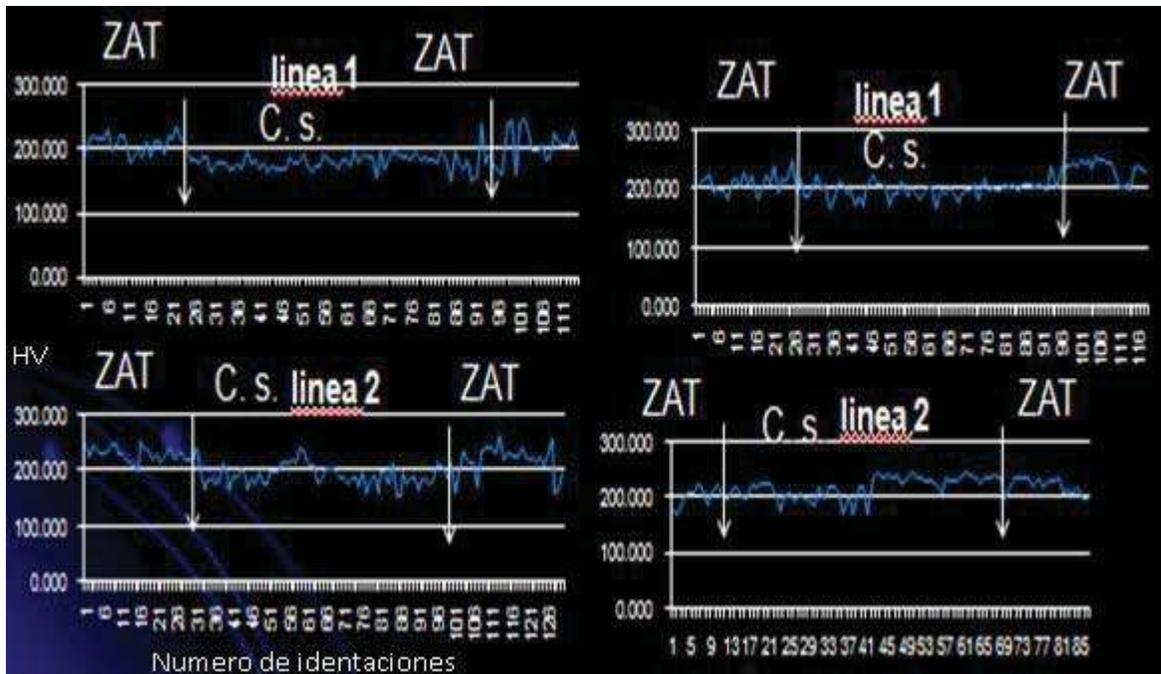


Figura 3.8 Graficas de microdureza correspondientes a cada línea horizontal en la figura 3.2.

El propósito del desarrollo del presente proyecto de investigación fue el de demostrar que el fundente celulósico propicia características diferentes y que el hidrógeno no afecta a ciertos materiales como está generalizado el concepto, en el ámbito que la gente dedicada a la soldadura, sin considerar los aspectos tan importantes como, los expresados en las investigaciones de soldadura subacuáticas [6-11] y lo expresado por García y colaboradores [11-12], quienes hacen ciertas consideraciones sobre la cantidad de escoria depositada sobre el cordón de soldadura en función del tipo de electrodo, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este proyecto utilizando el proceso de arco sumergido, con fundente celulósico.

El uso del electrodo EM13K fue únicamente con el propósito de comparar los fundentes, celulósicos y tradicional F70A, utilizando este electrodo, ya que siendo estrictos en la explicación real el electrodo que se utilizaría sería el EH15K, para el tipo de acero de tubería API-5L-X-60.

Los resultados de los ensayos a tensión comparados entre sí con las probetas unidas con fundente tradicional, celulósico y material base se presentan a continuación en la tabla 3 de resultados, En donde se observa claramente la diferencia del esfuerzo máximo del acero y las soldaduras obtenidas tanto con fundente tradicional y celulósico. Observándose a la vez que el fundente celulósico tiene mayor resistencia mecánica pero menor porcentaje de reducción de área debido a la acción de extracción de calor de los gases desprendidos por la combustión de la celulosa y la disociación de la humedad.

En cuanto al comportamiento en forma gráfica los ensayos de tensión, las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 ilustran el comportamiento grafico de las soldaduras con fundente celulósico, tradicional y material base respectivamente.

Tabla3. Valores de ensayos a tensión.

Probeta	Esfuerzo max. MPa	% de Elong
Tensión fundente celulósico	482.33	49
Tensión fundente tradicional	432.33	63.3
Tensión metal base	567.66	68

A continuación se presentan las gráficas de los ensayos de tensión.

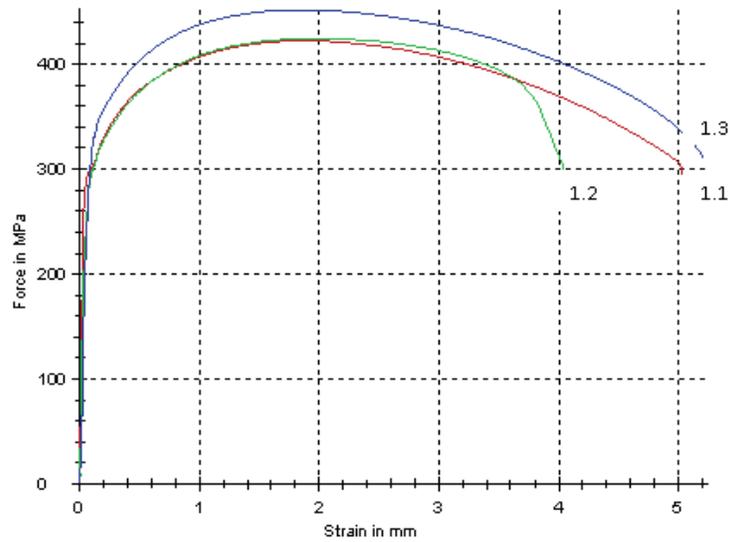


Figura 3.9 Ensayo de tensión probetas con fundente tradicional.

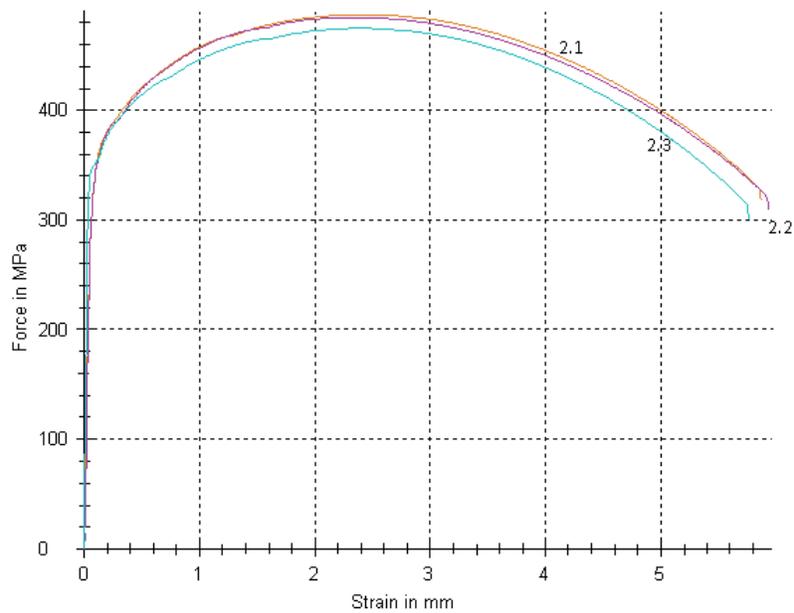


Figura 3.10 Ensayos de tensión probetas con fundente celulósico.

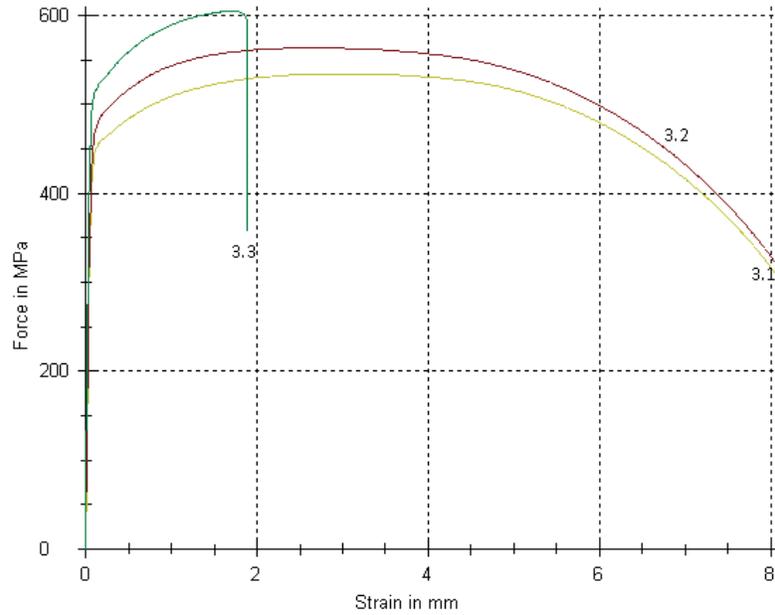


Figura 3.11 Ensayos de tensión probetas metal base.

En las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 podemos apreciar un comportamiento típico de las curvas esfuerzo-deformación para aceros al carbono de bajo y medio contenido de C.

3.3 Ensayo de impacto

Los resultados de los valores obtenidos en los ensayos de impacto correspondientes a la cantidad de energía absorbida en joules por la deformación de cada materia se presentan en la tabla 3.1

Tabla 3.1 energía absorbida en probetas de impacto.

Probeta	Energía J
Fundente celulósico	90
Fundente tradicional	100
Metal base	160

Los resultados de impacto concuerdan con los ensayos de tensión en cuanto al %elongación y al enfriamiento rápido debido a los gases producidos durante la soldadura con fundente celulósico.

3.4 Imágenes de microscopia de barrido

Fractura de impacto en probetas con fundente celulósico.

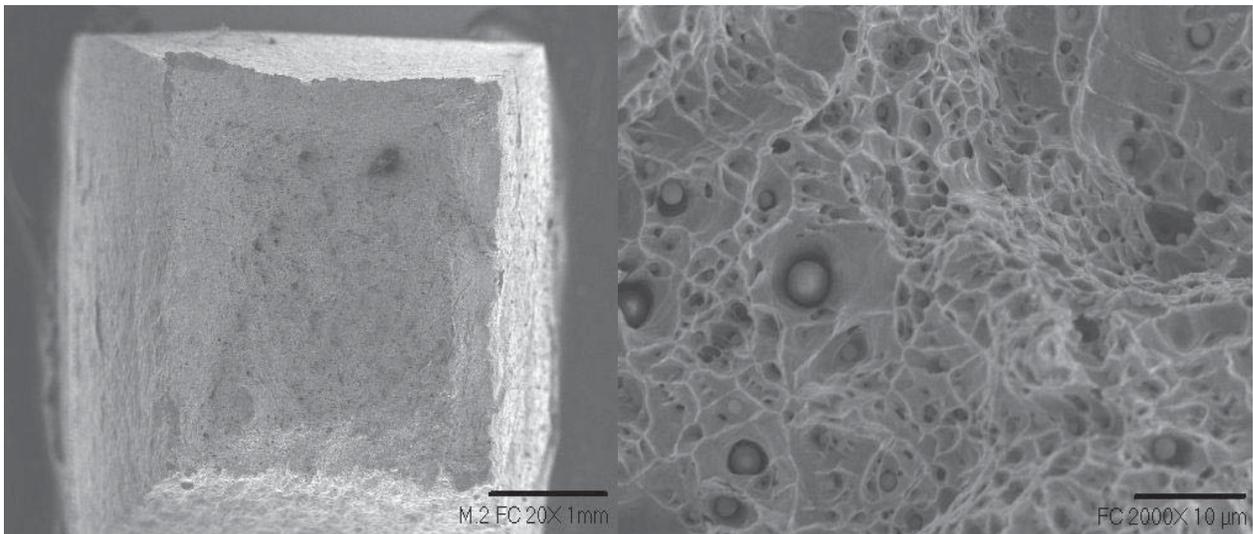


Figura 3.12 Fractura en probeta con fundente celulósico.

El tipo de fractura de las soldaduras con fundente celulósico y tradicional, es un tipo de fractura dúctil, con presencia, de inclusiones no metálicas, con la pequeña diferencia de que los micro hoyuelos son más pequeños en la fractura del fundente tradicional, esto debido al mayor % de reducción de área y a la

mayor energía absorbida durante el ensayo de impacto, lo cual concuerda con el aspecto de la fractura del material base que presenta micro hoyuelos pequeños, con algunos hoyuelos grandes con presencia de inclusiones pequeñas en su interior, ver figuras 3.12, 13 y 14.

Fractura en probetas con fundente tradicional.

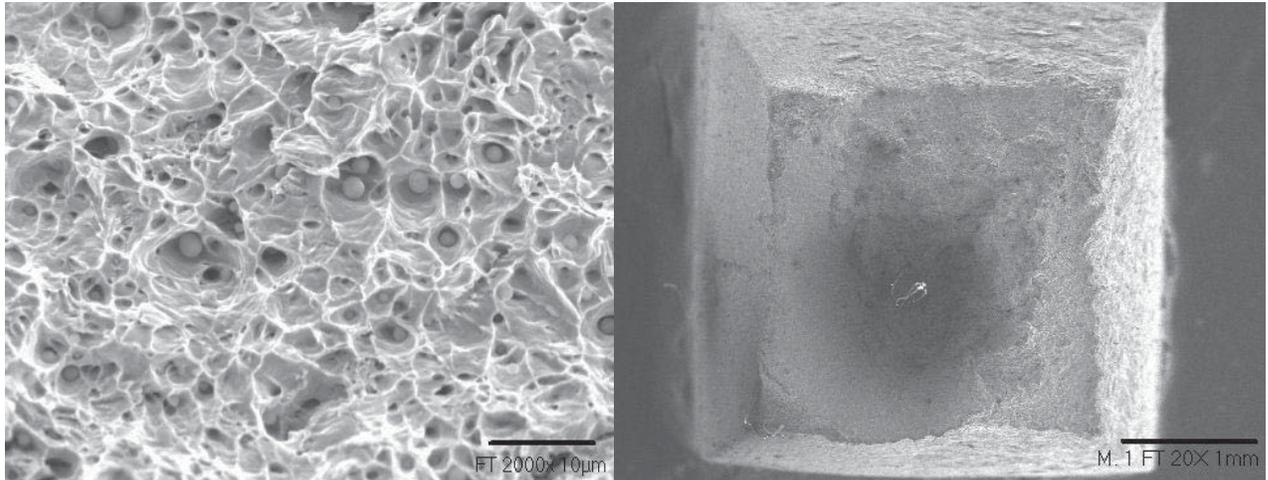


Imagen 3.13 Fractura en probeta con fundente tradicional.

Fractura en probetas de metal base.

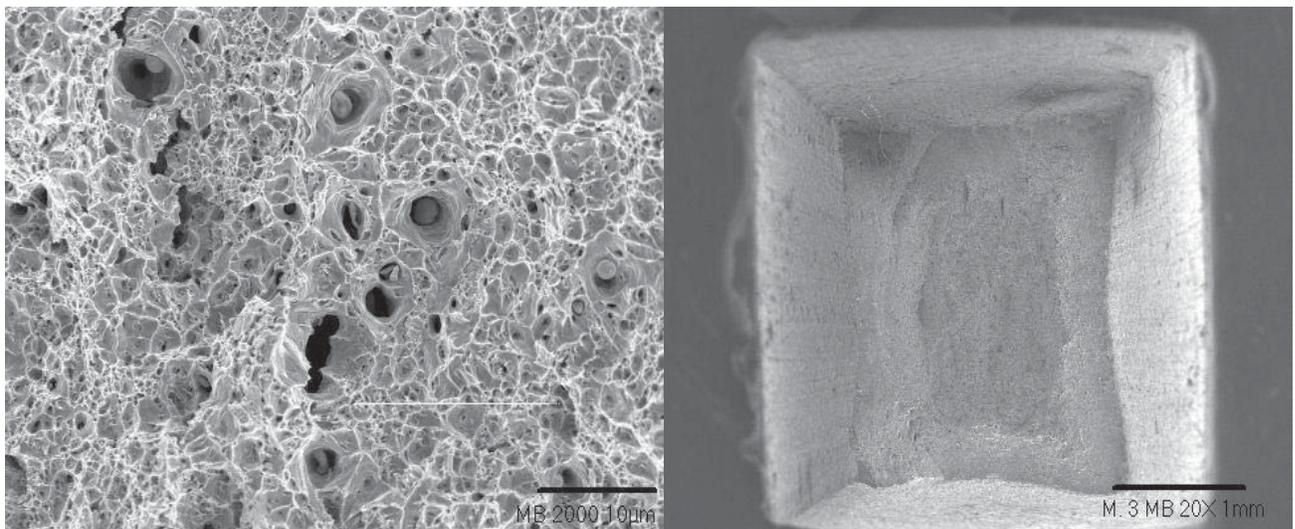


Figura 3.14 Fractura en probeta metal base.

CONCLUSIONES

Una vez realizado el presente proyecto de investigación podemos concluir lo siguiente.

1.- El uso del fundente celulósico, mediante el proceso de soldadura por arco sumergido, corrobora lo que en forma tradicional se aplica experimentalmente, y teóricamente se contradice.

a) El hidrógeno es nocivo para la soldadura en forma teórica, pero prácticamente se realizan soldaduras con electrodos celulósicos y reparaciones subacuáticas con electrodos revestidos.

b) En las aplicaciones experimentales o prácticas no se presentan fisuraciones por hidrógeno, como tampoco se obtiene en la realización del presente proyecto.

2.- El uso del hidrógeno o medios que contiene hidrógeno durante la soldadura debe conocerse en que tipos de aceros se debe aplicar para no ocasionar los problemas de fisuración y porosidad por hidrógeno.

a) En electrodos y fundentes que no depositan una gran cantidad de escoria como los fundentes y recubrimientos celulósicos y mezcla con fundentes rutilicos.

b) Los fundentes básicos que depositan una capa de escoria gruesa, no deben usarse con presencia de humedad, porque la capa de escoria solidifica rápidamente impidiendo la salida del hidrógeno y provocando porosidades en la soldadura.

3.- Aceros que contengan de un 15-20% de perlita, no deben ser soldados con electrodos o fundentes que contengan humedad porque al propiciar una microestructura acicular, esta es susceptible a la fisuración por hidrógeno.

EXPECTATIVAS A FUTURO.

1.- De acuerdo al desarrollo actual de los aceros es importante modificar el criterio generalizado sobre el concepto del daño por hidrógeno en las soldaduras de los aceros para tuberías, en cuanto a la humedad del fundente y revestimiento de los electrodos celulósicos.

2.- Siendo muy concretos en la aplicación del fundente celulósico, así como en el material correspondiente, para no caer en la generalidad tal como es el concepto actual del daño por el hidrógeno, el cual se efectuó hace mas de 50 años, cuando los aceros contenían mayor porcentaje de carbono y menor porcentaje de Mn.

BIBLIOGRAFIA

1. G. E. linnert, welding Metallurgy Carbon and Alloy Steels, American Welding Society, fourth edition 1994.
2. A..W.S. Welding Handbook, vol. 2, Eighth, edition, 1991.
3. R. García, V. H. López y M. A. Romero, Uso del hidrógeno en la soldadura como medio de mejoramiento de las propiedades mecánicas de la unión en aceros de bajo carbono, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH. Año 2009 6º foro de ingeniería e investigación de los materiales
4. M. Suban, J. Tusek, M. Uran ,Use of hidrogen in welding engineering in former times and today, Journal of Materials Processing Technology 119 (2001) 193-198
5. P.S.Maslennikov y VL Russo,Special features of the effect of hydrogen on the weldability of structural steels in underwater welding by the wet. Welding international 2003 vol. 17No 3, pp. 221-225.
6. M. Rowe and S. Liu, Recort developments in underwater wet welding, Science and Technology of welding and joining, 2001, vol. 6, No. 6 pp 387-396.
7. F. Schmelzer and M. Kocak, Analysis of welds of offshore steels, MikrochinActo [wien] 1990, II pp 251-258.
8. N. Yurioka and Y. Horii. Recent.developments in repair welding technologies in japan, Science and Technology of Welding and Joining 2006, vol. 13, No 3, pp. 255-258.
9. Y. H. Shi and G. R. Wang, Vision based seam tracking system for underwater cared arc welding. Science and technology of welding and joining, 2006, vol. 11, No, 3, pp.271-277.
- 10.E. C. P. Pessoa, A. G. Brocareense, E. M. ZicaSiliu and F. P. Guerrero.Porosity variation along multipass underwater wat welds and its influence on mechanical properties.Journal of Materials Processing Technology vol. 179, 2006, pp. 239-243.
11. R. Garcia, V. H. López and E. Sixtos, Evaluation of the porosity in bead on plate welds deposited underwater and in ambient air with

- commercial coated electrodes, 16th international materials research congress, 2007, Cancun Quintana Roo, Mexico.
- 12.R. Garcia, V. H. López and E. Sixtos, Efecto del tipo de microestructura en la soldadura subacuática y tradicional en el aire utilizando electrodos húmedos, 1^{er} congreso internacional de metalurgia y materiales, 2007, Monclova Coahuila Mexico.
 - 13.Delayed cracking in steel weldments, Welding journal Abril 1964
 - 14.E. Saldaña, R. Lezcano, F.J. Belzunce y C. Rodríguez, Análisis de los procesos de fractura en presencia de hidrógeno de aceros resistentes al medio ácido Análisis de la fractura, Vol. 18, (2001)
 - 15.D.rAskeland, La Ciencia e Ingeniería de los Materiales, tercera edición, editorial Iberoamerica S.A. de C.V. 1987.
 - 16.ASTM, Standard test method for Vickers hardness of metallic materials 2003.
 - 17.Front Cover. F. P. Marín Andrés. formación para ingenieros. Review. Librería-Editorial Dykinson, 2006 – 194, pág. 36.
 - 18.Weldinghanbook vol. 1 1999, (comportamiento del arco eléctrico)
 19. A. Borreriro, tratamientos térmicos de aceros 8^{ba} edición , editorial Dossat 1982.
 - 20.Unión corbida, Suban, arc welding handbook, 1980.
 21. [Http://www.energiasostenible.net/confinamineto_hidrógeno.htm](http://www.energiasostenible.net/confinamineto_hidrógeno.htm).