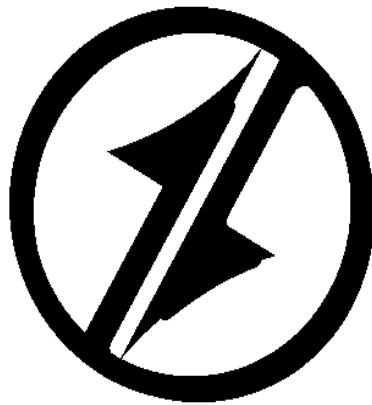


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



EFFECTO DE LA CORROSIÓN EN EL DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS

POR

ROCÍO VIRIDIANA RUÍZ CONTRERAS

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA; A ABRIL DE 2010.

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



EFFECTO DE LA CORROSIÓN EN EL DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS

POR

ROCÍO VIRIDIANA RUÍZ CONTRERAS

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA; A ABRIL DE 2010.

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía “**EFFECTO DE LA CORROSIÓN EN EL DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS**”, realizada por el alumna **ROCÍO VIRIDIANA RUÍZ CONTRERAS**, con número de matrícula **08-ES068** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

DR. JORGE LEOBARDO ACEVEDO

DÁVILA

Tutor Académico

MC. GERMAN LEÓN LARA

Tutor en Planta

**M.C. MARCO AURELIO
GONZÁLEZ ALBARRÀN**

Asesor

MC. GABRIEL GARCÍA CERECERO.

Asesor

Vo. Bo.

**M.C. CLAUDIA A. GONZÁLEZ
RODRIGUEZ**

Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Postgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización de la alumna **ROCÍO VIRIDIANA RUÍZ CONTRERAS**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **EFFECTO DE LA CORROSIÓN EN EL DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 23 del Abril del 2010.

DR. ABRAHAM VELASCO
TÉLLEZ
Presidente

DR. FELIPE DE JESÚS
GARCÍA VÁZQUEZ
Secretario

DR. JORGE LEOBARDO
ACEVEDO DÁVILA
Vocal

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a COMIMSA por la oportunidad que me brindó de cursar la especialidad en tecnología de la soldadura industrial, especialmente a cada uno de los maestros que me apoyaron durante mi estancia en dicha institución; también agradezco a CONACYT por haber confiado en mí y haber otorgado una beca para así culminar mis estudios de especialidad.

ÍNDICE GENERAL	Pág.
Síntesis	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	5
1.2.1 Objetivos Específicos	6
1.3. Justificación	7
1.4. Beneficios del proyecto	8
1.5. Alcance	9
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN A LA SOLDADURA Y AL DISEÑO DE UNIONES	10
2.1 ¿Qué es la soldadura?	10
2.1.1 Ventajas de aplicar la soldadura para materiales	13
2.1.2 ¿Desde cuándo se aplica la soldadura y cuáles fueron los primeros mecanismos de aplicación?	14
2.1.3 Evolución de la soldadura	15
2.2 Aparición del concepto de diseño de soldadura	17
2.2.1 Diseño de uniones soldadas	19
2.2.2 ¿En qué consiste la unión del metal?	26
2.2.3 Factores aplicados en el diseño de uniones	29
2.3 Tipos de Carga	32
2.3.1 Carga de tensión	33
2.3.2 Carga de compresión	34
2.3.3 Carga cortante	37
2.4 Resistencia de las soldaduras	41
2.4.1 Transferencia de carga y esfuerzos en soldaduras	47
CAPÍTULO 3. CORROSIÓN EN SOLDADURAS	52
3.1 Aspectos considerados en la unión de soldaduras para evitar problemas de corrosión	53
3.2 Procesos aplicados a componentes sometidos a condiciones corrosivas	62

3.2.1 Procesos de soldadura con material de aporte	65
3.2.2 Material de aporte	68

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
3.3 Selección de materiales	82
3.3.1 Tipos aplicados para componentes sometidos en ambientes corrosivos	83
3.3.2 Aceros al Carbono	83
3.3.3 Aceros Inoxidables	90
3.3.4 Materiales de aporte para aceros al Carbono e Inoxidables	94
3.4 Corrosión en presencia de Ambientes Ácidos y Alcalinos	98
3.4.1 Corrosión bajo tensiones inducida por hidrógeno (HSSC)	100
3.4.2 Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC)	110
3.4.2.1 Mecanismo de ampollamiento por HIC	112
3.4.2.2 Crecimiento de grietas en frío	115
3.4.2.3 Localización de las grietas en frío en soldaduras de aceros	128
3.4.2.4 Fisuración por hidrógeno orientado por tensión (SOHIC)	121
CAPÍTULO 4. Recomendaciones	128
CAPITULO 5. Conclusiones	130
Bibliografía	133
Lista de figuras	138
Lista de tablas	140
Resumen autobiográfico	142

SÍNTESIS

En el documento, se destaca que la práctica de la soldadura data desde hace miles de años, en la antigua Grecia se lograba la unión de piezas metálicas a través del calor y golpes para obtener piezas compuestas con cierta resistencia mecánica. Por otra parte, el documento resalta la importancia que tiene el diseño de uniones soldadas, siendo el objetivo de la especificación como el de factores de resistencia y carga en la fabricación de estructuras soldadas bajo varias consideraciones de carga, empleando factores separados para cada carga y resistencia.

En este contexto, el diseño de uniones tiene gran relevancia, ya que un diseño inapropiado podría originar serios problemas, que en muchos casos han llevado a la pérdida de vidas humanas. Entre los problemas que provoca un diseño inadecuado se pueden citar características mecánicas de la unión final; así como en el ambiente en el cual están, sometidas dichas uniones, que podrían estar fuera de especificación del diseño. Por lo anterior expuesto, se plantea este tema de estudio para su análisis, relacionando metodologías, materiales de uniones y costos. Con la ayuda de este análisis se puede hacer mucho en la ingeniería de detalle, para mejorar la resistencia a la corrosión en la unión. Para el estado de la corrosión es necesario tener conocimientos interdisciplinarios, donde se debe considerar aspectos directamente relacionados; desde la influencia de cuestiones mecánicas, deformaciones en frío, o térmicas, hasta velocidades de enfriamiento después de la soldadura. Derivado de la búsqueda de información especializada en diferentes medios, se detectó, la falta de personal técnico o especialistas en el diseño y cálculo de uniones soldadas, así como la carencia de información al respecto.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La soldadura es un proceso en el que se unen partes metálicas mediante el calentamiento de sus superficies hasta un estado fluido o semi-fluido, permitiendo que el metal líquido fluya y se una, con o sin la adición de otro metal de aporte.

Debido a este proceso de unión, el material sufre cambios que pueden modificar su estructura al momento de solidificar, como también en el estado sólido como sucede en la soldadura por fricción y, por ende, las propiedades mecánicas que están en función de su composición química y microestructura, tanto del metal base, como material de aporte. Es por eso que se deben tomar en cuenta diferentes características que influyen para que una estructura cumpla con los requerimientos de aplicación, para la cual va a estar empleado dicho componente o estructura soldada. Por otra parte, se sabe que cuando los materiales metálicos son sometidos a ciertas condiciones de trabajo y/o ambientes, estos pueden llegar a fallar. Todos los cambios de degradación que sufre el material se le llama “Corrosión”, la cual puede ser definida de diferentes formas:

- Degradación de un metal debido a la reacción con su ambiente
- Degradación de un material por medios diferentes a los mecánicos (mecanismos de corrosión).

Todos los metales y uniones soldadas sufren corrosión, es fácil observar a nuestro alrededor y encontrar la corrosión. Por ejemplo, en la industria petrolera y la química, tienen numerosos problemas de corrosión particulares de acuerdo a los procesos que utilizan. Esto se debe al uso de cloruro de sodio, azufre, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico y agua, más que por petróleo crudo o la gasolina. Prácticamente todos los ambientes son corrosivos en algún grado. Entre los tipos de corrosión destacan ^[12]:

Corrosión a bajas y altas temperaturas.

- Corrosión por oxidación.
- Corrosión electroquímica.

Sin embargo, la clasificación que más se acepta es la de corrosión en:

- Húmedo, la cual ocurre cuando se encuentra presente un líquido.
- Seco, que se presenta cuando vapores y gases son generalmente los agentes corrosivos. Este tipo de corrosión se asocia más con altas temperaturas.

Es por eso que al diseño de una unión debe cumplir con especificaciones tanto en la parte mecánica, donde se involucra resistencia de las soldaduras así como del aspecto metalúrgico, el cual es muy importante respecto a la corrosión. Por lo anterior, cualquier diseño empieza con un bosquejo en una hoja de papel, donde poco a poco se van especificando materiales, técnicas de unión, métodos de protección, y de ser posible, con referencia de códigos de diseño, normas de materiales y procesos. Sin embargo, en todo proceso, los ingenieros pueden cometer errores de diseño, normalmente por falta de información suficiente, que muchas veces acaban con problemas de corrosión.

En el proceso histórico de las uniones, la adopción de la soldadura fue muy lenta, durante varias décadas, debido a que muchos ingenieros le atribuían dos grandes desventajas^[12]:

- 1) Tenía poca resistencia a la fatiga, en comparación con las conexiones atornilladas o remachadas
- 2) Era imposible asegurar una alta calidad en la soldadura, si no se contaba con una inspección irracionalmente amplia y costosa.

Estas apreciaciones negativas persistieron durante muchos años, es por lo que se vio la necesidad de desarrollar nuevas técnicas, e implementar el diseño de uniones soldadas para mejorar la resistencia de la soldadura y aumentar su eficiencia. Así mismo, otro factor importante que interviene en la selección de procesos de soldadura, es el impacto en costos que se refleja cada vez que se realiza una estructura soldada.

En México, no fue la excepción, por tal razón se plantea el siguiente estudio que consiste en desarrollar el estado del arte que guarda el diseño de uniones con énfasis en los aspectos de corrosión involucrados.

1.2 Objetivo general

El principal objetivo es estudiar y analizar la literatura que existe referente al tema de diseño de uniones; así como los factores que intervienen en los criterios de diseño para obtener conocimientos generalizados para el desarrollo de una unión soldada, de buena calidad.

1.2.1 Objetivo Especifico

En este objetivo específico se incluye el desarrollo de tópicos de diseño de uniones de metales con énfasis en los aspectos de corrosión.

- Recopilar información en el tema de corrosión y uniones soldadas.
- Determinar las variables involucradas en la corrosión de la unión.
- Analizar y discutir la información técnica científica.
- Escribir y defender trabajo desarrollado.

1.3 Justificación

El especialista dedicado a la unión de metales, independientemente del proceso de soldadura, siempre debe tener presente que las características finales de una estructura soldada dependen fundamentalmente de un diseño adecuado. Así mismo, deberán considerarse los factores necesarios antes de proyectar cualquier construcción soldada.

Con el fin de desarrollar una función eficiente de un componente soldado, es necesario que el ingeniero deba tener conocimientos de las prácticas y principios de corrosión, naturaleza de los ambientes corrosivos, fabricación de los materiales y diseño. Un estudio completo y comprensivo requiere del conocimiento de varias disciplinas del conocimiento científico (electroquímico, metalúrgico, físico-químico, y termodinámico).

Por tal razón, el presente trabajo, tiene la finalidad de reunir información que permita establecer las bases el tema de diseño de uniones de buena calidad.

1.4 Beneficios del proyecto

Derivado del presente trabajo, se logrará integrar información que permita conocer y entender los conceptos de corrosión, y los aspectos involucrados en el diseño de uniones de materiales metálicos.

1.5 Alcances del proyecto

Con este proyecto se pretende lograr una compilación de la información, así como el análisis, del estado del arte del conocimiento relacionado con el diseño de uniones de materiales metálicos, con énfasis en el impacto de los aspectos de corrosión involucrados. De tal forma, que esta monografía sirva de consulta para futuros proyectos e investigaciones.

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN A LA SOLDADURA Y AL DISEÑO DE UNIONES

2. Introducción a la soldadura y al diseño de uniones

En el desarrollo actual de materiales de alta tecnología, donde se busca mayor eficiencia y competitividad, el aspecto de diseño resulta fundamental. La mayoría de los ingenieros aceptan que las juntas soldadas tienen una resistencia considerable a la fatiga durante un periodo de tiempo; pero, también admiten que las normas de certificación de los soldadores, las mejores técnicas utilizadas y los requerimientos para la mano de obra que marcan las especificaciones de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS por sus siglas en inglés), hacen que la inspección de la soldadura, sea un problema menos difícil. Aunado a lo mencionado, la química de los aceros manufacturados actualmente está especialmente formulada para mejorar su soldabilidad.

2.1 ¿Qué es la soldadura?

La soldadura es un proceso por el cual se unen piezas de metal, calentándolas hasta alcanzar el estado fluido o casi fluido, con o sin aplicación de presión. Otro concepto referido en la literatura, por Gordon, (1976); lo cita como el proceso en el que se unen partes metálicas, mediante el calentamiento de sus superficies a un estado plástico, permitiendo que las partes fluyan y se unan con, o sin, la adición de otro metal fundido.

Por otra parte, resulta imposible determinar exactamente cuándo se originó la soldadura, pero se tiene indicios de que esto fue hace varios miles de

años. Cuando se hace una soldadura ocurren cambios de temperatura, dimensiones, crecimiento de cristales y granos, transformación de fases y, otras; siendo el tipo de proceso de soldadura quien determina, en general, la forma en la que esto sucede. La velocidad de enfriamiento, o templado, es de importancia fundamental y está controlada por el proceso, procedimiento, metal y masa. El ritmo de cambio, de temperatura disminuye a medida que es mayor la distancia desde el centro de la soldadura (Figura 2.1); lo que promueve que se desarrolle distinta microestructura en las diferentes regiones.

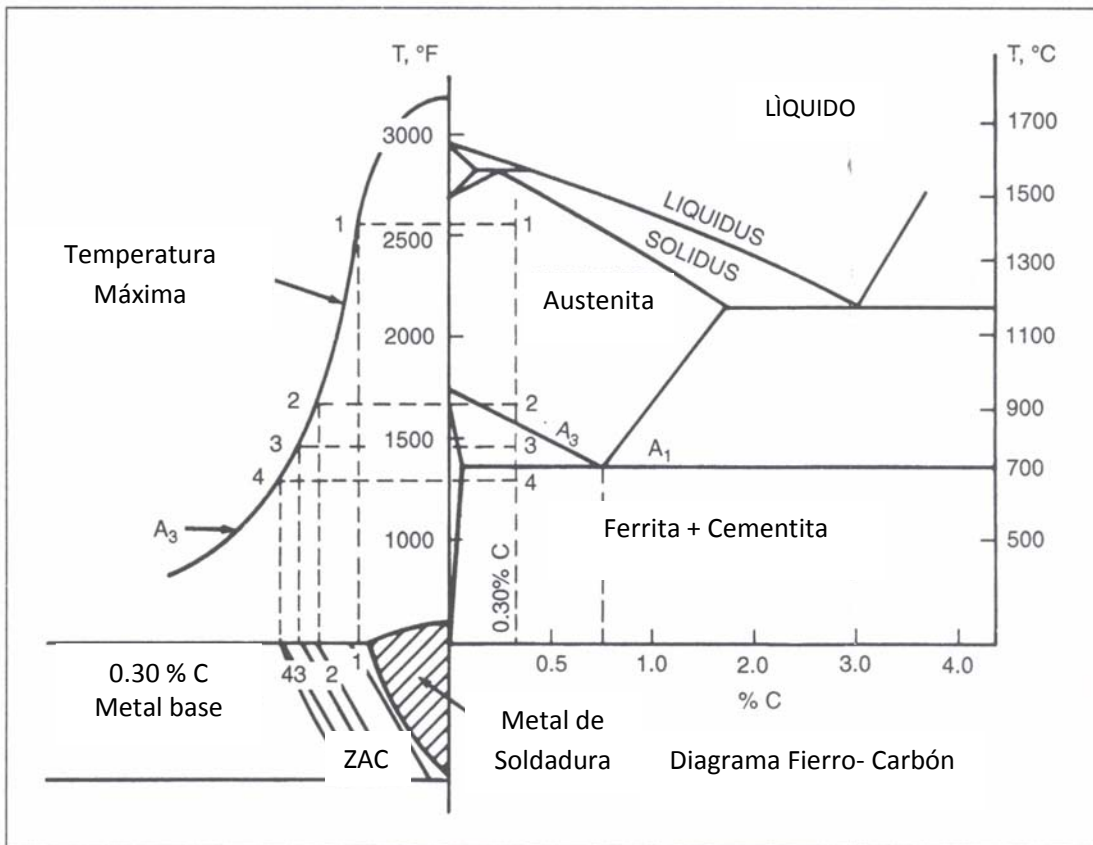


Figura. 2.1. Relación entre las temperaturas pico experimentales en varias regiones de una soldadura y cómo se correlacionan con el diagrama Fe-C.¹¹

A medida que el metal de la soldadura se deposita sobre el metal base parte de éste se funde y se mezcla con el metal de la soldadura, produciendo la dilución de éste último. A menos de que la composición del metal de aporte depositado y la composición del metal base sean idénticas, habrá una variación de la composición del metal en la superficie de separación.

Las variaciones tanto en la composición como en las velocidades de enfriamiento darán lugar a variaciones en la microestructura. Esta es la razón por la cual la microestructura de la soldadura es importante y debe estudiarse. Ejemplo de lo mencionado se aprecia en la microestructura de la Figura 2.2. la cual muestra las diferentes regiones en la soldadura.



Figura 2.2. Esquema de las regiones de una soldadura. ^[2]

2.1.1 Ventajas de aplicar la soldadura para materiales

Algunas de las ventajas de la soldadura, se presentan en los párrafos siguientes ^[9]:

1. Para la mayoría de la gente, la primera ventaja está en el factor económico, porque el uso de la soldadura permite grandes ahorros en el peso del acero utilizado. En el caso de las estructuras soldadas, permite eliminar un gran porcentaje de las placas de unión y de empalme, tan necesarias en las estructuras remachadas o atornilladas, así como la eliminación de las cabezas de remaches o tornillos. En algunas estructuras de puente es posible ahorrar hasta un 15 % o más del peso de acero con el uso de soldadura.
2. La soldadura tiene una zona de aplicación mucho mayor que los remaches o los tornillos. Considere una columna de tubo de acero y las dificultades para conectarla a los otros miembros de acero, con remaches o tornillos. Una conexión remachada o atornillada puede resultar virtualmente imposible, pero una conexión soldada presentará pocas dificultades.
3. Las estructuras soldadas son más rígidas, porque los miembros, por lo general, están unidos directamente uno a otro. Las conexiones con remaches o tornillos, se realizan a menudo a través de ángulos de conexión o placas que se deforman debido a la transferencia de carga, haciendo más flexible la estructura completa. Sin embargo, la mayor rigidez puede ser una desventaja donde se necesiten conexiones de extremo simples con baja resistencia. En tal caso, el diseñador debe tener cuidado de especificar el tipo de junta.

4. El proceso de fusionar las partes por unir, hace a las estructuras realmente continuas. Esto se traduce en la construcción de una sola pieza y, puesto que las juntas soldadas son tan fuertes o más que el metal base, no debe haber limitaciones a las uniones.
5. Finalmente, al emplear algún proceso de soldadura resultará más fácil realizar cambios en el diseño, corregir errores durante el montaje y disminuir costos.

2.1.2 ¿Desde cuándo se aplica la soldadura y cuáles fueron los mecanismos de aplicación?

El trabajar con metales, incluyendo la soldadura, fue un arte en la antigua Grecia, desde hace, por lo menos, tres mil años, pero la soldadura se había practicado, sin duda alguna, durante muchos siglos antes de aquellos días. La soldadura antigua era probablemente un proceso de forja, en el que los metales eran calentados a cierta temperatura (no a la de fusión) y unidos a golpe de martillo.

El origen de la soldadura como tecnología para la unión de materiales metálicos, se remonta hasta la Edad de Bronce, donde se encuentran los primeros vestigios de procesos de soldadura utilizados para fines ornamentales. En la Edad de Hierro se han encontrado piezas de hierro forjado que habrían sido unidas calentándolas y martillándolas juntas, desarrollándose así la *soldadura por forjado*. En la Edad Media la soldadura en fase sólida se utilizaba para reducir el mineral de hierro a hierro metálico sin necesidad de fundirlo^[2].

2.1.3 Evolución de la soldadura

El problema de unir placa fue solucionado por la soldadura por fusión, en la cual una fuente de calor suficientemente intensa como para fundir los bordes de las placas a unir es desplazada a lo largo de la junta. Fuentes de calor suficientemente intensas estuvieron disponibles a escala industrial recién al final del siglo XIX, cuando hicieron su aparición la soldadura oxi-gas, la soldadura por arco eléctrico y la soldadura por resistencia [2].

En el siguiente esquema se aprecia el desarrollo de la soldadura desde finales del siglo XIX.

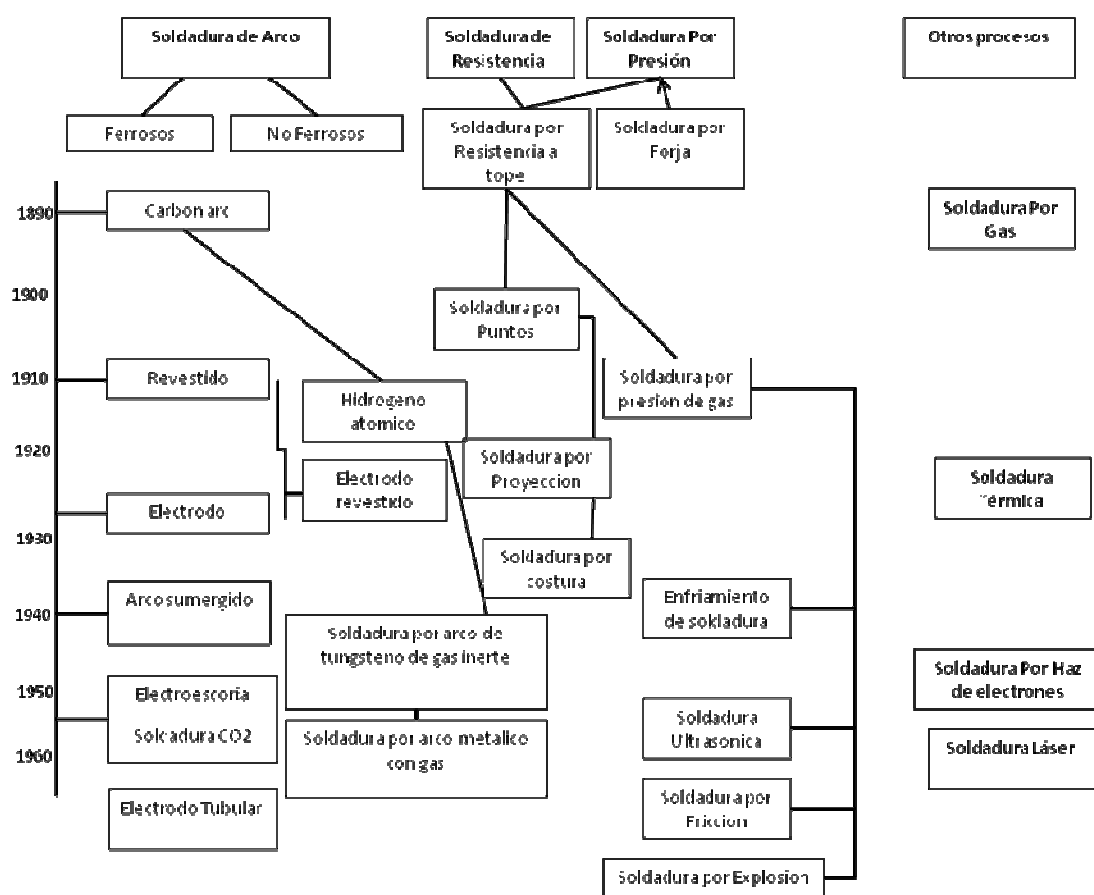


Figura 2.3. Evolución histórica de la soldadura de los distintos procesos de soldadura [3].

La soldadura por arco eléctrico con electrodo consumible, el más importante de los procesos de soldadura por fusión, es más complejo que los otros, por lo que su desarrollo se produjo con mayor lentitud. Inicialmente se utilizaron electrodos de alambre desnudo, pero el metal de soldadura resultante contenía alto nitrógeno que le confería fragilidad. Recubriendo el alambre con asbestos o papel se mejoraron las propiedades de los depósitos soldados ^[2].

La factibilidad de este proceso surge del descubrimiento de Sir Humphry Davy, en 1809^[3], según el cual la electricidad puede ser conducida a través del aire entre dos electrodos de carbono (grafito) conformando lo que hoy conocemos como descarga gaseosa ^[3] Posteriormente en 1885, Bernados y Olszewski ^[3] patentaron un proceso donde era posible reproducir este fenómeno entre un electrodo de carbono y una pieza metálica. Como consecuencia del calor generado se logra una fusión localizada que puede ser utilizada para unir piezas. Se encontró que es necesario aportar metal adicional para llenar el hueco existente entre las dos placas a unir a través de una varilla hundida dentro del charco líquido ^[3].

En 1892, Slawianoff ^[3] pensó que si la varilla de aporte fuera usada como cátodo en lugar del electrodo de carbono, ésta se fundiría por el calor generado en el cátodo y una mucha mayor proporción del calor disipado en el arco eléctrico entraría a la soldadura. Sin embargo, las soldaduras producidas por esta técnica eran de muy baja calidad debido a la reacción del metal fundido con la atmósfera del arco a alta temperatura. En este sentido parece haber sido fortuito el éxito de la soldadura por arco con electrodo de carbono, ya que éste al establecerse el arco generaba una atmósfera de CO₂ y CO que protegía la pileta líquida del aire, rico en oxígeno y nitrógeno. Esto llevó a la idea de aplicar recubrimientos protectores al electrodo, siendo las primeras patentes, en 1907, adjudicadas al sueco O. Kjellberg ^[3]. Una técnica inicial fue desarrollada en Gran Bretaña utilizando una tela impregnada con asbesto alrededor del alambre metálico, proveyendo una mejor protección contra la contaminación.

En Estados Unidos, para la Primera Guerra Mundial no se contaba con asbestos, utilizándose como sustituto fibras de algodón impregnadas en silicato de sodio húmedo. Este revestimiento era capaz de estabilizar el arco, crear una atmósfera protectora del oxígeno y del nitrógeno del aire y una escoria, que son los principales requerimientos de un revestimiento moderno ^[3]. De hecho, los electrodos celulósicos se siguen utilizando hasta la actualidad. Así la soldadura adquiría una posición de importancia central en la construcción de estructuras de ingeniería. Esta tendencia ha continuado y desde la invención, en 1943, del proceso de soldadura con protección por gas inerte los procesos de soldadura se han desarrollado y multiplicado a una gran velocidad, dando como resultado que la gran mayoría de los materiales metálicos utilizados actualmente en la industria puedan ser soldados por algunos de los procesos de soldadura existentes ^[2].

2.2 Aparición del concepto de diseño de soldadura

Es conveniente definir una unión por separado de una soldadura. La unión es la manera en la cual las piezas se encuentran hechas, e.g. unión a tope, unión traslapada, unión en filete o en T, unión en esquina, según las indicaciones de la Figura 2.4 ^[4]

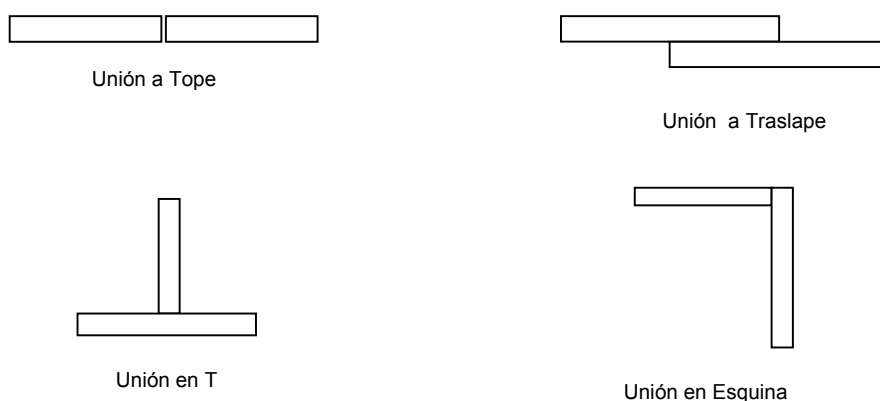


Figura. 2.4. Formas de unión ^[4].

Las soldaduras son usadas para hacer estas uniones; con soldadura de arco se pueden hacer convenientemente con dos tipos principales, la unión a tope y la de filete, como se muestra en la Figura 2.4. En la unión se deben tener una comprensión de los principios y de los conceptos básicos de diseño, deben tener cierto conocimiento y experiencia en el corte y conformado de los metales, componentes de la junta, preparación y fabricación de uniones soldados, evolución de las soldaduras de acuerdo con criterios de aceptación establecidos y uso de ensayos no destructivos y destructivos. En el campo del diseño de la soldadura, los objetivos primarios son producir un ensamble que realice sus funciones previstas, que tengan la confiabilidad y la seguridad requeridas, que se puedan fabricar, examinar, transportar, y colocar en servicio con un costo mínimo ^[5]. La mayoría de las uniones en aplicaciones estructurales son de ranura (aproximadamente 15 por ciento de todas las soldaduras) y de filete (aproximadamente 50 por ciento de todas las soldaduras). La junta a tope se obtiene a partir de una soldadura de ranura. Se considera que esta junta tiene una eficiencia del 100 por ciento, si se construye de manera tal que se obtenga total penetración de la soldadura ^[8].

2.2.1 Diseño de uniones soldadas

El tipo de unión se debe seleccionar sobre todo con base en los requerimientos de la carga ^[7].

Generalmente, las reglas siguientes se aplican:

- Seleccione la unión que requiere la menor cantidad de metal de relleno de la soldadura.
- En lo posible, elimine las uniones biseladas de ranura usando la soldadura automática de arco sumergido, que tiene una característica del arco de penetración profunda.
- Abertura de raíz mínima y uso de ángulo incluido para reducir la cantidad de metal de relleno requerido.
- En la placa gruesa, utilice doble ranura para reducir la cantidad de metal de soldadura.
- Utilice una sola soldadura, en lo posible, para ensamblar tres porciones.
- Reduzca al mínimo la convexidad de las soldaduras de filete; 45° de filete plano, muy levemente convexo, es la forma más económica y más confiable.
- Evite las uniones que crean surcos extremadamente profundos.
- Diseñe la unión para la accesibilidad fácil para soldadura.

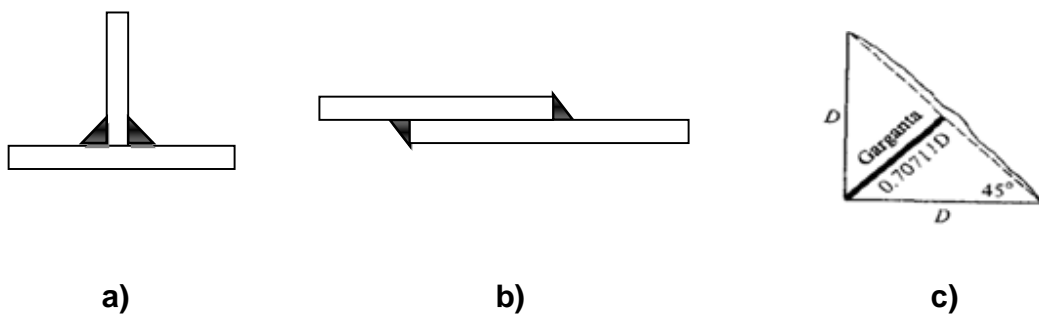
Después de enlistar algunas reglas o recomendaciones descritas anteriormente, se pasara ahora a lo que es el tipo de uniones más básicas y de las más utilizadas en el campo industrial de la soldadura estructural ^[7].

2.2.1.1 Uniones de filete

La soldadura de filete que se muestra en la Figura 2.5 tiene una sección transversal aproximadamente triangular. En este tipo de unión se debe tener cuidado al rellenar las dimensiones de la garganta de una manera adecuada como se muestra en la Figura 2.5c.

En la mayoría de los casos, se hacen iguales los dos pies de la soldadura, pero esto no es necesario y se pueden usar pies desiguales. Si se usan pies iguales para la soldadura de filete, las dimensiones en la garganta representan el área mínima para cortante ^[8].

La fórmula 1 determina la dimensión de la garganta (T), donde D es la dimensión nominal del pie, para soldaduras de filete, D, debe llevarse hasta el 1/16 pulgadas o 1mm.



$$T = D \times \cos 45^\circ = D \times 0.70711 \quad (1)$$

Figura 2.5. Área crítica de cortante para soldaduras de filete. a) Soldadura de filete para junta "T". b) Soldadura de filete para junta traslapada. c) Dimensión en la garganta para área mínima de cortante ^[5].

Ejemplo de diseño de soldadura de filete utilizando el LRFD (Factor de diseño de resistencia y de carga)

Determinar la resistencia de diseño de un filete de 5/16" con longitud de 1"; use: a) el proceso de arco metálico protegido (SMAW por sus siglas en inglés). Use electrodos E70 cuya resistencia mínima a la tensión sea de 70 Ksi = F_{EXX} y suponga carga paralela a la soldadura. Donde F_{EXX} es la resistencia nominal por esfuerzos en el área efectiva de la soldadura, cuyo valor es de $0.60 F_{EXX}$ la resistencia por clasificación del metal base.

Espesor de la garganta efectiva = $(0.707) (5/16) = 0.221$ pulg.

Resistencia del diseño = ΦF_w

= (Φ) (resistencia nominal de la soldadura $0.6 F_{EXX}$)

X (garganta t) (Longitud de la soldadura)

= $(0.75) (0.60 \times 70) (0.221) (1.0)$

Resistencia del diseño = 6.96 Klb /pulg

2.2.1.2 Uniones de tapón

La soldadura de tapón se puede usar para impedir el pandeo de las juntas largas traslapadas en compresión, o para conectar las placas superiores con las inferiores en miembros armados. Se pueden usar ya sea en agujeros redondos o muescas con extremos redondeados. Las especificaciones del Instituto Americano de la Construcción del Acero (AISC, por sus siglas en inglés) cubren las dimensiones de las soldaduras de tapón. Estas dimensiones aseguran agarre y transferencia de cortantes adecuados después que la contracción (al enfriarse) haya tenido lugar. Si se usa una soldadura de filete en una muesca (no se llena la cavidad de la muesca, como sucede con las soldaduras de muesca o tapón) el diseño y dimensiones se basan en los requerimientos de resistencia, como también para las otras soldaduras de filete. Esto sucede

porque la cantidad de metal fundido de la soldadura y la contracción resultante son mucho menores.

2.2.1.3 Uniones de ranura

Cuando la penetración es completa y las soldaduras de ranura están sujetas a tensión o compresión axial, el esfuerzo en la soldadura se supone igual a la carga, dividida entre el área transversal neta de la soldadura. En la Figura 2.6 se muestran tres tipos de soldaduras de ranura. La unión sin preparación, mostrada en la figura 2.6(a), se utiliza para unir materiales relativamente delgados, de hasta aproximadamente 5/16 pulg (7.9 mm) de espesor. A medida que el material es más grueso, es necesario usar soldaduras de ranura en V, y de soldaduras de ranura en doble V como las ilustradas en las partes b y c de la Figura 2.6, respectivamente [9].

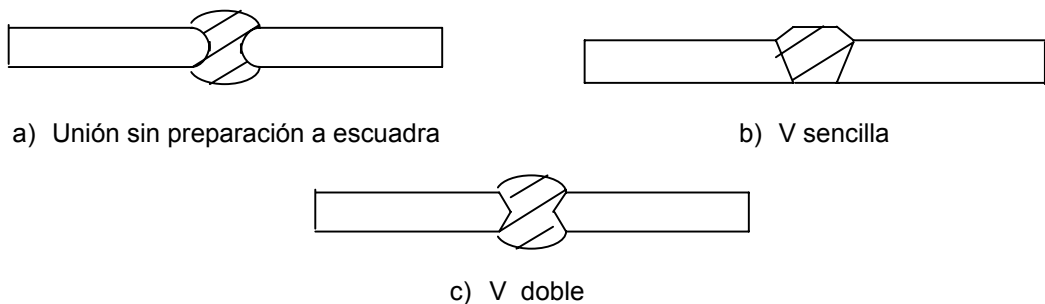


Figura 2.6. Soldaduras de ranura [5]

Por su resistencia al impacto y a esfuerzos cíclicos y de la cantidad de metal de aporte requerido, se prefiere la soldadura de ranura que la de filete, aunque desde otros puntos de vista no son tan atractivas, por lo que la inmensa mayoría de las soldaduras estructurales son de filete ^[5].

Ejemplo de diseño de soldadura de ranura utilizando el LRFD (Factor de diseño de resistencia y de carga)

En el inciso a) se usa una soldadura de ranura de penetración completa realizada con electrodos E70 para emplear las dos mitades de una W21 x 166 de acero A36. Determine la resistencia de diseño por esfuerzo cortante de la unión.

b) Repita la parte a) si se usan dos soldaduras verticales de penetración parcial (acero A36 y electrodos E70) con espesor de garganta de ¼ pulg.

Solución: Usando una W21 x 166 (d= 22.48 pulg, $t_w = 0.750$ pulg)

$$\begin{aligned} \text{a) } V_u &= (0.90) (0.600 F_y) A_w \\ &= (0.90) (0.60 \times 36) (22.48 \times 0.750) \\ &= 327.8 \text{ klb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) Resistencia por fractura cortante del material base} &= \Phi F_w A_{nv} \\ &= (0.75) (0.6 \times 58) (22.48 \times 0.750) \\ &= 440 \text{ klb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fluencia por cortante de la soldadura} &= \Phi (0.60 F_{EXX}) A_w \\ &= (0.75) (0.60 \times 70) (22.48 \times 2 \times 1/4) \\ &= 354.1 \text{ klb} \end{aligned}$$

Por otra parte como se indica en la norma NRF-030-PEMEX, 2006^[11]; de la manera más práctica el diseño de las uniones en ductos son a tope y

pueden presentar bisel en V sencilla, doble V u otra geometría de acuerdo a la ingeniería. Los diseños de la junta se ilustran en la Figura 2.7 donde las combinaciones aplicables de estos se deben utilizar para extremos de igual espesor. La transición entre extremos de espesor diferente se puede realizar biselando el espesor descrito en la Figura 2.8.

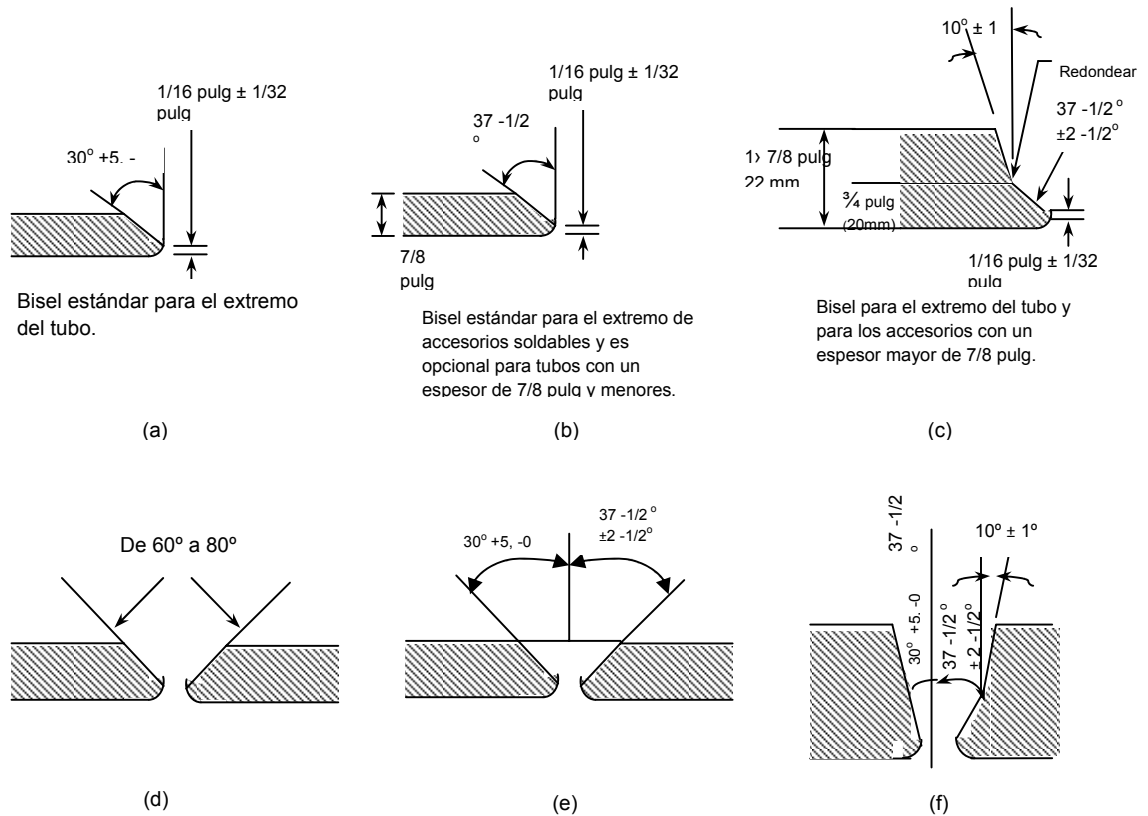


Figura 2.7. Diseño del bisel en la junta de soldadura para tubos de igual espesor de pared [7].

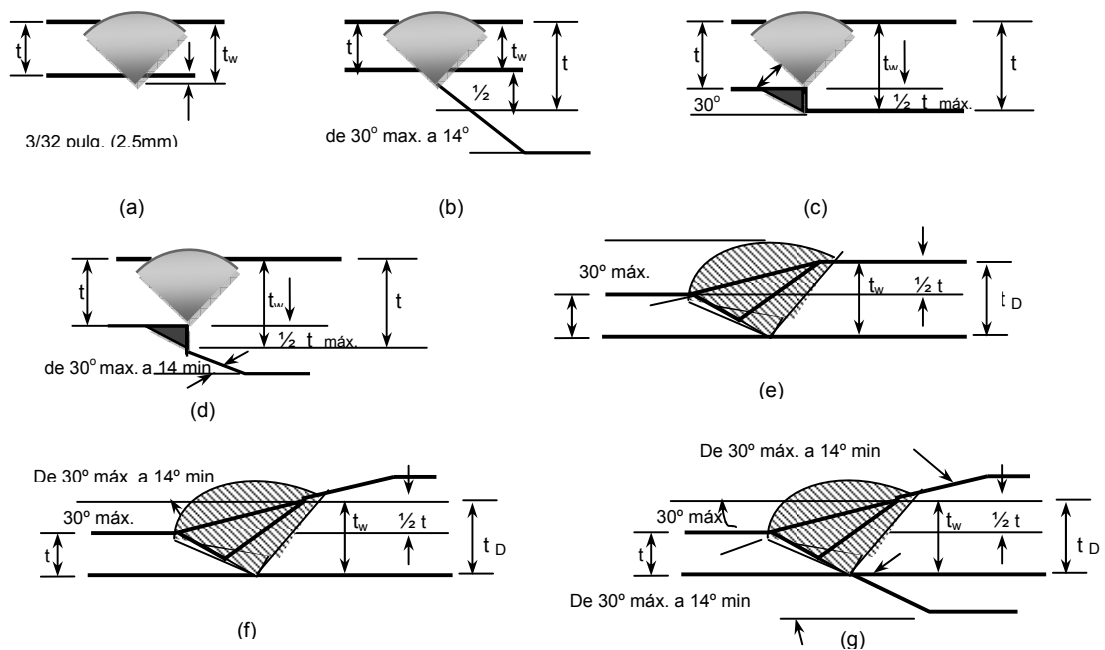


Figura 2.8. Diseño del bisel en la junta de soldadura para tubos de diferentes espesores de pared [7].

Nota:

- No hay mínimo cuando el material a unir tenga la misma resistencia a la cedencia
- El máximo espesor “ t_D ” para propósito de diseño, no deberá ser mayor a $1.5t$.

Para el caso de soldaduras de filete estas pueden ser tanto cóncavas como ligeramente convexas. Para efecto de la resistencia de la soldadura, las dimensiones se miden como la longitud del cateto mayor del triángulo de catetos iguales inscrito en la sección transversal de la soldadura, tal como se ilustra en la Figura 2.9, como se indica en la norma NRF-030-PEMEX, 2006 [11].

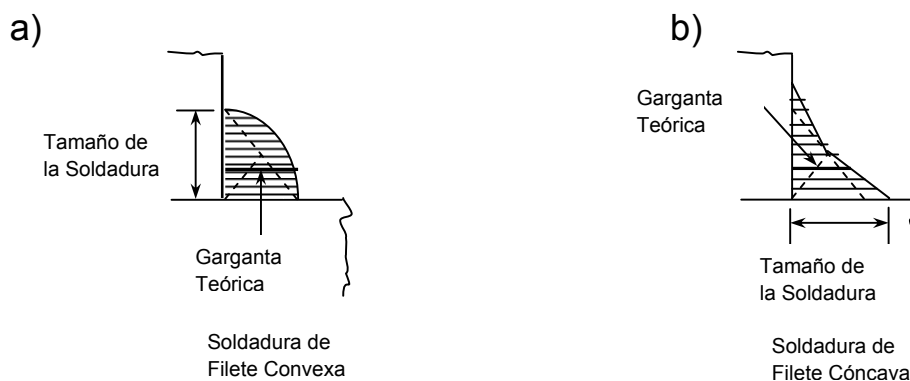


Figura 2.9. Detalles recomendadas para las conexiones de bridas^[7]. a) Convexa, b) Cóncava

2.2.2 ¿En qué consiste la unión del metal?

Un proceso de unión entre dos piezas es la soldadura en piezas metálicas de igual o parecida composición, de forma que la unión quede rígida y resistente. Esto se consigue por el efecto de fusión que proporciona la aportación de calor, bien por la aportación de otro metal de enlace o por la combinación de ambos efectos.

Existen cerca de cuarenta sistemas de soldar, pero el más importante para las estructuras metálicas es el sistema de soldadura por fusión. En éste el calor proporcionado funde los extremos de las piezas y, al solidificar, se produce la unión^[6]. Otro concepto podría ser el siguiente, donde las uniones se forman mediante conjuntos de placas o perfiles unidos entre sí con enlaces capaces de soportar los esfuerzos que se transmiten entre las piezas. El objeto principal de la unión es el de asegurar la mejor continuidad de las piezas, misma que será más perfecta cuanto más uniforme sea la transmisión del esfuerzo.

La transmisión de esfuerzos en las uniones se hace en muchas ocasiones de modo indirecto, ya que para pasar el esfuerzo de una pieza a otra se obliga previamente a desviarse de su trayectoria normal. En el caso de soldadura a tope, la transmisión es directa. Por otra parte, hay distintos procesos de soldadura tanto con aporte de calor como sin aporte de material (como se describe en la Tabla 2.1) que son empleados para las uniones de los metales que son seleccionados dependiendo de las características requeridas de la unión así como el costo de producción de dicha junta soldada. En la Figura 2.10 muestra diferentes procesos de unión de metales.

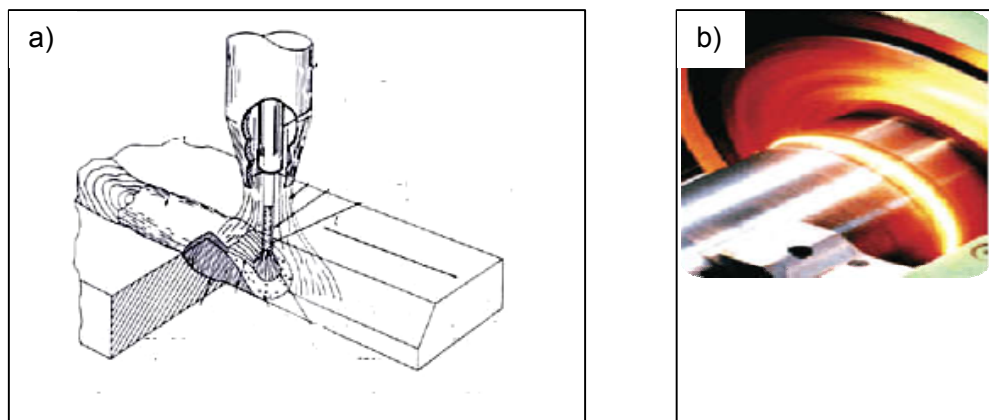


Figura 2.10. Proceso de soldadura para unión de metales. a) Unión por fusión por el proceso FCAW b) Unión en estado sólido por soldadura por fricción^[2].

Tabla 2.1 Diferentes procesos de unión por soldadura en estado sólido así como por fusión.

SOLDADURA POR ARCO
Soldadura por arco metálico protegido (SMAW) Soldadura por arco de carbono (CAW) Soldadura por arco sumergido (SAW) Soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW) Soldadura por arco de plasma (PAW) Soldadura por arco metálico con gas (GMAW) Soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW) Soldadura por electrogas (EGW) Soldadura por electroescoria (EW) Soldadura con gas Oxicomcombustible (OFW)
SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO
Soldadura por difusión Soldadura por Haz de electrones (EBW) Soldadura por Explosión (EXW) Soldadura por Fricción (FRW) Soldadura por Rayo Láser (LBW) Soldadura por Ultrasonido (USW) Soldadura por Thermal Spray
SOLDADURA POR RESISTENCIA
Soldadura de Resistencia de Costura (RSEW) Soldadura de Proyección (PW) Soldadura de Resistencia de Puntos (RSW)
OTROS PROCESOS
Soldering Brazing Soldadura en Frío Soldadura de Pernos (SW)

2.2.3 Factores aplicados en el diseño de uniones

Hay un número de factores que influyen para decidir el tipo de unión y de soldadura con la cual será hecha la unión. En la Tabla 2.2 se enumera las consideraciones en el diseño de una unión soldada.

Tabla 2.2 Factores en el diseño de uniones soldada ^[8].

CARACTERISTICA	EJEMPLOS DE LOS FACTORES PARA SU CONSIDERACIÓN
Funcionamiento en servicio	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia Estática • Ductilidad • Resistencia a la fatiga • Resistencia a la corrosión
Soldabilidad del material	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia de la soldadura • Ductilidad de la soldadura • Soldadura con resistencia a la fractura • Composición química • Susceptibilidad al agrietamiento
Materiales consumibles de soldadura	<ul style="list-style-type: none"> • Características del metal de aporte
Procesos de Soldadura	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de unión • Material • Tamaño del componente • Costo
Distorsión	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación de la soldadura • Calor de entrada • Secuencia del funcionamiento de soldadura

Al desarrollar un diseño, el especialista piensa constantemente en cómo las decisiones afectarán a la producción, costos de fabricación, funcionamiento, y la aceptación de cliente [7]. Algunos aspectos de diseño son mencionados abajo junto con otras reglas relevantes:

- El diseño debe cumplir requisitos de resistencia y rigidez.
- El factor de seguridad debe ser adecuado.
- El buen aspecto tiene valor, pero solamente en las áreas que se exponen a la visión.
- Las secciones profundas y simétricas resisten eficientemente la deflexión
- La soldadura de los extremos de vigas ayudan a aumentar la rigidez y la resistencia.
- El uso apropiado de refuerzo proporcionará rigidez en el peso mínimo de material
- Las secciones tubulares cerradas o refuerzos diagonales se deben utilizar para la resistencia a la torsión. Una sección tubular cerrada puede ser mejor que una sección abierta.
- Los grados de acero nonpremium se deben especificar donde sea posible. Aceros más altos en carbón y de aleación requieren de un precalentamiento y con frecuencia poscalentamiento, que son procesos de costos agregados.
- Los tamaños estándar de la placa y de la barra se deben utilizar para su economía y disponibilidad.

Otro de los aspectos a tomar en cuenta en el desarrollo de una unión es el costo del diseño, donde se tiene que involucrar desde el tamaño de la soldadura, cantidad de material para rellenar y el tipo de unión ya sea en filete, ranura, tope, traslape, por mencionar algunos, es importante saber el tipo de unión que es más costosa de producir. Como se muestra en la Figura 2.11, los tipos más comunes de soldadura son de filete y de ranura. Las soldaduras de

filete son normalmente más económicas que las soldaduras de ranura. Las soldaduras de ranura de penetración parcial (PJP) son más económicas que las soldaduras de ranura de penetración completa (CJP). Cuando se requieren las soldaduras de ranura, las soldaduras biseladas y de ranura en V, que pueden ser oxicotadas, son generalmente más económicas que las soldaduras de ranura de J y en U [7].

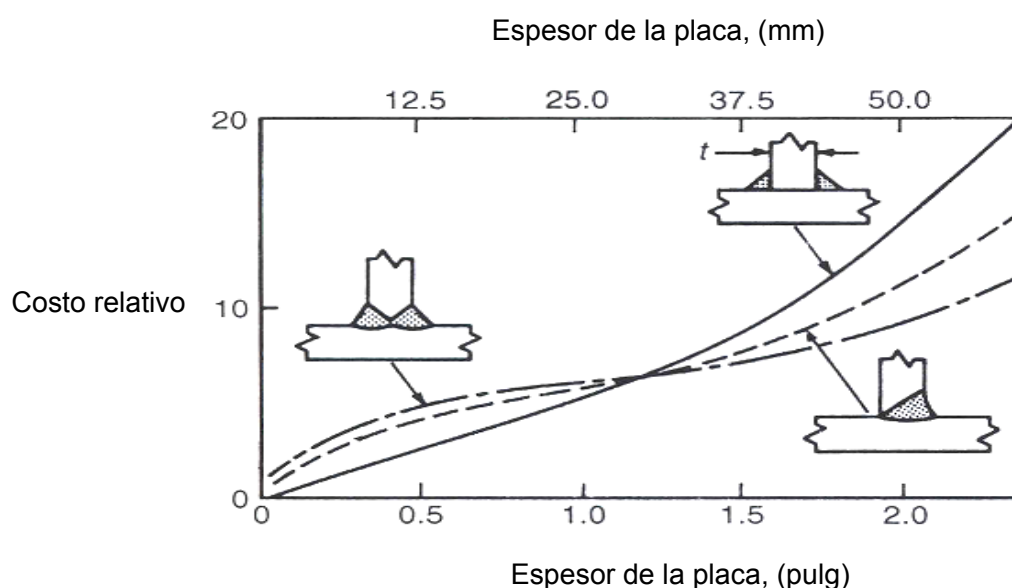


Figura 2.11. Costo relativo estimado en unión de filete y de las soldaduras de ranura para varios espesores de placas [9].

El uso de estimar curvas, que se basa sobre el costo real de la preparación común, colocando y uniendo con soldadura, es una técnica que se utiliza para determinar el espesor de la placa para el cual los varios tipos de detalles comunes son los más económicos.

Un ejemplo de la muestra de curvas es la Figura 2.11 donde se ilustra la intersección de la curva de la soldadura de filete. Las curvas de las soldaduras de ranura es un punto de interés, donde muestra que conforme el espesor de la placa va aumentando el costo de fabricación se incrementa debido a que la

preparación de la unión tiene que ser en filete. En las uniones soldadas hay gran infinidad de factores como los mecánicos y metalúrgicos que determinan la resistencia o la calidad de la unión; es por eso que en este trabajo se analizarán dos puntos importantes que determinan la integridad de la unión como son aspectos mecánicos y metalúrgicos haciendo énfasis en la mayor parte en la influencia que tiene el fenómeno de corrosión en la soldadura.

Por otra parte, es importante describir los aspectos mecánicos donde el diseño de la unión que se determina según la carga que esta estará soportando en una conexión o en una estructura soldada, es por eso que a continuación se explicarán los tipos de carga a los que puede estar sometido un componente [5].

2.3 Tipos de Carga

Existen cinco tipos básicos de carga las cuales son; tensión, compresión, corte, torsión y flexión. Dependiendo el tipo de carga dónde se aplique, el miembro se convierte en creador de esfuerzos. Los esfuerzos causan deformaciones o movimientos dentro del miembro. El módulo elástico (E), es definido como la velocidad de un esfuerzo a deformar y es un valor constante dentro del límite elástico, la cual para una práctica propuesta puede ser considerada como el mismo punto de cedencia. Una carga siempre produce esfuerzo y deformación siempre ocurren [7].

2.3.1 Carga de tensión

La tensión es el tipo de carga más simple. La Figura 2.12 muestra barras bajo una tensión uniaxial. Aquí no hay tendencia de la barra a la flexión. Si la fuerza debe ser aplicada a la curva o a la barra deformada como la Figura 2.12a, tendrá como resultado un brazo de momentos. Las mismas condiciones existentes donde una carga es aplicada a barras derechas. El esfuerzo axial de tensión causa deformación axial que tiende a hacer la elongación del componente. El esfuerzo de flexión secundaria, causa deformaciones en el componente, pero en el caso del esfuerzo de tensión la flexión es en una dirección que tiende a reducir la excentricidad inicial resultando en condiciones estables. No hay peligro de que un miembro se pandee. Cualquier forma puede ser suficiente para componentes de tensión el único requerimiento es la adecuada sección transversal [7]

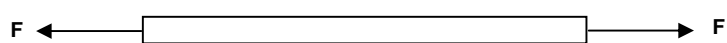
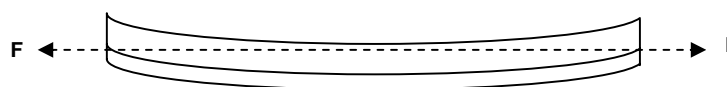
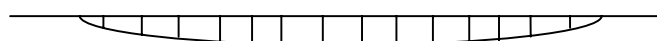


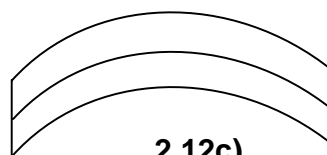
Figura 2.12. Barra bajo tensión axial simple. [9]



2.12 a)



2.12 b)



2.12 c)

Figura 2.12. a) Las cargas aplicadas en una barra curvada dan lugar a diagrama del momento de flexión según las indicaciones de la figura **b)**, **c)** los momentos de flexión tienden a hacer mover la barra en la dirección demostrada, así reduciendo la curvatura [9]

2.3.2 Carga de compresión

Una fuerza de compresión, requiere un diseño contra el pandeo. Pocos componentes de compresión fallan por aplastamiento. Si un componente de compresión tal como la columna en la Figura 2.13, es cargada a través de su centro de gravedad, los esfuerzos resultantes son simples esfuerzos axiales de compresión. Debido a su esbeltez (usualmente medidos por el coeficiente de su longitud a su mínimo radio de giro y también referido a su coeficiente de esbeltez L/R), la columna empezará a moverse lateralmente a un esfuerzo más bajo que el esfuerzo de cedencia.

El movimiento es mostrado en la Figura 2.13b como un resultado de su movimiento lateral la porción central de la columna es después excéntrica con los ejes de la fuerza.

Esto causa un momento de deflexión Figura 2.13c en la porción central de la columna, resultando en esfuerzos de deflexión. El esfuerzo de deflexión y como se ve en la Figura 2.13d causa que la columna se pandee más. Esto crea excentricidades adicionales, unos momentos más grandes en magnitud, y aún así más adelante movimiento lateral. Finalmente un punto de no retorno es alcanzado y la columna falla ^[7].

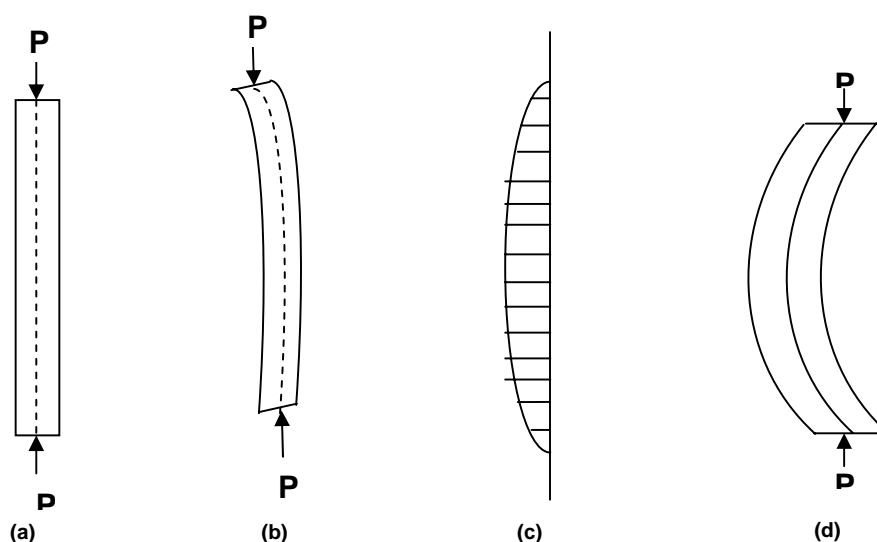


Figura 2.13. a) Columna recta con la carga concéntrica; b) con incremento de carga la columna tiende a moverse lateralmente, c) diagrama de momento de flexión como resultado del movimiento lateral, el pandeo adicional d) resultado del momento de flexión^[9].

Dos propiedades de una sección de la columna- área, A , y radio de giro, r - son importantes para la resistencia a la compresión. El área es importante porque debe ser multiplicado por el esfuerzo de compresión permisible para determinar a la carga de compresión que se puede soportar.

El radio de giro es importante porque indica en cierta medida la capacidad de la sección para resistir al pandeo. El radio de giro es la distancia del eje neutro de la sección a la línea imaginaria (Figura 2.14); en la sección transversal sigue teniendo el mismo momento de inercia de esa sección.

A partir la peor condición es motivo de preocupación en el trabajo de diseño, y es necesario usar el menor radio de giro. Así, desde $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$, es necesario el uso del menor de los dos momentos de inercia sobre el eje x - x y y - y para obtener el radio de giro usado en el coeficiente de esbeltez.

El diseño de un miembro o columna de compresión es a prueba y error. Una sección de prueba es esbozada y esta área, A , y el menor radio de giro, r , son determinados. Una tabla conveniente de la columna dará el esfuerzo de compresión permisible para el cociente particular de esbeltez (L/r). Esta tensión permisible entonces es multiplicada por el área, A , para determinar la carga compresiva total que se puede tolerar en la columna ^[7].

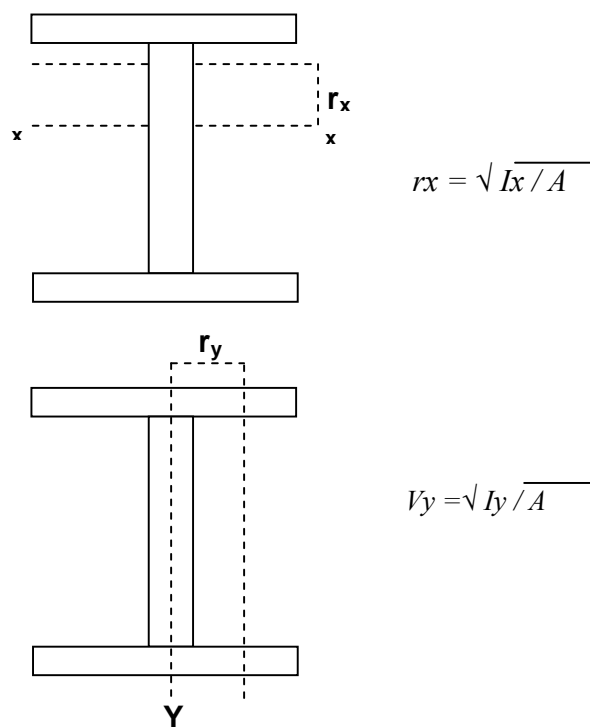


Figura 2.14 Radio de giro sobre el eje x-x y ejes y-y de una columna ^[9].

2.3.3 Carga cortante

Hay dos tipos, horizontal y vertical, las cuales generan y compresión diagonal. La tensión no es un problema, ya que hay una posibilidad muy pequeña de que el esfuerzo a tensión alcance un valor suficientemente alto para causar la falla. Si la compresión diagonal alcanza valores altos la viga puede doblarse. Por esta razón, las claves estructurales limitan el esfuerzo cortante en la sección de la viga porque existe una posibilidad de que la viga se doble, especialmente si es muy larga y delgada [7]. La unidad de la fuerza cortante en los cordones de soldadura uniendo las secciones de la viga (Figura 2.15) del alma de la viga puede ser calculada de la fórmula de la fuerza en libras.

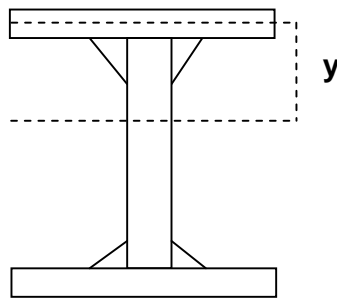


Figura 2.15. Fuerza cortante en soldaduras de filete [9].

Donde:

V = Fuerza cortante externa del componente a esta sección transversal, (lbs).

a = Área sujeta por los cordones de soldadura.

y = Distancia entre el centro de gravedad del área sujeta por los cordones de soldadura y el eje neutral de toda la sección, (pulg).

I = Momento de inercia de toda la sección del eje neutral, (pulg).

n = Número de cordones de soldadura utilizados para sujetar el área.

Para cumplir con los requerimientos de solidez y rigidez, las vigas deben ser anchas, por otra parte, lo que se explicó anteriormente para un componente o columna a compresión, puede también ser aplicado en una sección de una viga. Es importante que su forma sea tal que no permita fácilmente el dobléz, no debe ser muy ancha ni muy delgada. Esta debe tener el correcto soporte lateral y horizontal y los esfuerzos cortantes deben estar dentro de valores aceptables.

Los ejemplos de la resistencia de diseño para las condiciones de carga estático, para las soldaduras en acero usando los procedimientos de carga de diseño del Instituto de la Construcción y del Acero (AISC por sus siglas en inglés) y del factor de resistencia LRFD (Factor de diseño de resistencia y de carga) se presentan en la Tabla 2.3, las tensiones permisibles para los valores de carga estático se utilizan al diseñar, en conjunto con el procedimiento aplicado convencional del diseño de tensión ASD (Diseño de Tensión Admisible) por sus siglas en inglés.

En el diseño de estructuras soldadas hay infinidad de cargas a tomar en cuenta para el desarrollo de un buen diseño que cumpla con especificaciones que determinan las instituciones dedicadas al ramo de la construcción estructural como AISC que establece las condiciones de cargas permisibles de una estructura soldada. Por otra parte, también se toman otras cargas de diseño que a continuación sólo serán mencionadas en este tema, ya que no es un objetivo primordial en el presente trabajo

En la NRF-137- PEMEX ^[11] se establece que para el diseño, se debe considerar como mínimo el efecto combinado de acciones que tengan una probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente, así como considerar las magnitudes correspondientes de cada una de las acciones indicadas a continuación:

- Carga muerta
- Carga viva
- Carga sísmica
- Cargas de lluvia
- Cargas de nieve o granizo
- Efecto de la temperatura
- Efecto del viento

Tabla 2.3 Resistencia de Diseño para Soldaduras de Acero por Medio de la Carga y el Diseño de Factor de Resistencia de AISC (LRFD)^[9].

Tipo de Soldadura	Tensión en la soldadura*		Resistencia del diseño	Nivel Requerido de la Fuerza del Metal de Relleno
Junta de penetración completa de ranuras soldadas.	Tensión normal al área efectiva.		Igual que el metal base.	Metal de aporte compatible debe ser utilizado
	Compresión normal al área efectiva.		Igual que el metal base.	Metal de aporte con un nivel de resistencia igual o inferior a una clasificación (10 ksi [69Mpa]) metal de relleno puede ser utilizado.
	Tensión o compresión paralela a la axial de la soldadura.		Igual que el metal base.	Metal de aporte con el nivel de resistencia igual o inferior a un metal base puede ser utilizado.
	Área de corte efectiva.		0,48 veces la tensión nominal, salvo el esfuerzo cortante en el metal base no será superior a 0,54 veces de límite elástico del metal base.	
Junta de penetración parcial de ranuras soldadas	Compresión normal al área efectiva.	Junta no diseñada† para llevar en Compresión.	0,75 veces la resistencia nominal del metal de aporte; presión sobre el metal base no será superior a 0,90 veces el límite de elasticidad del metal base 0,75 veces la resistencia nominal del metal de aporte; presión sobre el metal base no será superior a 0,90 veces el límite de elasticidad del metal base.	Metal de aporte con un nivel de resistencia igual o inferior a un metal de aporte puede ser utilizado.
		Junta diseñada† para llevar en Compresión.	Igual que el metal base.	
	Tensión o compresión paralela a la axial de la soldadura.		Igual que el metal base.	
	Corte paralelo al corte de la soldadura.		0,45 veces la resistencia nominal del metal de aporte, a excepción de la tensión de tracción sobre el metal de base no será superior a 0,54 veces el límite de elasticidad del metal base.	
	Tensión normal al área efectiva.		0,48 veces la tensión nominal del metal de aporte, a excepción de la tensión de tracción sobre el metal base no será superior a 0,90 veces el límite de elasticidad del metal base.	
	Área de corte efectiva.		0,45 veces la tensión nominal del metal de aporte, excepto el esfuerzo de corte en el metal base no será superior a 0,54 veces el límite de elasticidad del metal base.	
Soldadura de filete	Área de corte efectiva.		0,45 veces la tensión nominal del metal de aporte, excepto el esfuerzo de corte en el metal base no será superior a 0,54 veces el límite de elasticidad del metal base.	Metal de aporte con el nivel de resistencia igual o inferior a un metal base puede ser utilizado.
	Tensión o compresión paralela a la axial de la soldadura		Igual que el metal base.	
Soldaduras de ranura y de enchufe	Cortante paralelo a las superficies de contacto (en el área efectiva).		0,45 veces la resistencia a la tracción del metal de aporte, a excepción esfuerzo de corte no será superior a 0,54 veces el límite de elasticidad del metal base.	Metal de aporte con el nivel de resistencia igual o inferior a un metal base puede ser utilizado.

* El área de Soldadura Efectiva es la Longitud Efectiva Multiplicada por la Garganta Efectiva.

† Especificaciones Establecidas en el Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC), 1994, Manual de Construcción de Acero: La Carga y el Diseño de Factor de Resistencia Tomos 1 y 2, Chicago, Instituto Americano de Acero para la Construcción Estipulan Resistencia de Diseño a ser el mismo que el Metal Base sin Distinción de si la Articulación está Elaborado a dar o no se base en los Resultados de Ensayos de Tamaño de la Columna.

2.4 Resistencia de las soldaduras

En la Figura 2.16 se muestra que el esfuerzo de un filete de soldadura se considera igual a la carga dividida entre el área efectiva de la garganta de la soldadura sin tomar en cuenta la dirección de la carga. Sin embargo, las pruebas han mostrado que las soldaduras de filete cargadas transversalmente son apreciablemente más resistentes a las cargas paralelamente al eje de la soldadura ^[9].

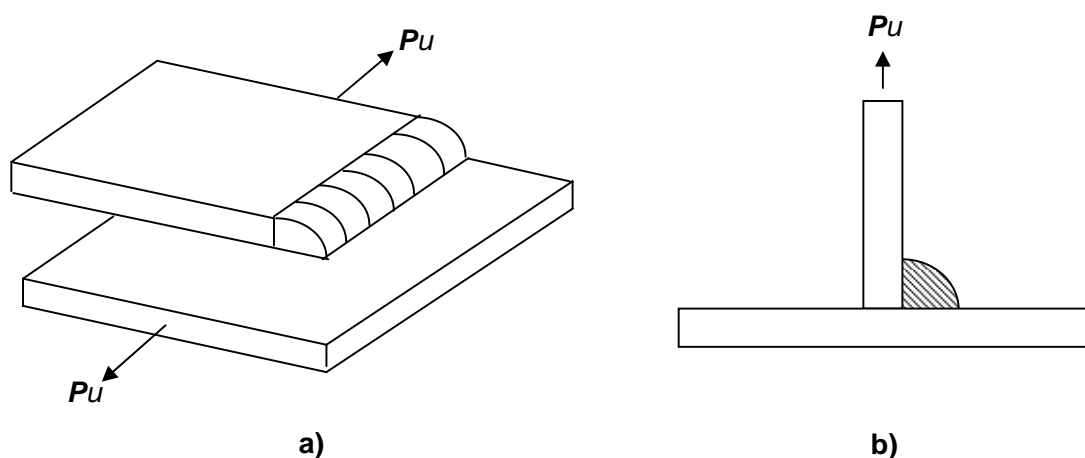


Figura 2.16. a) Esquema de los esfuerzos en soldadura de filete longitudinal b) Soldadura de filete transversal ^[9].

Las razones para la cual resulta más resistente son:

- Las soldaduras de filete longitudinales quedan sometidas a esfuerzos más uniformes sobre toda su longitud, mientras que las soldaduras de filete transversales quedan sometidas a esfuerzos no uniformes debido a deformaciones que varían a lo largo de su longitud.
- Además, las pruebas mecánicas muestran que la falla ocurre según ángulos diferentes a 45 °C, por lo que las soldaduras tienen entonces áreas efectivas más grandes en la garganta.

En la Tabla 2.4 se dan los valores de los factores de resistencia de las especificaciones LRFD.

Tabla 2.4 Factores de resistencia característicos ^[9].

Factores de resistencia o ϕ	Situaciones
1	Aplastamiento en áreas proyectantes de pasadores, fluencia del alma bajo cargas concentradas, cortante en tornillos en juntas tipo fricción.
0.9	Vigas sometidas a flexión y cortante, filetes de soldadura con esfuerzos paralelos al eje de soldadura, soldaduras de ranura en el metal base, fluencia de la sección total de miembros a tensión.
0.85	Columnas, aplastamiento del alma, distancias al borde y capacidad de aplastamiento en agujeros.
0.8	Cortante en el área efectiva de la soldadura de ranura con penetración completa, tensión normal al área efectiva de soldaduras de ranura con penetración parcial.
0.75	Tornillos a tensión, soldaduras de tapón o muesca, fractura en la sección parcial.
0.65	Aplastamiento en tornillos (que no sean tipo A307).
0.6	Aplastamiento en cimentación de concreto.

Los requisitos de diseño del LRFD establecieron factores de resistencia nominales como se muestra en la Tabla 2.5 para varios tipos de soldadura incluyendo las de filete, tapón, muesca y ranura con penetración completa y parcial).

La resistencia de diseño de una soldadura específica se toma como el menor de los valores ϕF_w , (F_w es la resistencia nominal de la soldadura) y ϕF_{BM} (F_{BM} es la resistencia nominal del metal base). Para las soldaduras de filete la resistencia nominal por esfuerzos en el área efectiva de la soldadura a 0.60 F_{EXX} (F_{EXX} es la resistencia por clasificación del metal base) y ϕ es igual a 0.75. Si se tiene tensión o compresión paralela al eje de la soldadura, la

resistencia nominal del metal base F_{BM} es F_y y ϕ es igual a 0.90. La resistencia de diseño por cortante de los miembros conectados es $\phi F_n A_{ns}$ en donde ϕ es 0.75, F_n es $0.6F_u$ y A_{ns} es el área neta sujeta a cortante.

Tabla 2.5 Resistencia de diseño de soldaduras (AISC, 1994)^[9].

Tipos de soldadura y esfuerzo ^[a]	Material	Factor de ϕ resistencia	Resistencia nominal F_{BM} o F_w	Nivel de resistencia requerido
Soldadura de ranura con penetración completa				
Tensión normal al área efectiva	Base	0.90	F_y	Debe usarse soldadura "compatible"
Compresión normal al área efectiva	Base	0.90	F_y	Puede usarse un metal de aporte (electrodo) con un nivel de resistencia igual o menor que el "compatible"
Tensión o compresión paralela al eje de la soldadura	Base	0.9	F_y	
Cortante en el área efectiva	Base; electrodo de soldadura	0.80	$0.60 F_y, 0.60 F_{EXX}$	
Soldaduras de ranura con penetración parcial				
Compresión normal al área efectiva	Base	0.90	F_y	Puede usarse un metal de aporte (electrodo) con un nivel de resistencia igual o menor que el "compatible"
Tensión o compresión paralela al eje de la soldadura ^[d]	Base	0.75	F_y	
Cortante paralelo al eje de la soldadura	Base, electrodo de soldadura	0.90	^[e] $0.60 F_{EXX}$	
Tensión normal al área efectiva	Base, electrodo de soldadura	0.80	$F_y 0.60 F_{EXX}$	
Soldaduras de filete				
Cortante en el área efectiva	Base; electrodo de soldadura	0.75	^[e] $0.60 F_{EXX}$	Puede usarse un metal de aporte (electrodo) con un nivel de resistencia igual o menor que el "compatible"
Tensión o compresión paralela al eje de la soldadura	Base	0.90	F_y	
Soldaduras de tapón o muesca				
Cortante paralelo a las superficies de contacto (sobre el área efectiva)	Base, electrodo de soldadura	0.75	^[e] $0.60 F_{EXX}$	Puede usarse un metal de aporte (electrodo) con un nivel de resistencia igual o menor que el "compatible"

[a] Para la definición de área efectiva.

[d] No se requiere que las soldadura de filete y las soldaduras de ranura de penetración parcial que unen elementos componentes de miembros compuestos, tales como conexiones entre patines y almas, sean diseñadas con el esfuerzo de tensión o compresión en esos elementos paralelos al eje de las sombras.

[e] El diseño del material conectado está gobernado por las secciones J4 y J5

Además de los esfuerzos nominales dados en la Tabla 2.5 existen otras recomendaciones del Factor de diseño de carga y resistencia (LRFD por sus siglas en inglés Load and Resistance Factor Design) aplicables a la soldadura; algunas de las más importantes son las siguientes ^[9]:

1. La longitud mínima de una soldadura de filete no debe ser menor de 4 veces la dimensión nominal del lado de la soldadura. Si su longitud real es menor de este valor, el grueso de la soldadura considerada efectiva debe reducirse a $\frac{1}{4}$ de la longitud de la soldadura.
2. El tamaño máximo de una soldadura de filete a lo largo de material menor de $\frac{1}{4}$ pulg de grueso debe ser igual al grueso del material. Para material más grueso, no debe ser mayor que el espesor del material menos $\frac{1}{16}$ pulg, a menos que la soldadura se arregle especialmente para dar un espesor completo de la garganta.
3. Para una placa con un espesor de $\frac{1}{4}$ de pulg, o mayor, conviene terminar la soldadura por lo menos a $\frac{1}{16}$ pulg del borde para que el inspector pueda ver claramente el borde de la placa y determinar con exactitud las dimensiones de la garganta.

Los filetes permisibles mínimos según LRFD se especifican en la Tabla 2.6. Estos valores varían entre $\frac{1}{8}$ pulg para material de $\frac{1}{4}$ pulg de espesor menor o $\frac{5}{16}$ pulg para material con espesor mayor de $\frac{3}{4}$ pulg. El tamaño mínimo práctico para la soldadura es de aproximadamente $\frac{1}{4}$ pulg y el tamaño que probablemente resulta más económico es de alrededor de $\frac{1}{4}$ pulg o $\frac{5}{16}$. La soldadura de $\frac{5}{16}$ pulg es aproximadamente la máxima que puede hacerse en una sola pasada y la de $\frac{1}{2}$ pulg cuando se usa el proceso de arco sumergido.

Tabla 2.6 Tamaños mínimos para las soldaduras de filete (AISC, 1994)^[9].

Espesor del material de la parte unida con mayor espesor (pulg)	Tamaño mínimo de la soldadura del filete (pulg)
Hasta 1/4	1/8
Mayor de 1/4, hasta 1/2	3/16
Mayor de 1/2, hasta 3/4	1/4
Mayor de 3/4	5/16

Estos tamaños mínimos no se desarrollaron con base en consideraciones de resistencia, sino debido al hecho de que los materiales gruesos tienen un efecto de enfriamiento rápido en las soldaduras pequeñas; cuando esto sucede en las soldaduras se manifiesta una pérdida de ductilidad. Además, el material grueso tiende a restringir el acortamiento propio de la soldadura al enfriarse ésta y pueden, en consecuencia, aparecer grietas en los cordones. Nótese que los tamaños mínimos dados en la Tabla 2.6 dependen de la parte más gruesa por unirse. Independientemente del valor dado en la Tabla 2.6, el tamaño mínimo no debe exceder el espesor de la parte más delgada. Sin embargo, puede ser mayor si así lo requiere la resistencia calculada. La especificación J2.2b del LRFD establece que las soldaduras de filete deberán terminarse en los extremos o lados de las partes de los miembros.

Cuando se usan soldaduras de filete sobre los lados opuestos de un plano común, ellas deben interrumpirse en las esquinas que son comunes a las soldaduras ^[9]

La especificación J2.2b establece que las soldaduras de filete deberán terminarse en los extremos o lados de las partes de los miembros. Ellas deben doblarse continuamente alrededor de las esquinas en una distancia no menor que dos veces el tamaño nominal de la soldadura desde un extremo. Cuando se usan remaches, estos reforzaran las soldaduras en sus puntos más esforzados inhibiendo de esta manera la formación de grietas. Cuando se usan soldaduras de filete sobre los lados de un plano común, ellas deben interrumpirse en las esquinas que son comunes a las soldaduras ^[9].

En juntas traslapadas, no debe ser menor de 1 pulgada la distancia nominal de la soldadura. El propósito de que este traslape sea mínimo es impedir que la junta rote excesivamente al aplicarse las cargas (véase Figura 2.17 a) (Especificación 8.8.3 de la AWS).

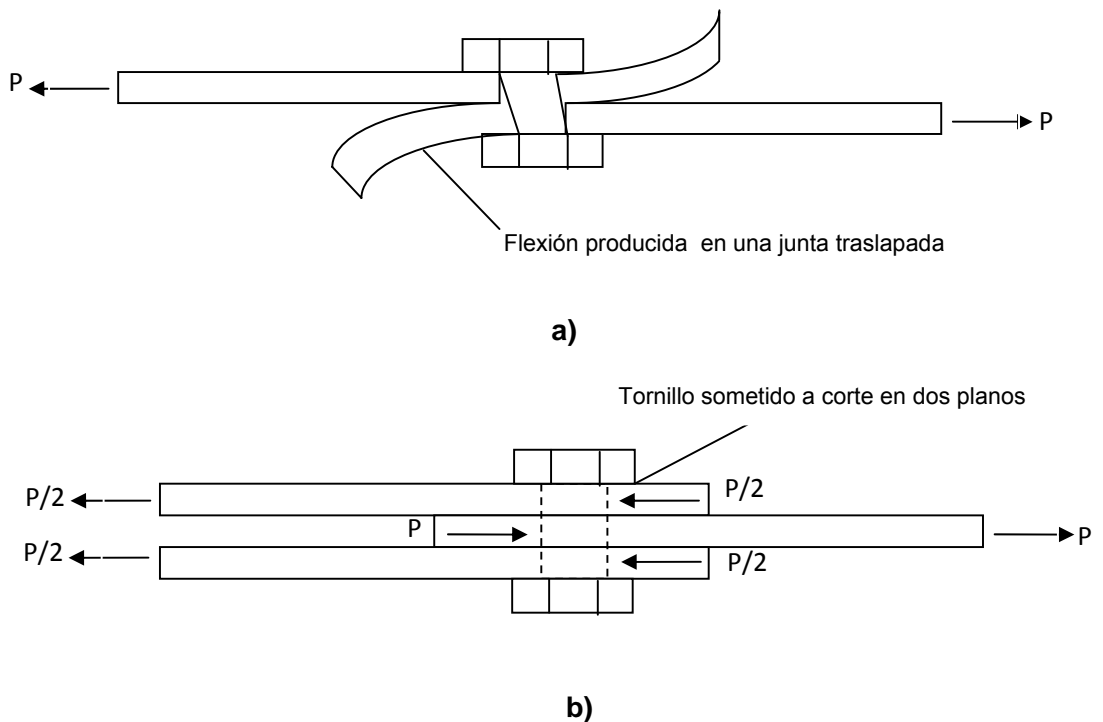


Figura 2.17. a) Junta traslapada b) Junta a tope ^[9].

2.4.1 Transferencia de carga y esfuerzos en soldaduras

El enfriamiento diferencial que acompaña a la soldadura causa esfuerzos residuales en la soldadura y en el material que se une. Aunque este esfuerzo tiene importantes efectos en la resistencia de miembros a compresión, por lo general no tiene significado en la resistencia de las conexiones soldadas Merritt, 1999.

En lo que representa a soldaduras en ranuras, la carga se transfiere en forma directa a través de la soldadura, por esfuerzos de tensión o compresión. Para una soldadura de ranura de penetración completa, se selecciona el grado de soldadura resultante, el cual debe ser tan resistente como la unión de acero. Las soldaduras de ranura de penetración parcial, en las que sólo una parte del espesor del metal se suelda, se usan algunas veces cuando el esfuerzo es bajo y no es necesario desarrollar la resistencia completa del material. El área de refuerzo de una soldadura es el producto de la longitud de la soldadura y el espesor efectivo del gotero o garganta. En empalmes simples J o tipo U, el espesor efectivo de la garganta es igual a la profundidad de la ranura y en empalmes tipo bisel o tipo V éste es igual a la profundidad del chaflán, o la profundidad del chaflán menos 1/8 de pulg, según el ángulo de aplicación y el proceso de soldadura. La AWS (Sociedad americana de Soldadura por sus siglas en inglés) no permite soldaduras de ranura de penetración parcial que se usen para tensiones cíclicas normales al eje de soldadura; además, si la soldadura se hace de un solo lado, debe restringirse a la rotación. El Instituto Americano de la construcción del acero, AISC permite que tales soldaduras se utilicen en cargas cíclicas; pero la escala del esfuerzo permisible es sólo de una tercera parte a la mitad de una soldadura de ranura de penetración completa. Los detalles de tipos recomendados de empalmes son proporcionados por la AWS.

En las soldaduras de filete, las cargas se transfieren entre las placas conectadas por el esfuerzo cortante en la soldadura. El esfuerzo cortante en las soldaduras de filete se calcula del área igual al producto de la longitud de la soldadura por el espesor efectivo de la garganta.

El espesor efectivo de la garganta es la menor distancia de la raíz a la cara de la soldadura; se supone que la cara está redondeada y es de 0.707 veces el tamaño nominal o el cateto de una soldadura de filete de igual cateto. La AISC especifica que la garganta efectiva de las soldaduras de arco sumergido se toma igual al tamaño del cateto para soldaduras de 3/8 de pulg o menos, y de la garganta teórica más 0.11 para soldaduras mayores.

Las soldaduras a tope y de muesca se usan ocasionalmente para transferir esfuerzos cortantes entre las placas. El área del esfuerzo cortante para la soldadura, es el área de la sección transversal nominal del agujero o la muesca. Este tipo de conexión se debe evitar por la dificultad de inspección para asegurar una soldadura satisfactoria y además crea una concentración de esfuerzos rigurosa, reportado por Merritt, 1999.

En trabajos realizados por Osaki y Alencastre^[39]; se centran en el estudio de la distribución de esfuerzos en uniones soldadas típicas, sometidas a cargas estáticas de diseño, teniendo en consideración la variación de algunos parámetros geométricos, utilizando para ello el método de elementos finitos (MEF), esto nos conducirá a entender con mayor claridad los factores a considerar en el diseño e inspección de uniones soldadas.

Para realizar el análisis de las uniones soldadas vamos a utilizar dos características geométricas que son las siguientes, como se muestra en la Figura 2.18.

α : ángulo de contacto

h_p : profundidad de socavación

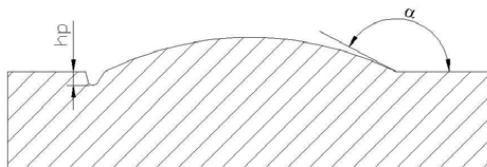


Figura 2.18. Esquema de los factores geométricos ^[39].

Los tipos de uniones simuladas en la investigación son las utilizadas y recomendadas por la AWS, la codificación de las mismas es de la AWS. Hemos usado las propiedades correspondientes a un acero estructural ASTM A36.

Los resultados que se obtuvieron para las soldaduras a tope se enlistan de la siguiente manera ^[39]:

- Demuestra que es una idea errada el pensar que al aumentar el cordón, más allá de lo calculado, se obtiene mayor resistencia de la unión, el aumento del espesor del cordón podría producir un menor ángulo de incidencia (α) o un incremento de la profundidad de socavación provocando el aumento de los esfuerzos en estas zonas de concentración.
- La variación de los esfuerzos debido a los diferentes tipos de uniones se debe principalmente a problemas de concentradores, cada tipo de unión soldada tiene concentradores de esfuerzos diferentes.
- Los parámetros geométricos que afectan principalmente a una unión soldada son la sobre monta y las socavaciones, estos dos factores pueden variar significativamente el valor de los esfuerzos.

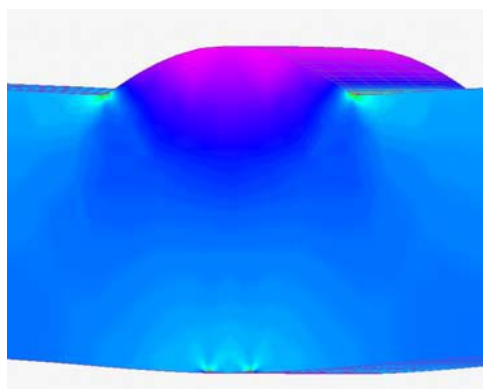


Figura 2.19. Corte de una unión a tope mostrando la zona de concentración de esfuerzos^[39].

Otro problema que se ha observado en las uniones a tope es que el concentrador se ve afectado por la cantidad del material usada en la unión, si usamos soldadura en ambos lados estamos rigidizando la unión creando una mayor discontinuidad, lo que provoca el aumento del esfuerzo^[39].

Las observaciones y conclusiones para las uniones en T y en ángulo se enlistan de la siguiente manera^[39]:

- Cuando la unión tiene penetración parcial, la mayor concentración de esfuerzos se produce en la raíz de la unión soldada.
- El efecto de los esfuerzos de corte en este tipo de uniones es de suma importancia, ellos producen una variación significativa en el esfuerzo equivalente.
- La concentración de esfuerzos solo se produce en los puntos de unión entre el material base con la unión soldada debido al flujo de esfuerzos, como se muestra en la Figura 2.20^[39].

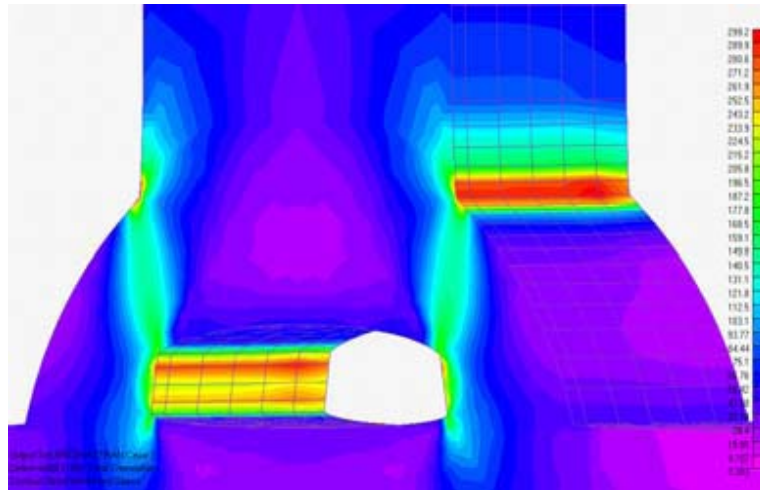


Figura 2.20. Corte de una unión en T donde se muestra como se concentran los esfuerzos ^[39].

CAPÍTULO 3

CORROSIÓN EN SOLDADURAS

En este capítulo se estudia el efecto de la corrosión en la soldadura y las consecuencias que pueden dar origen a una falla en servicio de una estructura soldada. En el diseño de uniones soldadas es importante su consideración, ya que la soldadura estará expuesta a diversos tipos de ambientes los cuales serán causantes de que la soldadura no cumpla con los requerimientos de resistencia para lo cual fue diseñada, disminuyendo así sus propiedades mecánicas. La corrosión o deterioro de la soldadura ocurre a pesar de que el metal base apropiado y metal de aporte se han seleccionado correctamente, y el procedimiento ha sido calificado conforme a los códigos y los estándares, que apliquen, obteniendo soldaduras con depósitos correctos y con penetración completa. Se sabe que las soldaduras se degradan con el tiempo, por lo cual se deben implementar las medidas necesarias para el control de la corrosión interna y externa de la unión en un componente, de acuerdo a las condiciones del sistema ya sean ductos o estructurales, según el medio ambiente en el que se encuentren.

Entre las zonas con mayor posibilidad de ataque corrosivo debido a las características de fabricación de una estructura, tanque, equipo, se destacan las salpicaduras de soldadura, discontinuidades e imperfecciones y cavidades que permitan la retención de humedad y contaminantes, así como áreas de difícil acceso para el pintado, uniones bimetálicas o pares galvánicos, zonas de retención de agua, humedad, contaminantes en general, también las zonas con un mal diseño en la unión de piezas metálicas, bordes o filos agudos, diferencias de estructura metalográfica en la soldadura y por último la presencia de esfuerzos mecánicos.

3.1 Aspectos considerados en la unión de soldadura para evitar problemas de corrosión

El diseño apropiado de una soldadura permitirá la correcta selección del material base y de aporte para producir un cordón lo más homogéneo que minimice la formación de micro celdas de corrosión.

El diseño incorrecto de la soldadura puede dar lugar a diferentes mecanismos de corrosión como la corrosión galvánica, la corrosión por hendiduras, celdas de concentración auto catalítica, corrosión por erosión y disolución del metal base.

Algunas de las causas de mal diseño que propician la corrosión son:

- Uso de materiales disímiles.
- Drenaje pobre del componente entre la unión de soldadura.
- Uniones entre metales y no metales.
- Presencia de grietas, socavados y poros.

Sin embargo, hay diferentes formas de controlar estos aspectos que disminuyen la resistencia a la corrosión de las soldaduras que podrían ser aplicando técnicas de recubrimientos que inhiben la corrosión, protección catódica, protección anódica, buena selección de materiales que tengan resistencia a la corrosión, el diseño de la unión que presente buena geometría para evitar la acumulación de soluciones que promuevan la corrosión en la unión^[13].

En estudios de la NACE INTERNATIONAL^[31], establece que se puede hacer mucho en el diseño detallado para mejorar la resistencia a la corrosión y obtener un mejor servicio de los productos soldados donde se destacan tres

factores importantes que deben estar presentes al momento de diseñar un sistema.

1. Diseñar para permitir un drene libre y completo.
2. Eliminar o sellar hendiduras en las soldaduras.
3. Que sea la soldadura fácil de inspeccionar.

Si el diseño cumple con las recomendaciones mencionadas anteriormente básicamente los diseños van encaminados a evitar el estancamiento o concentración de líquidos y a la generación de formas que favorezcan y permitan el acceso para limpieza, supervisión y mantenimiento de la soldadura.

- Diseño que permita una fácil limpieza

Las superficies horizontales retienen suciedad. Las superficies inclinadas favorecen la limpieza manual y por lluvia y dirigen el agua evitando estancamiento.

- Diseño que facilite el drenaje

Los tanques y contenedores se deben diseñar de forma tal que drenen por completo el líquido contenido. Se deben sellar las juntas o hacerlas lo suficiente separadas para el libre desagüe para evitar la corrosión por hendiduras. Ésta ocurre cuando el agua y contaminantes corrosivos se mantienen atrapados entre los huecos con la presencia de cloruros en el ambiente como se muestra en la Figura 3.1.

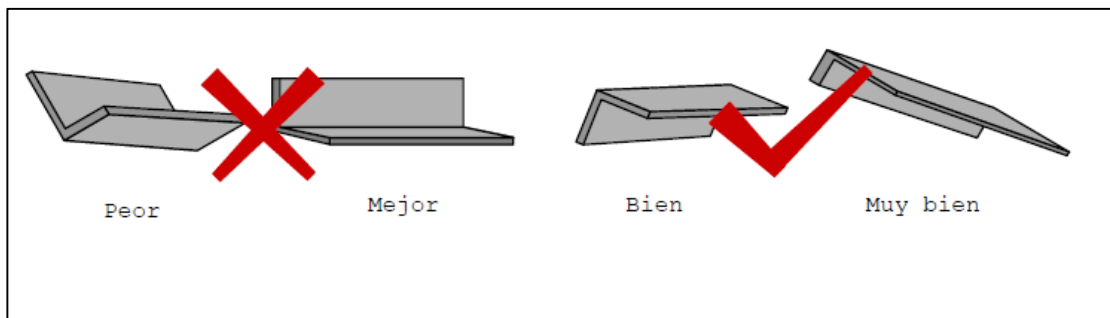


Figura 3.1. Diseño para favorecer la limpieza y el drenaje ^[14].

- Seleccionar las geometrías simples

Evitar bordes, trampas y/o cavidades en donde se pueda acumular la humedad o suciedad. Preferir cordones continuos por ambos lados para sellar las cavidades como se muestra en la Figura 3.2.

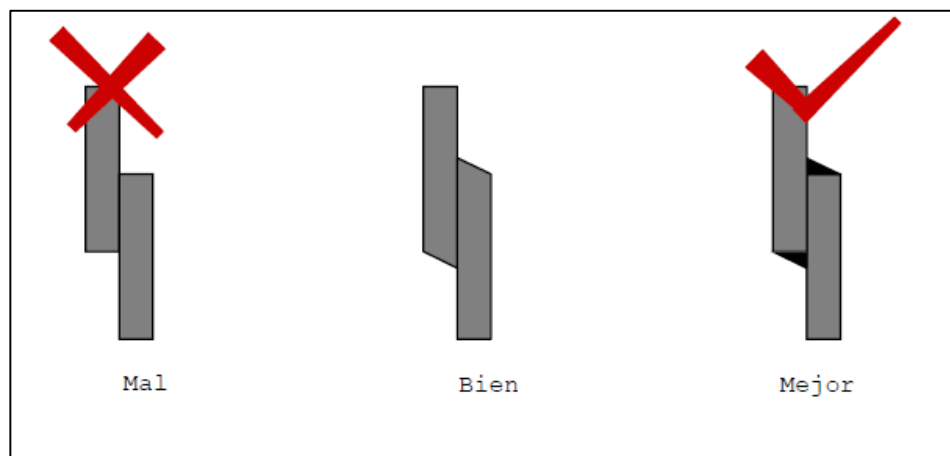


Figura 3.2. Diseño para evitar cavidades o trampas ^[14].

Estudios de la NACE INTERNATIONAL ^[31], establece que el diseño de juntas utilizadas para acero inoxidable, es similar al de los aceros ordinarios. El diseño de junta seleccionada debe producir una soldadura de resistencia

apropiada y desempeño en servicio, manteniendo bajos costos. Las soldaduras a tope deberán ser con penetración completa, para servicio en atmósferas corrosivas.

Los filetes de soldadura no necesitan tener penetración completa, siempre que se suelden ambos lados y los extremos para evitar espacios vacíos que puedan juntar líquido y permitir la corrosión por hendiduras. Cuando las paredes laterales forman un ángulo recto con el fondo de un tanque, el filete de soldadura a menudo no es tan liso como se muestra en la Figura 3.3a. Generalmente es áspero y varía en el ancho para compensar fallas de ajuste. Debido a la localización, es muy difícil esmerilar la soldadura. Los sedimentos tienden a aglomerarse y es difícil eliminarlos, dando lugar a un tipo de ataque por hendidura debajo del sedimento. A menos que se suelde desde afuera, como se muestra en la Figura 3.3b, la hendidura también es susceptible de ataque por esquicios. Redondeando el ángulo y moviendo la soldadura a la pared lateral se supera esta dificultad, como se muestra en la figura 3.3c. Esta construcción ha mejorado mucho la resistencia a la corrosión y tiene mucha mejor resistencia a la fatiga, NACE INTERNATIONAL ^[31]

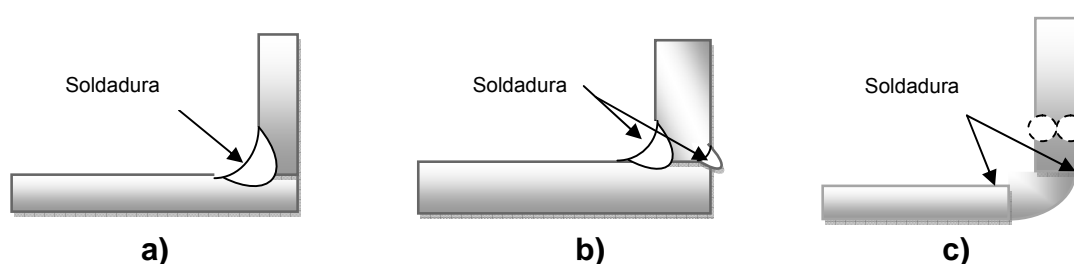


Figura 3.3. a) Esquina soldada desde el interior del tanque (diseño pobre por dentro); b) Esquina soldada desde ambos lados (Diseño pobre en el interior pero mejor diseño por fuera del tanque); c) Soldadura en la pared de la esquina con un mejor diseño en el interior y afuera del tanque el cual tiene buena resistencia a la corrosión y a la fatiga. ^[15]

Por otra parte la penetración completa de las soldaduras es un factor importante para la resistencia a la corrosión donde es bien sabido que para lograr una óptima resistencia, las soldaduras a tope deben fusionar completamente en la unión. En servicio corrosivo, cualquier abertura resultante es un sitio potencial para el desarrollo de la corrosión por hendiduras. Un ejemplo típico de una abertura indeseable es una fusión incompleta en el pase de raíz en la soldadura de un tubo, tal como se muestra en las Figuras 3.4 y 3.5.

En algunos ambientes, la corrosión tiene lugar en la hendidura, la cual a su vez, puede dar lugar a una falla en la junta soldada, por la NACE INTERNATIONAL ^[15].

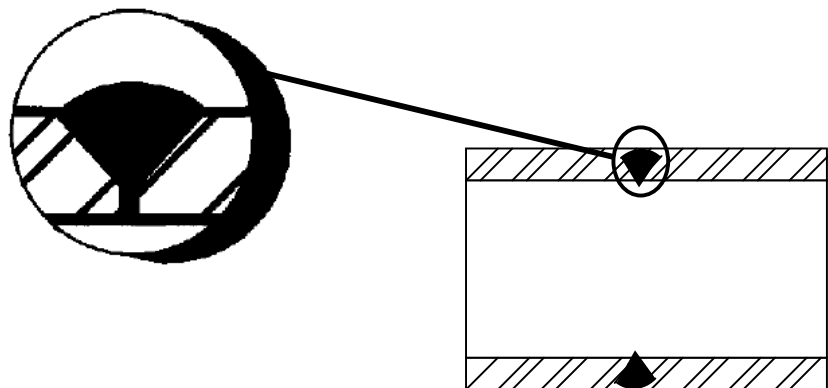


Figura 3.4 Soldadura de tubería con penetración incompleta (corrosión severa) ^[15].

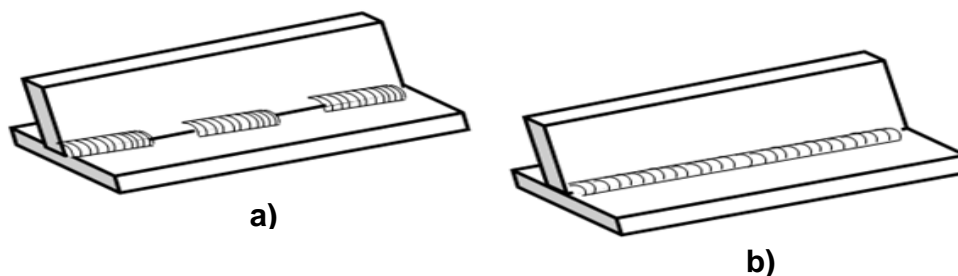


Figura 3.5 Vigas de soporte con agrietamiento, a) Agrietamiento severo en filete escalonado, b) Filetes en ambos lados grieta continua sellada ^[15].

Reglas de diseño para mejorar la resistencia a la corrosión:

- a. Evitar esfuerzos excesivos mecánicos y concentración de esfuerzos en componentes expuestos a medios corrosivos. Los esfuerzos residuales son uno de los más susceptibles a propiciar agrietamiento por esfuerzos de corrosión.
- b. Evitar contacto eléctrico entre metales distintos (metal base y metal de aporte) para prevenir la corrosión galvánica.

La regla general para el diseño es: evitar la heterogeneidad.- Metales diferentes, espacios de vapor, distribución desigual de calor y esfuerzos y otras diferencias entre los puntos en el sistema conducen a un daño por corrosión. Además, en el diseño, se procura hacer todas las condiciones lo más uniformes posibles a través de todo el sistema.

La corrosión es un factor que no se puede eliminar pero sí se puede prevenir o controlar, donde la prevención de la corrosión involucra factores inherentes, que están bajo el control del ingeniero metalúrgico. Las tres principales categorías consideradas son la 1) selección de materiales, 2) factores de diseño y 3) análisis de predicción de vida ^[13].

La selección de los materiales implica muchos factores que tienen que ser optimizados para una aplicación en particular. La consideración más importante es el costo de la materia y su aplicabilidad en las condiciones ambientales, de modo que la integridad puede ser mantenida durante la vida útil de la unión. En la industria metal mecánica la composición química y las propiedades mecánicas de los materiales son importantes.

Dentro de las propiedades mecánicas más importantes son; el esfuerzo a la cedencia, dureza, rigidez, compresión, resistencia al corte, al impacto, resistencia a la tracción y al desgaste.

Como se indica en la norma particular (NRF-137, 2006) ^[11]; en cuanto a la protección de los materiales contra la corrosión depende del tipo de componente en servicio, por ejemplo en tuberías de ductos para el transporte de hidrocarburos, se deben implementar las medidas necesarias para el control de la corrosión interna y externa de la tubería, de acuerdo a las condiciones del sistema de ductos, el medio en el cual se encuentre y a lo indicado en los incisos subsecuentes de este apartado.

El control de la corrosión externa de los ductos enterrados o sumergidos debe realizarse mediante la aplicación de recubrimientos anticorrosivos específicos en la norma de referencia particular (NRF-026, 2001) ^[37]. Estos sistemas además, se deben complementar con un sistema de protección catódica por medio de ánodos galvánicos o por un sistema de ánodos con corriente impresa que mitigue la corrosión. El diseño e instalación de la protección catódica debe realizarse de acuerdo a lo indicado en la norma de referencia (NRF-047, 2002) ^[37].

El control de la corrosión interna de los ductos debe realizarse mediante la aplicación de inhibidores de corrosión cumpliendo con los requisitos que se mencionan en la norma de referencia (NRF-005, 2000) ^[37].

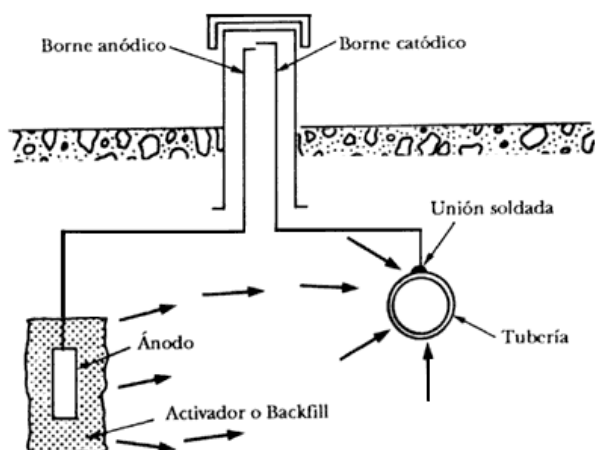


Figura 3.6. Esquema del montaje de un sistema de protección de una tubería enterrada con un ánodo de sacrificio ^[35].

Se une eléctricamente la tubería de hierro al ánodo galvánico, generalmente zinc o magnesio. Un esquema simple de montaje está representado en la Figura 3.6. La distancia mínima entre el ánodo y la tubería debe ser de 3 metros y deben utilizarse cables de conexión de bastante grosor para evitar las caídas de tensión. Hay que cuidar también muy particularmente la unión del cable con el alma de acero del ánodo. Este cable debe estar siempre bien aislado evitando un consumo innecesario de corriente para lograr su protección.

En la Figura 3.7 se puede apreciar un ejemplo de una instalación donde los ánodos van equipados de un alma de acero sobresaliente por ambos extremos, la cual se conformará en la obra y se soldará en el lugar preciso de la estructura.

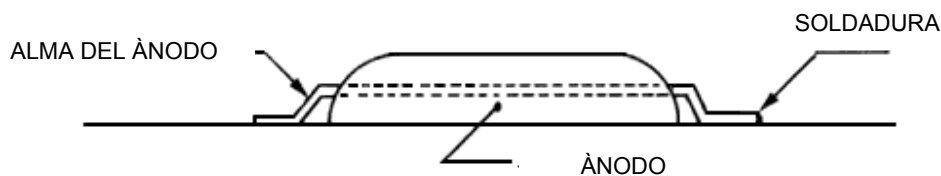


Figura 3.7. Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio en estructuras fijas en el mar ^[35].

Otra de las causas de corrosión en las soldaduras es la diferencia de estructura metalúrgica, debido a la unión de metales con un diferencial de potencial mayor uno al otro, lo cual provoca que surja un par galvánico. La diferencia en la composición puede influir en el proceso de corrosión en la vecindad de la soldadura. Los pares de metales disímiles pueden producir la corrosión galvánica macroscópica. Así mismo, la zona de fusión crea un efecto galvánico microscópico debido a la segregación microestructural resultando de la solidificación. Por otra parte la diferencia en la microestructura se hace susceptible al ataque por hidrógeno. La importancia de seleccionar correctamente el material de aporte es un factor potencial en la producción de uniones de metales distintos, que trabajen bien en servicio ^[20]. Los metales de aporte deben ser compatibles con los dos metales base y pueden ser capaces de empezar a depositar con un mínimo de dilución. Dos importantes criterios que deben gobernar la selección de un apropiado metal de aporte para la soldadura de dos metales distintos son las siguientes:

- El metal de aporte debe mejorar los diseños requeridos de la unión, tales como, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión.
- El metal de aporte debe cumplir con los criterios de soldabilidad con respecto a la dilución, las temperaturas de fusión, y otra propiedad física requerida de la soldadura.

3.2 Procesos de soldadura aplicados a componentes sometidos a condiciones corrosivas

Todos los procesos de soldadura por arco son adecuados para soldaduras en aceros al carbono. Para seleccionar el mejor proceso a utilizar para una aplicación particular se deben tener en cuenta las siguientes características: 1) el material, 2) espesor de la unión (la placa, el diseño conjunto, la posición de la soldadura, y lugar), 3) los costos de la soldadura, tales como los de mano de obra, los consumibles y equipos complementarios. 4) El proceso de soldadura adecuado para componentes que van a estar sometidos a servicios corrosivos. Para todos aquellos componentes que están sometidos a condiciones corrosivas como son plataformas marinas, tanques de almacenamiento, tuberías de conducción sumergidas o enterradas, mástiles de perforación, barcos, entre otros, los procesos de soldadura deben ser seleccionados correctamente junto con el material de aporte, esto con el fin de no afectar las propiedades mecánicas de la unión, sin disminuir la resistencia a la corrosión del material. De manera más práctica, se citarán ejemplos de los procesos de soldadura utilizados para la fabricación de componentes sometidos en condiciones corrosivas como se muestra en la Figura 3.8.



Figura 3.8 Industrias que requieren soldadura en sus componentes ^[6].

3.2.1 Procesos de soldadura con material de aporte

La Tabla 3.1 proporciona una guía de los procesos de soldadura que pueden ser usados en la unión de aceros al carbono, (descrito en reparación de gasoductos API-5L-X80); los aceros HSLA (Aceros de alta resistencia de baja aleación) para tubería X80 pueden ser soldados por todos los diferentes métodos comúnmente utilizados de soldadura por arco, tales como ^[19]:

- a) Procesos de soldadura por arco de metal protegido (SMAW),
- b) Proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW) y Proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW)

La práctica de bajo hidrógeno debe ser empleada, con todos los procesos cuando los valores de carbono equivalente CE o P_{cm} (parámetro de composición) indiquen susceptibilidad al agrietamiento. El proceso de soldadura utilizado para unir aceros de ultra resistencia (HSLA) deberá seleccionarse considerando los siguientes aspectos ^[19]:

1. Requerimientos de resistencia del metal soldado.
2. Comportamiento del metal soldado durante la soldadura de interpasos.
3. Requisitos de tenacidad.
4. Susceptibilidad al agrietamiento en la soldadura y la ZAC.

Tabla 3.1 Procesos de soldadura por arco para aceros al carbón^[12].

PARAMETROS	SMAW	GMAW	FCAW
Usabilidad	Muy adaptable, toda posición, pueden ser utilizadas al aire libre. Muy portable se puede utilizar en aceros al carbono hasta calibre 18. La preparación de la junta es necesaria dependiendo del espesor, pero otros procesos GMAW, FCAW y SAW son generalmente más económicos.	Todas las posiciones en el proceso de modo de arco pulsado o arco cortó. Moderadamente adaptable, pero uso limitado fuera de lugar donde es posible la pérdida de la protección. Usado sobre acero de bajo espesor menor de 0.25 mm (0.010 in). Por encima de 4.08 mm (3/16 in), requiere la preparación de la junta. No superando el límite del espesor de la placa.	Es un proceso para todas posiciones. Equipo similar al GMAW, pero semiprotegido, tiene mejor portabilidad y es usado al aire libre. Mínimo espesor de placa con una medida de calibre 18) para una misma protección con un material arriba de 6.4 mm requiere preparación de la unión. Con protección de CO ₂ , para materiales arriba de 13 mm requiere preparación del a junta. No hay límite superior del espesor de la placa.
Factor de Costo	Una deposición baja en el rango de proceso (arriba de 9Kg/h o bien 20 lb) con baja eficiencia en el depósito típicamente de (65%) bajo factor de operación, bajo costo del equipo y los, accesorios de repuesto son mínimos. La velocidad de soldadura es relativamente baja. Es requerida la limpieza de la escoria.	Rangos de deposición de 16 Kg/hra es superior que el SMAW. Eficiencia de deposición (90 al 95%) y el factor de operador (típico 50%) son también superiores. Costos de equipo y accesorios de repuesto son moderadamente altos o superiores (la potencia suministrada en el arco pulsado son de alto costo). La velocidad de soldadura son moderadas o superior (el arco de CO ₂ puede soldar por arriba de 2540 mm/min (100 in/min)). La limpieza es mínima.	Rangos de deposición arriba de 18 Kg/h, o 40 Lb/h son superiores que el GMAW deposición eficiente (80 a 90%) son más bajos que el factor de operador (50%) son similar para el GMAW. Costo del equipo moderado. Buenos índices o rangos de deposición pueden ser obtenidos con fuentes de poder convencionales. La velocidad de soldadura es moderada o alta. Es requerida la eliminación o remoción de la escoria y salpicaduras.
Calidad de la soldadura	Depende fuertemente de la habilidad del soldador. La falta de fusión y las inclusiones de escoria son un problema potencial. Los cordones relativamente pequeños usualmente resultan por un alto porcentaje de refinación en soldadura de multipasos, y muy buena dureza que es alcanzado con los algunos electrodos.	Muy buena calidad. Porosidad, o la falta de fusión puede ser un problema. Menos tolerante a la corrosión y cascarilla de laminación por el flujo de proceso que utilizan. Se obtienen durezas muy buenas.	Buena calidad. La dureza del metal solado es de regular a buena (mejor con electrodos básicos). Las inclusiones de escoria son un problema potencial.
Efectos sobre el metal base	Bajo calor de entrada puede causar un rápido enfriamiento en el HAZ. Los recubrimientos de flujo son una fuente potencial de hidrógeno.	Generalmente, es un proceso de bajo hidrógeno.	El núcleo de fundente puede contribuir hidrógeno
Comentarios Generales	Muy versátil, proceso de bajo costo. Especialmente en fuertes reparaciones de juntas no rutinarias. Usualmente no económicas sobre soldaduras de espesor estándar o sobre juntas repetitivas que pueden ser mecanizadas.	Relativamente versátil. Equipo muy costoso y complejo menos portátil que el SMAW. Sencillamente mecanizado. Un proceso limpio y de altos rangos de deposición y eficiencias que el SMAW.	Relativamente versátil (la versión de autoprotección puede ser usada al aire libre). Rangos superiores de deposición que el GMAW (mayores humos). Fácilmente saldable fuera de posición. Fácilmente mecanizado.

En estudios realizados por Terán y Tovar^[42], se presenta el estudio del deterioro del acero inoxidable austenítico 304 unido por soldadura SMAW, GTAW y GMAW expuesto en un medio industrial a gases de azufre. Se estudió la microestructura del cordón de soldadura utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM), la interface entre el material base y el de aporte.

Siempre que la corrosión esté originada por una reacción química, la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la composición del fluido y las propiedades de los materiales en cuestión^[42].

En el desarrollo del proceso de soldadura por arco utilizando electrodo revestido serie E308L-16. El tiempo de aplicación del cordón de soldadura fue de 1'57"64", se trabajó con potencia de 38V y corriente de 85 Amp. En iguales circunstancias y teniendo las mismas condiciones de trabajo se realizaron los procesos de soldadura restantes GTAW y GMAW. La prueba de corrosión a la cual se sometieron las probetas, se clasifica como una prueba de campo donde se busca determinar cuál es el metal de aporte y metal base en la zona afectada térmicamente menos afectado por el medio agresivo, fundamentalmente de tipo ácido como humos y vapores de azufre y su correlación con el proceso de soldadura utilizado.

Las probetas fueron desmontadas del registro del ventilador por intervalos programados de 15 días hasta completar una cantidad de 6 probetas, para estudiar el avance de la corrosión para posteriormente ser evaluadas metalográficamente.

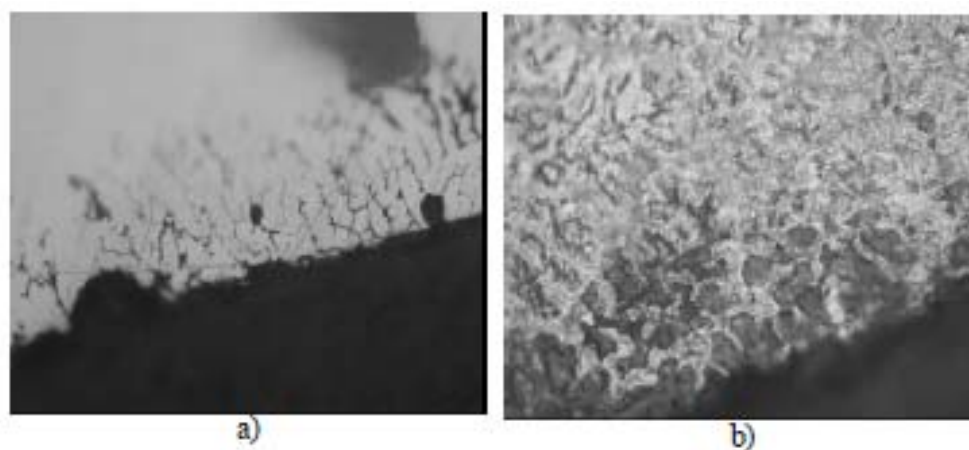


Figura 3.9. Probetas con proceso GMAW. a) probetas sin ataque, cordón de soldadura X50. b) Atacada, Zona fundida X500^[42].

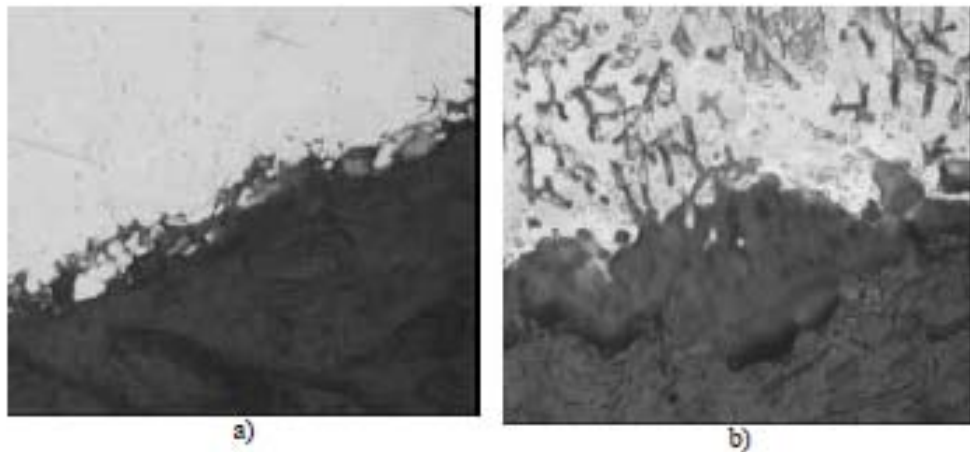


Figura 3.10. Probetas con proceso SMAW. a) probetas sin ataque, cordón de soldadura X500. b) atacada con ácido, zona fundida X500^[42].

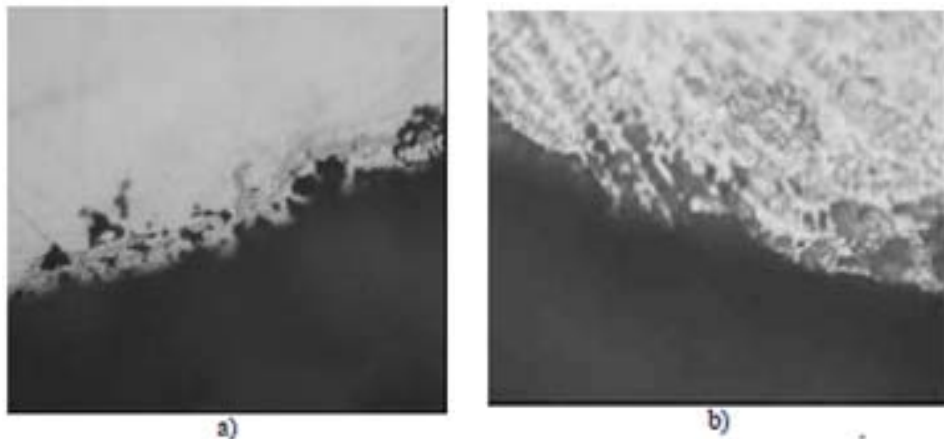


Figura 3.11. Probetas con proceso GTAW. a) probetas sin ataque, cordón X500. b) Zona difundida y atacada con ácido^[42]

Para analizar la zona segregada y establecer la morfología y composición de esta zona, se utilizó microscopía electrónica de barrido y microsonda EDX, realizando microanálisis puntual sobre la zona segregada de la Figura 3.12 y 3.13 y la zona no segregada como se observa en la Figura 3.14, encontrando que existe la posibilidad de formación de carburos de cromo en estas zonas especialmente en el proceso GMAW, lo cual explicaría el porqué se originó la corrosión sobre las zonas segregadas, donde se presentó migración de carbono a la zona de mayor segregación, con la que se puede

tener una elevada concentración de carbono lo cual incrementa la posibilidad de formación de carburos, disminuyendo la resistencia a la corrosión, además por la disimilaridad química entre la zona segregada y la no segregada se genera un par galvánico que incrementa el fenómeno^[42]

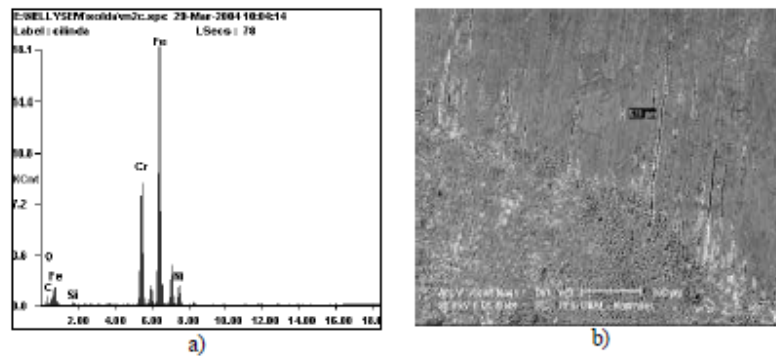


Figura 3.12. a) Espectro EDAX b) imagen SEM de zona segregada de probetas con proceso GTAW^[42].

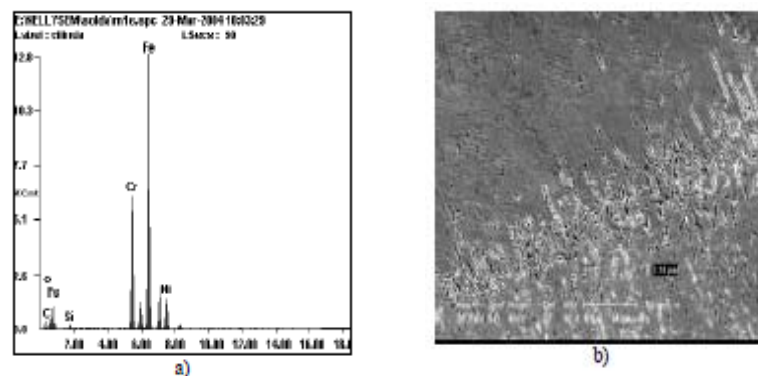


Figura 3.13. a) Espectro EDAX b) imagen SEM de zona segregada de probetas con proceso GMAW^[42].

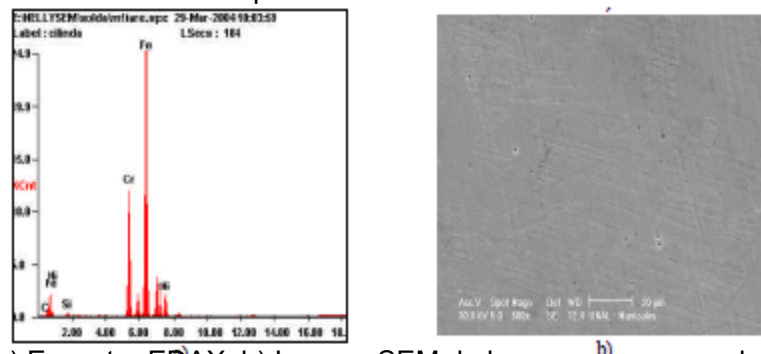


Figura 3.14. a) Espectro EDAX, b) Imagen SEM de la zona no segregada de probetas con proceso GMAW^[42].

En la literatura se menciona que la corrosión intergranular se genera en la zona afectada térmicamente; en esta investigación el problema de corrosión intergranular se presentó en el cordón de soldadura, especialmente en el proceso GMAW, probablemente debido al fenómeno de segregación, el cual pudo ocasionar la precipitación de carburos de cromo M_7C_3 o $M_{23}C_6$, dada la composición química presentada en estas zonas.

Terán y Tovar^[42], concluyen tanto de las imágenes de microscopía óptica como las imágenes de SEM, se observó que el proceso de soldadura GMAW fue el más afectado por la corrosión intergranular, en las zonas segregadas, al interior del cordón, mientras que en los procesos SMAW y GTAW el avance de la corrosión no fue tan significativo. Probablemente la causa del fenómeno de corrosión presentado se debió a los niveles de segregación presentados en los cordones de soldadura, lo cual generó según los resultados una mayor presencia de carbono en las zonas segregadas y adicionalmente se presenta un par galvánico entre la zona segregada y no segregada que co-ayuda al fenómeno de corrosión.

3.2.2 Material de aporte

Las consideraciones que gobiernan la elección del metal de aporte para soldar aceros de alta resistencia (HSLA) son muy similares a las de los aceros estructurales, con excepción de utilizar prácticas de soldadura de bajo hidrógeno; la cantidad de hidrógeno llevado por el metal de aporte al charco de soldadura deberá ser evaluado con referencia al carbono equivalente (CE) y al parámetro de composición (P_{cm}). Generalmente, un alto porcentaje de CE sugiere tratamientos de precalentamiento y post calentamiento de la soldadura [19].

La Sociedad Americana de Soldadura (AWS) clasifica el material de aporte conforme a los procesos de soldadura y composición química del material base. En la Tabla 3.2 se observa la clasificación de acuerdo a los procesos de soldadura GMAW, SMAW y FCAW.

Tabla 3.2. Especificaciones AWS del material de aporte por el tipo de material base y proceso de soldadura ^[22].

TIPO DE MATERIAL	SMAW	GMAW	FCAW
Acero al Carbón	A5.1	A5.18	A5.20
Aceros baja aleación	A5.5	A5.28	A5.29
Aceros Inoxidables	A5.4	A5.9, A5.22	A5.22
Hierro fundido	A5.15	A5.15	A5.15
Aleaciones de Níquel	A5.11	A5.14	
Aleaciones de Aluminio	A5.3	A5.10	
Aleaciones de Cobre	A5.6	A5.7	
Aleaciones de Titanio		A5.16	
Aleaciones de Zirconio		A5.24	
Aleaciones Magnesio		A5.19	
Electrodos de Tungsteno		A5.12	
Aleaciones para endurecimiento superficial	A5.13	A5.21	A5.21
Partes móviles consumibles		A5.30	
Gas de protección		A5.32	A5.32

Por otra parte el uso del metal de aporte de alta aleación es aplicado para componentes resistentes a la corrosión por agrietamiento o picaduras en la soldadura. Para aumentar la resistencia a la corrosión de los metales de aporte, éstos pueden ser mejorados con aleaciones de níquel y cromo- molibdeno. Estudios realizados en aleaciones tipo Ferralium 255 ^[12]; sobre la resistencia a la corrosión de las soldaduras, se muestran en la Tabla 3.3.

Es evidente que el uso de materiales de aporte de alta aleación mejora la resistencia a la corrosión de las diferentes zonas de la soldadura. La selección apropiada de la técnica de soldadura puede mejorar aun más la resistencia a la corrosión de las uniones.

Tabla 3.3. Resistencia a la corrosión de las soldaduras de la aleación 255 de Ferralium usando varios metales de aporte de aleación base níquel y diferentes técnicas de soldadura^[12].

METAL DE APORTE	TEMPERATURA CRITICA DE PICADURAS					
	TIG		GMAW		ARCO SUMERGIDO	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F
Aleación de Hastelloy G-3	30-35	85-95 ^(a)	30	85 ^(a)	30-35	85-95 ^(b)
IN-112	30	85 ^(a)	....	....	35-40	95-105 ^(b)
Aleación de Hastelloy C-276	...	...	...	...	25-50	75-85 ^(a)
Aleación de Hastelloy C-22	30	85 ^(a)	...	...	35-40	95-105 ^(a)
(a) HAZ (b) HAZ mas el metal base • Placas de prueba en 10% de FeCl ₃ por 120 hrs						

La resistencia a la corrosión de las soldaduras se relaciona con los cambios microestructurales y químicos resultantes del ciclo térmico.

La norma NRF-186^[18]; indica que los requerimientos de los materiales de acero estructural y las especificaciones de los electrodos y los diferentes procesos de soldadura aplicados a la construcción de plataformas marinas son considerados en las Tablas 3.4-3.7.

Todas las soldaduras se deben realizar con electrodos de bajo hidrógeno, con las siguientes excepciones:

- a) Se pueden utilizar electrodos diferentes al tipo bajo hidrógeno para los pasos de raíz en aceros del grupo I [275 MPa (40 ksi)] o menores para cualquier espesor.
- b) Se pueden utilizar consumibles diferentes al tipo bajo hidrógeno para todos los pasos en aceros del grupo I [275 MPa (40 ksi)] o menores si el espesor de la garganta es menor de 13 mm (1/2").

El proceso de soldadura por arco con protección de gas (GMAW), se puede emplear para el paso de raíz, pero sólo por el tipo de transferencia de metal, globular o por rociado.

Tabla 3.4 (a) Clasificación de los aceros estructurales empleados en plataformas marinas fijas para la designación del electrodo y proceso de soldadura, (b) Proceso y electrodos de soldadura para los aceros indicados en el punto (a)^[18].

Grupo	Clase	a) REQUISITOS DE LA ESPECIFICACIÓN DEL ACERO				b) REQUISITOS DEL METAL DE APORTE		
		Especificación del acero		Resistencia a la Tensión		Proceso	Espec. AWS	Clasificación del electrodo
				Mpa	Ksi			
1	C	ASTM A36	≤ 19 mm (3/4 pulg)	400-550	58-80	SMAW	A5.1.1	E60XX,E70XX
							A5.5.2	E70XX-X
1	C	ATM A53	Grado B	414 min	60 min	SAW	A5.17	F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX
1	C	ASTM A106	Grado B	414 min	60 min			
1	C	ASTM A131	Grado A	400-490	58-71			
1	A	ASTM A131	Grado CS, E	400-490	58-71			
1	B	ASTM A131	Grado B,D	400-520	58-75			
1	C	ASTM A135	Grado B	414	60	GMAW	A 5.18	ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM
1	C	ASTM A139	Grado B	414 min	60 min			
1	C	ASTM A285	Grado C(espesor hasta 19 mm (3/4 pulg)	380-515	55-75			
1	A	ASTM A 333	Grado 6	414 min	60 min			
1	A	ASTM A 334	Grado 6	414 min	60 min			
1	C	ASTM A 381	Grado Y35	414 min	60 min			
1	C	ASTM A 500	Grado A	310 min	45 min	FCAW	A5.20	E6XT
1	C		Grado B	400 min	58 min			E6XT-XM
1	C	ASTM A 501		400 min	58 min			E7XT-X
1	B	ASTM A 524	Grado I	414-586	60-85			E7XT-XM
1	B		Grado II	380-550	55-80		A5.29	E6XTX-X, E6XT-XM, E7XTX-X, E7XTX-XM
1	B	ASTM A 573	Grado 65	450-530	65-77			
1	B	ASTM A 709	Grado 36 T2	400-550	58-80			
1	C	API Spec 5L	Grado B	414 min	60 min			
II	C	Grado X42	Grado X42	415 min	60 min			

Notas

1. Electrodo de acero al carbono
2. Electrodo de acero de baja aleación
3. Electrodo con el sufijo GS deben excluirse
4. Electrodo con el sufijo 2,2m,3,10,10,14, GS, deben excluirse y los electrodos con el sufijo 11 deben excluirse en espesores mayores a 13 mm (1/2 pulg)
5. Especificación ASTM, API, AWS o equivalente

Tabla 3.5 (a) Clasificación de aceros estructurales empleados en plataformas marinas fijas para la designación del electrodo y proceso de soldadura ^[18].

Grupo	Clase	REQUISITOS DE LA ESPECIFICACIÓN DEL ACERO			
		Especificación del acero		Resistencia a la tensión	
				Mpa	Ksi
I	C	ASTM A36	Espesor 19 mm (3/4 pulg)	400-550	58-80
II	B	ASTM A131	Grado AH 32	440-590	64-85
II	B		Grado AH 36	490-620	71-90
II	A	ASTM 131	Grado DH32, EH32	440-590	64-85
II	A		Grados DH36, EH36	490-620	71-90
II	A	ASTM A913	Grado 50	450 min	65 min
I	B	ASTM A516	Grado 65	450-585	65-85
II	A	ASTM A537	Clase 1 (espesor hasta 63.5 mm (2 1/2 pulg))	485-620	70-90
II	C	ASTM A572	Grado 42 (espesor hasta 50.8 mm (2 pulg))	415 min	60 min
II	C		Grado 50 (espesor hasta 50.8 mm (2 pulg))	450 min	65 min
II	C	ASTM A618	Grado A	485-620	70-90
II	B	ASTM A633	Grado C, D (63.5 mm (2 1/2) y menosres)	485-620	70-90
II	B	ASTM A 709	Grado 50T2	450 min	65 min
II	B		Grado 50T3	450 min	65 min
II	C	ASTM A992		450 min	65 min
II	C	API spec 2MT2	Clase C	450-620	65-90
II	A	API Spec 2MT2	Clase A	427-565	62-82
II	A	API Spec 2H	Grado 42	427-565	62-82
II	A		Grado 50 (hasta 63.5 mm (2 1/2 pulg) de espesor)	483-620	70-90
II	A		Grado 50 (hasta 63.5 mm (2 1/2 pulg) de espesor)	450-620	70-90
II	B	API Spec 2MT1		448-620	65-90
II	B	API Spec 2MT2	Clase B	450-620	65-90
II	A	API Spec 2W	Grado 42 (Hasta 25.4 mm (1 pulg) de espesor)	427	62
II	A		Grado 50 (mayor de 25,4 mm (1 pulg) de espesor)	427	62
II	A		Grado 50 (hasta 25.4 mm (1 pulg) de espesor)	448 min	65 min
II	A		Grado 50 (hasta 25.4 mm (1 pulg) de espesor)	448 min	65 min
II	A		Grado 50T (hasta 25.4 mm (1 pulg) de espesor)	483	70 min
II	A		Grado 50T (hasta 25.4 mm (1 pulg) de espesor)	483	70 min
II	A	API Spec 2Y	Grado 42 (hasta 25.4 mm (1 pulg) de espesor)	427 min	62 min
II	A		Grado 42 (mayor a 25.4 mm (1 pulg) de espesor)	427 min	62 min
II	A		Grado 50 (hasta 25.4 mm (1 pulg) de espesor)	448 min	62 min

Tabla 3.5 (b) Proceso y electrodos de soldadura para los aceros listados en la Tabla (3.5 a)^[18].

Requisitos del material de aporte		
Proceso	Especificación AWS del electrodo	Clasificación del electrodo
SMAW	A 5.1	E7015, E7016, E7018, E7018-1, E7028
	A 5.2	E7015-X, E7016-X, E7018-X
SAW	A 5.17	F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX
	A 5.23	F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX
GMAW	A 5.18	ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodos como el sufijo GS deben excluirse)
	A 5.28	ER70S-XXX, E70C-XXX
FCAW	A 5.20	E7XT-X, E7XT-XM (Electrodos con el sufijo 2, 2M, 3, 10, 13, 14 y GS, deben excluirse, así como los electrodos con el sufijo 11 en espesores mayores a 13 mm (1/2 pulg))
	A 5.29	E7XTX-X, E7XTX-XM

Tabla 3.6 (a) Clasificación de acero estructurales empleados en plataformas marinas fijas para la designación del electrodo y proceso de soldadura, (b), Proceso y electrodos de soldadura para los aceros empleados en la 3.6 (a)^[18].

Tabla 3.6 a)				Tabla 3.6 b)				
Grupo	Clase	Requisitos de la especificación del acero		Requisitos del metal de aporte				
		Especificación del acero		Resistencia a la tensión		Proceso	Espec. AWS	Clasificación del electrodo
				Mpa	Ksi			
III	A	API Spec 2W	Grado 60 (hasta 25.4 mm (1 pulg de espesor))	517 min	75 min	SMAW	A 5.5	E8015-X, E8016-X, E8018-X
III	A		Grado 60 (mayor a 25.4 mm (1 pulg de espesor))	517 min	75 min			
III	A	API Spec 2 Y	Grado 60 (hasta 25.4 mm (1 pulg de espesor))	517 min	75 min	SAW	A 5.23	F8XX-EXXX-XX, F8XX-ECXXX-XX
III	A		Grado 60 (mayor a 25.4 mm (1 pulg de espesor))					
III	A	ASTM A 537	Clase 2	550-690	80-100	GMAW	A 5.28	ER80S-XXX, E80C-XXX
III	A	ASTM A 678	Grado B	550-690	80-100			
III	A	ASTM A 710	Grado A, Clase 3 (tratado térmicamente con temple y precipitación, 50.8 mm (2 pulg a 101.6 mm (4 pulg)))	515 min	75 min	FCAW	A 5.29	E8XTX-X, E8XTX-XM
III	A		Grado A, Clase 3 (tratado térmicamente con temple y precipitación mayor a 101.6 mm (4 pulg))	485 min	70 min			

Nota

1. Electrodos de acero de baja aleación
2. Especificación ASTM, AWS o equivalente

Por otra parte, los aceros de bajo carbono HSLA, tales como algunos grados API de tubería de conducción (Tabla 3.7), pueden permitir el uso de electrodos celulósicos (EXX10) con o sin precalentamiento, dependiendo de la relevancia de su CE y P_{cm} . En las Tablas 3.7 a) y b), se sugieren electrodos para los proceso de arco SMAW y GMAW utilizados en aplicaciones estructurales y de recipientes a presión [19].

Tabla 3.7 (a) Muestra los electrodos y proceso para aplicación estructural y fabricación de recipientes a presión [18].

Combinación de Metales de Aporte Recomendado (con Esfuerzo de Cedencia Nominal de 70 Ksi Mínimo) de acuerdo al Metal Bases						
Aceros				Metal de Aporte Correspondiente		
Especificación del Acero ^{a,b}		Esfuerzo mínimo de Cedencia Ksi	Esfuerzo mínimo de Tensión Ksi	Especificación del electrodo	Esfuerzo de Cedencia Ksi	Esfuerzo de Tensión Ksi
ASTM A 203	GRADO A	37	68-85	Proceso de Arco Eléctrico Revestido (ver AWS A5.1 o A5.5)		
	GRADO B	40	70-90			
	GRADO C	37	65-85			
	GRADO D	40	70-90	E7015, E7016, E7018, E7028	60	72 min
ASTM A710	GRADO A-C2	55	65	E7015-X, E7016-X, E7018, E7028-X	57	70 min
API 2H	GRADO 42	42	62-80	E7010	60	70 min
	GRADO 50	50	70 MIN			
API 5L	GRADO X52	52	66-72	Proceso GMAW (ver AWS A5.18)		
	GRADO X56	56	71-75			
	GRADO X60	60	75-78	ER70S	60	72 min

a. En uniones que involucren metales base de diferente grupo, pueden utilizarse los requerimientos de metal de aporte de bajo hidrógeno aplicables para el grupo de menor resistencia. El proceso de bajo hidrógeno debe estar sujeto a los requerimientos aplicables para el grupo de mayor resistencia.

b. Combinación API estándar 2B de acuerdo al acero utilizado

c. Cuando las soldaduras son relevadas de esfuerzos, el metal de aporte no deberá exceder de 0.05 % de Vanadio.

d. Electrodos de celulosa para soldadura de campo de tubería de conducción

e. El metal soldado deberá tener una resistencia de impacto mínima de 27.1 J a -18 °C cuando se requiera probetas para la prueba Charpy con muesca V.

Tabla 3.7 (b) Electrodo con los procesos en aplicaciones estructural y fabricación de recipientes a presión ^[18].

Combinación de Metales de Aporte Recomendados (con Esfuerzo de Cedencia Nominal de 80-90 Ksi Mínimo) de acuerdo al Metal Base						
Aceros			Metal de Aporte Correspondiente			
Especificación del Acero		Esfuerzo mínimo de Cedencia Ksi	Esfuerzo mínimo de Tensión Ksi	Especificación del electrodo	Esfuerzo de Cedencia Ksi	Esfuerzo de Tensión Ksi
ASTM A572	Grado 60	60	75 min	Proceso de Acero Eléctrico con Electrodo Revestido (ver AWS A5.1 o A5.5)		
	Grado 65	65	80 min			
ASTM A633	Grado E	55-60	75-100	E8015-X, E8016-X, E8018-X	67	80 min
ASTM A710	Grado A C2	60-65	72 min	E8010-G d	67	80 min
	51 mm y menores Grado A-C2 arriba de 51 mm	60-65	70 min	E9010-G d	70	90 min
ASTM A737	Grado B	50	70-90			
	Grado C	60	80-100	Proceso GMAW (ver AWS A5.18)		
API 5L	X-65	65	77-80 min	ER80S-X	68	80 min
	X-70	70	82 min			

a. En uniones que involucren metales base de diferente grupo, pueden utilizarse los requerimientos de metal de aporte de bajo hidrogeno aplicables para el grupo de menor resistencia. El proceso de bajo hidrogeno debe estar sujeto a los requerimientos aplicables para el grupo de mayor resistencia.

b. Combinación API estándar 2B de acuerdo al acero utilizado

c. Cuando las soldaduras son relevadas de esfuerzos, el metal de aporte no depositado no deberá exceder de 0.05 % de Vanadio.

d. Electrodo de celulosa para soldadura de campo de tubería de conducción

e. El metal soldado deberá tener una resistencia de impacto mínima de 27.1 J a -18 °C cuando se requiera probetas para la prueba Charpy con muesca V.

En los estudios realizados por Arístides y Barboza ^[23]; demostraron la susceptibilidad a la corrosión de dos tipos de juntas, empleando la soldadura manual con electrodo revestido, utilizando los electrodos AWS E7018 y AWS E6010. Se llevaron a cabo ensayos de corrosión de las juntas bajo las normas ASTM G1-72 y ASTM G5-78 donde se evaluó y analizó la influencia del contenido de inclusiones en el comportamiento a la corrosión de las juntas.

Los cordones de soldadura de oleoductos y gasoductos constituyen una de las zonas críticas más susceptibles donde podría iniciarse la corrosión, esto debido a la presencia de marcas, o defectos superficiales, inclusiones, heterogeneidades estructurales que lleva consigo la unión soldada. Cuando se encuentran presentes en los ductos; agua, ácido sulfhídrico, bióxido de carbono y alta presión de operación, tenemos el cuadro ideal para que se desarrolle el mecanismo de corrosión y agrietamiento por hidrógeno inducido.

Los materiales que fueron estudiados son el API 5L X52 como material base cuya composición química se muestra en la Tabla 3.8, y los materiales de aporte fueron el E7018 y E6010 en la cual en la Tabla 3.9 se describe la secuencia de cómo fue soldado el material de aporte.

Tabla 3.8 Composición química del acero y propiedades mecánicas ^[23].

Grado	%C	%Mn	%P	%S	Resistencia a la Tracción	Límite de Fluencia	Alargamiento
X52	0.3	1.2	0.04%	0.05%	50.6 Kg/mm ²	36.6 Kg/mm ²	43%

Tabla 3.9 Tipos de juntas experimentales y parámetros de soldadura utilizados en la elaboración de probetas ^[23].

Junta	1	2
Pase de Raíz (PR)	E-6010	E-7018
Pase Caliente (PC)	E-7018	E-7018
Pase relleno (PRE)	E-7018	E-7018
Pase de acabado (PA)	E-7018	E-7018
Electrodo	E-6010	E-7018
Diámetro (mm)	3.25	3.25
Voltaje (V)	25	25
Corriente (A)	115	150
Veloc. Avance (cm/min)	12.3	13.4
Calor aportado (KJ/cm)	14	16.8

Los resultados, de la caracterización y pruebas electroquímicas de las uniones se muestran en la Tabla 3.10 y 3.10.1 se observa que el material de aporte E-6010 tiene una velocidad de corrosión más alta que la del electrodo E-7018; esto se explica debido a que el electrodo E-6010 presentó una mayor densidad y tamaño de inclusiones no metálicas (Tabla 3.11), estas inclusiones son los centros activos para que se inicie la corrosión debido a su gran diferencia química con el acero formando micro celdas galvánicas de potencial electroquímico, y debido a la disolución química que presentan estas inclusiones en contacto con iones agresivos como los cloruros, iones de Fe⁺⁺^[2] ^[23].

Tabla 3.10 Resultado de las curvas de polarización ^[23].

AWS	E-6010	E-7018	API5LX-52
Velocidad Corrosión	2.33 gr/cm ² por año	1.76 gr/cm ² por año	2.44 gr/cm ² por año
Velocidad Penetración	0.3 mm/año	0.22 mm/año	0.31 mm/año

Tabla 3.10.1 Resultados de las curvas de polarización ^[23].

	JUNTA 1	JUNTA 2	API 5LX-52
Velocidad Corrosión	2.12 gr/cm ² por año	1.78 gr/cm ² por año	2.44 gr/cm ² por año
Velocidad Penetración	0.27 mm/año	0.23 mm/año	0.31 mm/año

Tabla 3.11 Características de las inclusiones en el AWS-E6010 y AWS-E7018 ^[23].

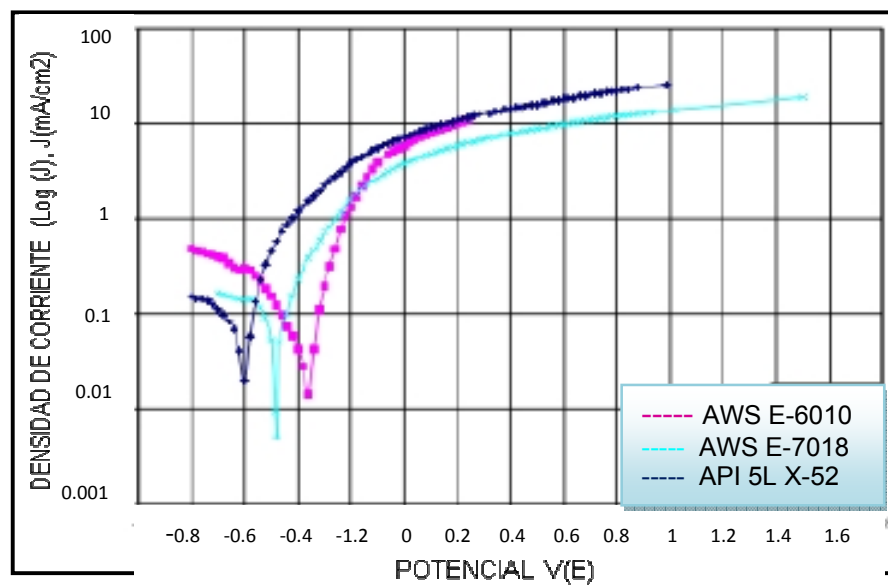
Electrodo	Inclusiones Tipo	Serie (Grosor)	Tamaño	Cantidad
E-6010	D (otros óxidos)	Serie gruesa	23	44
E-7018	D (otros óxidos)	Serie gruesa	21	21

Por otra parte, cuando las superficie de las juntas son ensayadas, tal como quedaron después de la soldadura, la junta 2 que se lleva en el paso de raíz, utilizando el electrodo E.7018 es la que presenta una mayor velocidad de corrosión como muestra la Tabla 3.12. a pesar que la junta 1 se lleva en el pase de raíz el electrodo E6010, la cual aporta mayor cantidad de inclusiones y escoria; por el contrario, la junta 2 tiene un problema de baja penetración en el paso de raíz, creando una cavidad susceptible a la formación de celdas de aereación diferencial, entre la cavidad y el material contiguo (material base) y que éstas se convierten en celdas activas, de aquí que cualquier ranura sea un lugar donde existe probabilidad de que se desarrolle la corrosión

Tabla 3.12 Resultados de las curvas de polarización ^[23].

	JUNTA1	JUNTA 2	API5L X-52
Velocidad Corrosión	0.77 gr/cm ² por año	0.97 gr/cm ² por año	1.2 gr/cm ² por año
Velocidad penetración	0.098 mm/año	0.12 mm/año	0.16 mm/año

En las siguientes gráficas (Figura 3.15, 3.16 y 3.17) se muestran las curvas de polarización del comportamiento a la susceptibilidad a la corrosión para los dos materiales de aporte y material base.

**Figura 3.15.** Curva de polarización para los valores de la Tabla 3.10 ^[23].

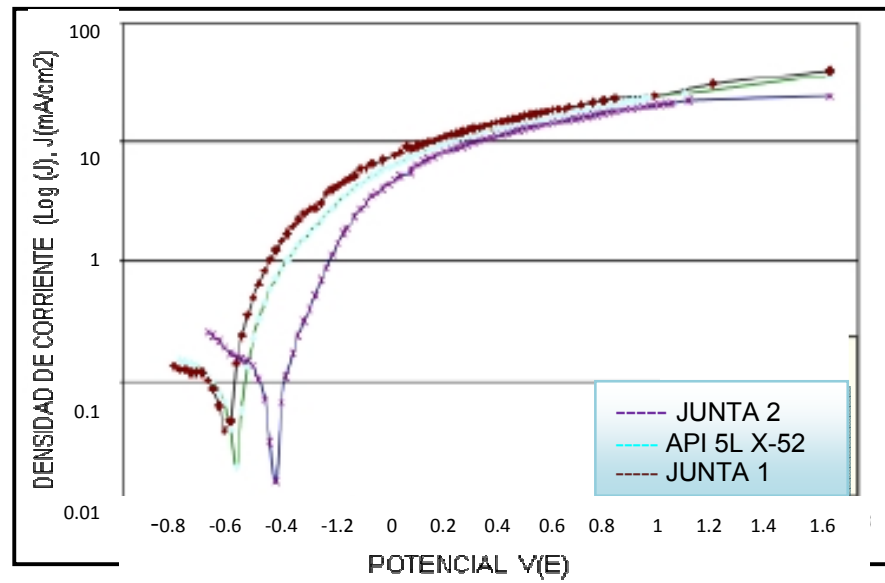


Figura 3.16. Curva de polarización para los valores de la Tabla 3.10.1 ^[23].

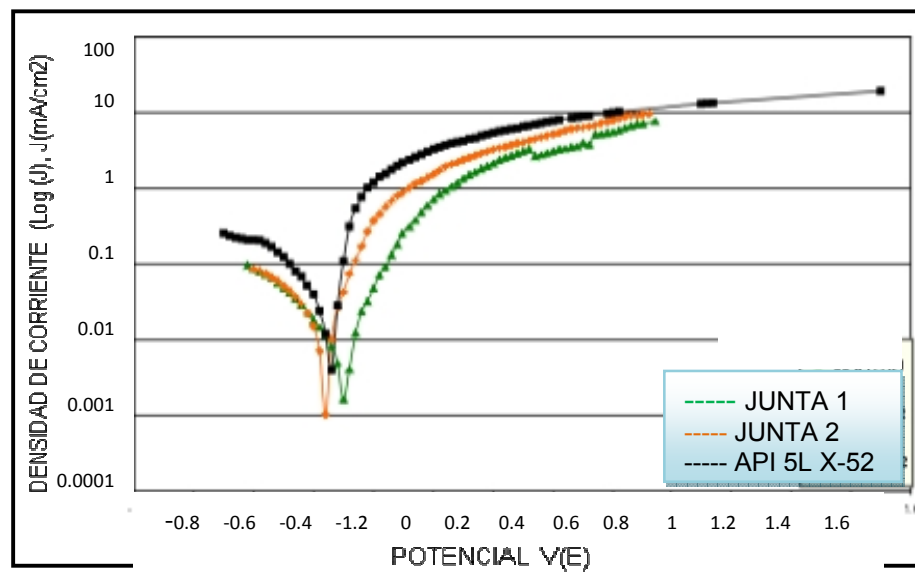


Figura 3.17. Curva de polarización para los valores de la Tabla 3.12 ^[23].

Como conclusiones y resultados se determinó que el electrodo E-7018 resultó ser más resistente a la corrosión que el electrodo E-6010, debido a que presentó una menor densidad y tamaño de inclusiones no metálicas. Estas imperfecciones son los centros activos para que se inicie la corrosión, debido a una gran diferencia en la composición química respecto al acero.

La junta 1, a pesar que se lleva en el pase de raíz el electrodo E-6010, presenta un mejor comportamiento sobre la resistencia a la corrosión como junta soldada, por tener una buena penetración y fusión de la soldadura y presentar una superficie más uniforme y a pesar que ésta presenta una mayor cantidad de inclusiones no metálicas que la junta 2, que lleva en todos sus pases el electrodo E 7018, la cual presenta baja penetración en el paso de raíz, creando un concentrador para la rápida iniciación de la corrosión.

3.3 Selección de materiales

El método más común para la prevención de la corrosión es la selección del metal o aleación apropiada para el servicio particular corrosivo. Desde el punto de vista técnico, una respuesta obvia a los problemas de la corrosión sería utilizar materiales más resistentes. En muchos casos, este acercamiento es una alternativa económica a otros métodos de control de la corrosión. La resistencia a la corrosión no es la única característica que se considera en la selección de los materiales sino que es de mayor importancia en las industrias químicas.

El proceso de selección de los materiales también es influenciado por el hecho de que los materiales están considerados para la construcción de un nuevo sistema, o para la modificación o las reparaciones en una instalación existente. Para la construcción del nuevo equipo, el procedimiento de selección debe comenzar cuanto antes y después de que concluya el diseño.

Existen criterios de aceptación para los diferentes tipos de acero empleados en servicios que requieren alta resistencia a la corrosión en presencia de medios ácidos donde estos estándares enfatizan la relación entre parámetros del medio, propiedades metalúrgicas del material y procesos de fabricación de equipos y componentes. Para algunos usos o servicios, las prácticas recomendadas han sido publicadas por el NACE^[38] (Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión) u otras sociedades.

La opción de un material es el resultado de varios compromisos. Por ejemplo, la valoración técnica de una aleación será generalmente un compromiso entre la resistencia a la corrosión y algunas otras características tales como resistencia y soldabilidad. Y la selección final será un compromiso entre la capacidad técnica y los factores económicos.

3.3.1 Tipos de materiales aplicados para componentes sometidos en ambientes corrosivos

3.3.2 Aceros al carbono

Aceros al carbono y aceros de baja aleación utilizada para aplicaciones estructurales en donde no son comúnmente utilizados en ambientes de corrosión severa. Sin embargo, se utilizan en condiciones de moderado servicio corrosivo como las instalaciones de refinería de petróleo y gas ácido/oleoductos.

En este punto, se definen requisitos adicionales para aceros al carbono empleados en operaciones petroleras que involucren la presencia de H₂S húmedo, con base en normas internacionales, requerimientos de usuarios de equipos (explotación y refinerías). Se enfatiza la relación entre parámetros del medio, propiedades metalúrgicas del material y procedimientos de fabricación de equipos y componentes. Cada uno de estos aspectos juega roles particulares en los mecanismos de degradación producidos por H₂S (corrosión

inducida por hidrógeno (HSSC), agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) y fisuración por hidrógeno orientada por tensión (SOHIC)^[25]. Una vez conocidas las variables del medio, y de sus interrelaciones, surgen diferentes niveles de agresión para cada uno de los mecanismos de degradación, con sus respectivas subdivisiones (cada una de a cuales requiere diferentes características metalúrgicas sobre el material). La variable que se ha empleado para evitar SSC es la dureza. En general, los aceros al carbono empleados en la industria petrolera son de baja dureza (inferior a 22 HRC), pero los ciclos térmicos durante los procesos de soldadura pueden inducir fases frágiles en la ZAC, susceptibles a la fisuración. Otro parámetro importante es la deformación en frío, la cual puede ser consecuencia de un endurecimiento por deformación o del montaje de los equipos. Si la misma es superior al 5% en la fibra externa, es mandatorio un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, luego del cual deberá controlarse que la dureza tenga un valor inferior a 200HBW.

La severidad respecto del agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) se divide en 2 categorías:

- HIC moderado
- HIC severo

En las cuales se requiere de un material específico, aceros de calidad Z y aceros resistentes al HIC, como se muestra en la Tabla 3.13

Tabla 3.13 Requisitos adicionales para placas^[25].

	HIC Moderado	HIC Severo	SOHIC
Condiciones del Medio	Medio que contiene todo lo que sigue: >50 ppmw de H ₂ S pH ₂ S <3 kPa Cl- <100 ppmw CN- < 20 ppmw NH ₄ + <2% de bisulfuro de amonio	Medio que verifica alguna de las siguientes condiciones: >2000 ppmw de H ₂ S y pH >7.8, >50 ppmw de H ₂ S y pH <5, >50 ppmw de H ₂ S y > 100 ppmw de Cl >50 ppmw de H ₂ S y >20 ppmw de CN- , >50 ppmw de H ₂ S y más de 2% de (NH ₄) ₂ HS, pH ₂ S >3kPa, pCO ₂ >600 kipá (pH <3.5) y trazas de H ₂ S Equipos con problemas significativos de HIC	Medio que contiene todo lo que sigue: • pH ₂ S ≥ 100 kPa (14.5 psia) • pH ₂ S + pCO ₂ ≥ 300 kPa (43.5 psia) • pH in situ ≤ 3.6
Material	Acero de Calidad Z	Acero resistente al HIC	Acero resistente al SOHIC
	ASTM A516 + EN 10164, Z35	ASTM A516, ASTM A841	ASTM A516, EN 10028-6
	EN 10028-3 + EN 10164, Z35	EN 10028-3, EN 10028-5	
Proceso de Acería	Acero calmado, refinación con bajo S y P, por ejemplo en horno eléctrico con escoriado doble en horno al oxígeno básico (BOF), refinación de cuchara y degasado al vacío	Desulfurización del metal fundido tratamiento en BOF degasado en vacío desulfurización hasta contenidos de S muy bajos tratamientos de limpieza de acero con procesos de agitación tratamiento con calcio/RE óptimas condiciones de colada con minimización de segregación y medidas especiales para garantizar la limpieza del acero	Idem Acero resistente al HIC, excepto tratamiento con calcio/RE
Composición química (requisitos adicionales)	C < 0.20%, S < 0.008%, P < 0.020%, CE < 0.43	C < 0.20% ; S < 0.002%; P < 0.007%; O < 0.0003% CE < 0.43 si C > 0.12% CE < 0.21 si C ≤ 0.12%	C < 0.20% S < 0.001% P < 0.007% O < 0.003% CE < 0.43 si C > 0.12% CE < 0.21 si C ≤ 0.12 %
0.2-0.3 % Cu	Recomendado si pH > 5	Recomendado si pH > 5	NO
Control de inclusiones	Recomendado (Ca/S=1-4)	Recomendado (Ca/S = 1-4)	NO
Tratamiento térmico	Normalizado	Normalizado o procesamiento termomecánico (TMCP)	Templado y Revenido

En la Tabla 3.13 se especifican las condiciones del medio que requieren medidas para evitar SOHIC y las características del material necesarias. Debe notarse que el medio que potencialmente produciría SOHIC es muy severo, razón por la cual en lugar de exigir requisitos tan rigurosos sobre los aceros al carbono, habría que plantearse la alternativa de emplear aleaciones más resistentes o recubrimientos (lo cual queda fuera del alcance del presente estudio). La severidad para SSC se define con la Figura 3.18, donde la variable principal que se ha

generado, para evitar SSC es la dureza. En general, los aceros al carbono empleados en la industria petrolera son de baja dureza (inferior a 22 HRC), pero los ciclos térmicos durante los procesos de soldadura pueden introducir fases frágiles en la ZAC, susceptibles a la fisuración.

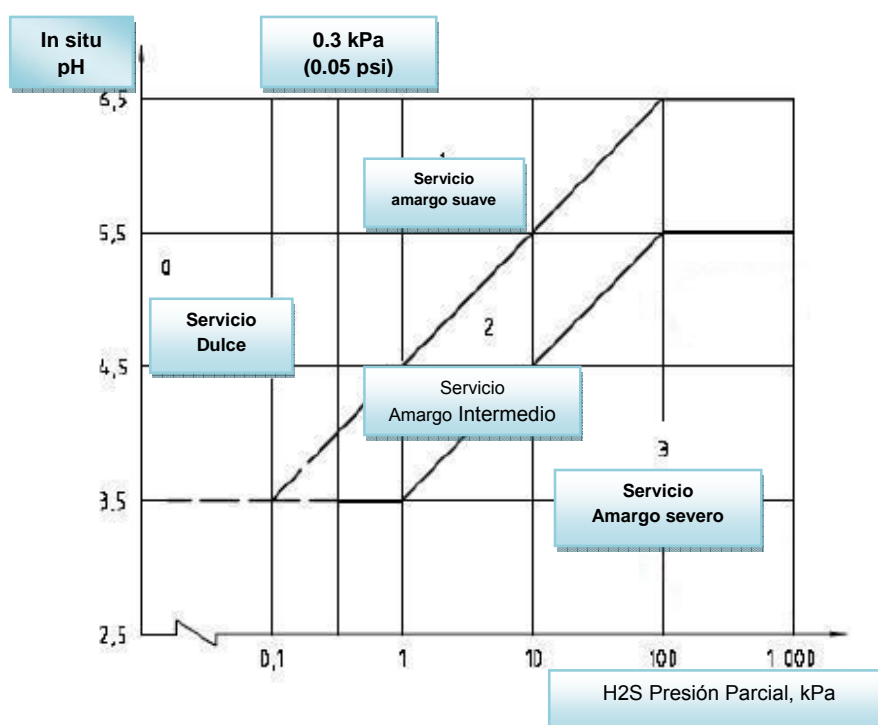


Figura 3.18 Regiones de severidad para SSC para aceros al carbono^[25].

Existen 3 regiones de severidad creciente que determinan los requisitos sobre las soldaduras, durante la calificación de los procedimientos. La principal ventaja de esta división en dominios de severidad es la relajación de requisitos de dureza en los dominios 1 y 2 para tuberías de línea, y en el dominio 3 para la superficie externa (que no está en contacto con el medio agresivo). Tradicionalmente, se usaba como requisito una dureza inferior a 22 HRC (248 HV10) para todos los casos.

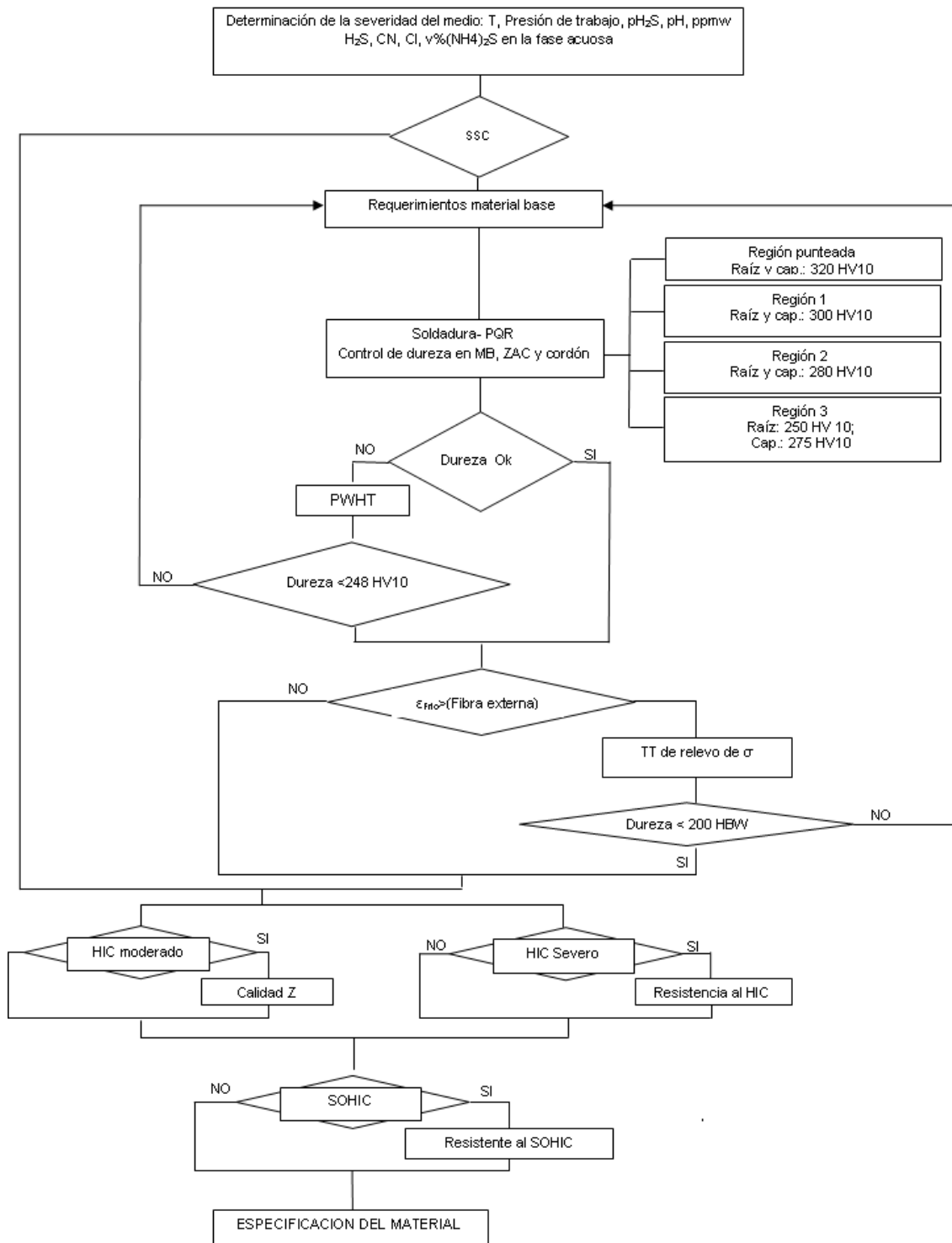


Figura 3.19. Diagrama de flujo para la especificación de requisitos para servicio ácido [25]

La industria petroquímica adoptan requisitos para el servicio de tuberías en hidrocarburos amargos, establecidos en la norma ISO 3183-3 para grados L360 hasta L450 (X-52 hasta X-65), con las adiciones y modificaciones que se indican los siguientes puntos en esta norma NRF-001^[26].

Tabla 3.14 Especificación para aceros al carbón para servicio de tubería en ambientes amargos^[26].

Fabricación del acero	Obtención mediante el proceso de horno eléctrico o básico al oxígeno (BOF). Acero calmado o desoxidado. Grano fino y con tratamiento de globulización de inclusiones no metálicas. Vaciado por colada continua.
Contenidos de Mn	Para tuberías de espesor mayor de 19.1 (0.750 pulg) en todos los grados y para el grado L459 (x65) en cualquier espesor, se puede incrementar el contenido de manganeso (Mn) hasta un máximo de 1.350 %, sin embargo, cada incremento de este elemento, se debe disminuir el contenido de azufre de acuerdo a la Tabla 18, manteniendo los límites establecidos de CE Para grados L415 y L450 (X60 y X65), se permite un incremento de Mn hasta 1.45 %, siempre y cuando el contenido de carbono sea de 0.05 % máximo.
Contenido de inclusiones	Únicamente son aceptables inclusiones no metálicas tipos A,B,C y D, con los niveles de severidad en el producto final, (Tabla 3.16)
Tamaño de grano	Tamaño de grano debe ser igual o más fino al número 9
Nivel de segregación	El nivel máximo de segregación después de efectuar el microataque, debe ser de 6 mm (0.236 pulg).
Proceso de Soldadura	La tubería puede ser con o sin costura; la costura puede ser fabricada con SAW y ERW de alta frecuencia.
Perfil de durezas	Perfil de dureza HV-5 o HV-10: Se debe efectuar en el metal base, soldadura y zona afectada por el calor (ZAC) y el valor máximo permitido, en cada punto indentado, debe ser 250 HV. En el metal base, no debe tener una variación mayor a 35 unidades HV entre los puntos de prueba.

Tabla 3.15 Contenido de manganeso y azufre ^[26].

Elemento	Porcentaje máximo (%)		
	Mn	1.2	1.3	1.35
S	0.004	0.003	0.002

Tabla 3.16 Tolerancia en el nivel de inclusiones ^[26].

Evaluación	Niveles de severidad en las inclusiones							
	TIPO A		TIPO B		TIPO C		TIPO D	
	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa	Fina	Gruesa
Individual	0.5	0	1	0	0.5	0	1.5	0.5

La susceptibilidad a SSC de la mayoría de los metales ferrosos se puede afectar fuertemente por el tratamiento térmico, el trabajo en frío, o ambos. A continuación se describe el tratamiento térmico para los materiales específicos que se han encontrado para proporcionar resistencia aceptable a corrosión.

- Laminación en caliente (aceros solamente)
- Recocido
- Normalizado y templado
- Normalizado, autenticado, templado

La Norma NACE MR-0175 ^[27] establece que para aceros al carbono y aceros de baja aleación son aceptables con una dureza máxima de 22 HRC con proporciones que contienen Níquel de 1%.

El metal debe estar tèrmicamente relajado donde despuès de la deformaciòn por el rolado en frio u algun otro proceso de fabricaciòn resulta una deformacion del 5 %. EL relevado de esfuerzos es de acuerdo con el còdigo

ASME sección VIII división 1, la temperatura mínima será de 595°C (1100 °F) el cual el componente tendrá una dureza máxima de 22 HRC. Donde la dureza y la resistencia de los aceros dependen grandemente del contenido de carbono y del tratamiento térmico.

En las piezas producidas por forja conforme a requisitos de ASTM 105 son aceptables siempre que la dureza no sea superior al máximo de 187 HB.

3.3.3 Aceros inoxidables

El acero inoxidable es el nombre genérico para una serie de más de 30 aleaciones diferentes conteniendo desde un 11.5 a un 30 % de cromo y de 0 a 22 % de níquel, junto con la adición de otros aleantes. El acero inoxidable tiene una amplia aplicación en la resistencia a la corrosión, pero debe recordarse que no resisten a todos los ambientes corrosivos. De hecho, bajo ciertas condiciones, tales como los medios que contienen cloro, los aceros inoxidables son menos resistentes que los aceros estructurales ordinarios.

Los mecanismos de corrosión más susceptibles en las aleaciones de acero inoxidable son: corrosión intergranular, agrietamiento por esfuerzos y ataque por picaduras. La norma NACE MR 0175^[27] especifica las características de la composición química de los aceros inoxidables, en condiciones de laminado y vaciado. En condiciones de recocido son aceptables con una dureza máxima de 22 HRC.

En el punto 3.5 la norma mencionada indica que los aceros inoxidables austeníticos (UNS S20910) son aceptables con una dureza máxima de 35 HRC en condiciones de rolado en caliente (trabajado y recocido).

Tabla 3.17 Aceros aceptables para la exposición directa a entornos de servicio amargo (véase el párrafo 1.3 de la NACE MR 0175)^[27].

Aceros aceptables para la exposición directa a entornos de Servicio Amargo (véase el párrafo 1.3) Materias que figuran en este cuadro deben ser utilizados sólo en condiciones de señalar en el texto de esta norma				
Ferrítico	Martensítico	Endurecido por Prerrecipitación	Austenítico	Dúplex (Austenítico/Ferrítico) (Sólo en condiciones de forjado)
AISI	AISI	ASTM	AISI	UNS S31260
405	410	A453 Gr 660 (A)	302	UNS S31803
430	501	A638 Gr 660 (A)	304	UNS S32404
			304I	UNS S32550
			305	UNS S32760
			308	UNS S39274
			309	UNS S39277
			310	
			316	
			316L	
			317	
			321	
			347	
ASTM	ASTM	UNS S17400	ASTM	CAST DÚPLEX (Acero Inoxidable Austenítico/Ferrítico)
A 268	A 217 Gr CA 15	UNS S45000	A 182	Z6 CNDU 28.08 M
TP 405, TP 430,	A 268 Gr TP 410	UNS S66286	A 193 (B)Gr B8R, B8RA, B8, B8M, B8MA	NF A 320-55 Norma Nacional Francesa
TP XM 27, TP XM 33	A 743 Gr CA 15M		A 194(B) Gr 8R, 8RA, 8A, 8MA	UNS J93380
	A 487 CI CA 15M		A 320(B) Gr B8, B8M	UNS J93404
	A 487 CI CA6NM		A 351 Gr CF3, CF8, CF3M, CF(M, CN7M©	
	UNS S42400		A 743 Gr CN7M(D)	
			A 744 Gr CN7M(D)	
			B 463	
			B 473	

A) Véase el apartado 3.8.2 de la NACE MR0175

B) Tratamiento de Carburos en solución

C) Modificado en el párrafo 3.5.4 de la NACE MR0175

D) Envejecimiento más de 260 ° C (500 ° F) puede reducir la dureza a baja temperatura y reducir la resistencia al agrietamiento del medio ambiente.

Las especificaciones para aceros inoxidable austeníticos aleación (UNS N08020) es aceptable con un recocido o condiciones de trabajado en frío en un nivel de dureza máxima de 32 HRC.

Para Vaciados del tipo CN7M fundido ASTM A 351¹⁶, A 743¹⁷, o A744¹⁸, no son aceptables para aplicaciones de perforación, los siguientes puntos mencionarán las condiciones del material para procesos de soldadura.

- (1) Proceso de recocido en solución en 1,121°C (2,050°F) y soldada con AWS E320LR o ER320LR.
- (2) La fundición debe ser producida por refinación en caliente de decarburización en argón-oxígeno (AOD) o refinación en caliente re-fundido AOD.
- (3) La composición CN7M listada en ASTM A 351, A 743 o A744 debe restringirse al 0.03% máximo de C, 1.0% máximo de silicio, de 3 a 3.5% de cobre, 0.015% máximo de azufre, 0.030% máximo de fósforo y 0.05% máximo de aluminio y
- (4) En un nivel de dureza máximo de 22 HRC.

En el punto 3.5.5 de la norma MR 0175 de la NACE el acero inoxidable austenítico en condiciones de forjado UNS S31254 es aceptable con un recocido o en estado de trabajado en frío a un nivel máximo de dureza de 35 HRC. Las especificaciones del material en recocido de solución y trabajado en frío del acero inoxidable austenítico UNS NO8367 es aceptable con dureza máxima de 35 HRC para su uso en ambientes ácidos, a cualquier temperatura hasta 150 °C (302 °F) la presión parcial del H₂S que no exceda de 310 kPa (45 psi).

Por otra parte, estudios realizados por Fiorotto et al. Paisani ^[32], en aceros inoxidables ferríticos; muestran que este tipo de aceros son los más económicos debido a su bajo contenido de Ni. Sin embargo, las ventajas económicas que se derivan de ello no se pueden aprovechar del todo en estas aleaciones, debidas principalmente a los problemas tecnológicos asociados a la elevada tendencia de precipitación de fases secundaria (dificultad de elaborar productos de gran espesor y problemas de soldabilidad).

Por otra parte, debido a su buena resistencia a la corrosión bajo esfuerzo (SCC), a la corrosión por picaduras y por resquicios, en medios conteniendo cloruros, pueden ser seleccionados en determinadas aplicaciones, como alternativa a los aceros inoxidable austenítico. Los aceros inoxidable ferríticos son magnéticos y no endurecibles por tratamiento térmico, tienen una buena ductilidad y son resistentes a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas.

Los aceros inoxidable austenítico al Cromo-Níquel tienen un contenido de Carbono entre 0,03% a 0,25%; mientras que el contenido de Cromo se encuentra entre 17% a 26% y el del Níquel entre 7% a 22%. Los aceros inoxidable austenítico tienen una excelente resistencia a la corrosión, muy buena conformabilidad y en términos generales son fácilmente soldables (mejor que los ferríticos). Tienen una excelente ductilidad y tenacidad que los hace especialmente aptos para aplicaciones en temperaturas subcero. Contienen elementos como Mo, Ti, Nb, Cu, que le confieren resistencia a formas particulares de corrosión por picaduras.

Los aceros Inoxidables martensíticos con contenidos de carbono (entre 0.15% y 1% C), mientras que el contenido de Cr suele oscilar entre el 12% y 18%. La resistencia a la corrosión de este tipo de aceros inoxidable está asociada al contenido de Cr y a su microestructura. Las aleaciones de mayor contenido de C exhiben una menor resistencia a la corrosión en condición de temple y revenido, debido a la mayor susceptibilidad a la precipitación de carburos de cromo que presentan estos materiales.

En términos generales se pueden decir que los aceros inoxidable martensíticos presentan una menor resistencia a la corrosión que las demás familias de aceros inoxidable, pero tienen una resistencia mecánica elevada [32].

Los aceros más destacados son:

Grado L: significa que es un acero inoxidable con un nivel de carbono inferior al 0.03%. Estos grados se utilizan, cuando se requiere soldadura para fabricar el componente que debe resistir a la corrosión, puesto que un porcentaje mayor de carbono podría traer inconvenientes de precipitación de carburos de cromo a las altas temperaturas de soldadura, lo cual favorece la corrosión intergranular.

Grado N: significa que es un acero inoxidable al cual se le ha incrementado su resistencia mecánica y su resistencia a la corrosión por picado por adición de nitrógeno, que endurece por solución sólida en los grados austenítico. El nitrógeno, además, retarda las fases fragilizantes como la fase sigma. En los grados ferríticos es tan perjudicial como el carbono.

Estos grados se utilizan, por ejemplo cuando se requiere una resistencia mecánica considerable pero no se puede endurecer por adición de carbono por el peligro de la precipitación de carburos de cromo a altas temperaturas ^[32].

3.3.4 Materiales de aporte para aceros al carbono e inoxidables

La selección adecuada de los materiales de aporte para soldar garantiza al usuario el cumplimiento de las más altas exigencias en materia de calidad. Los materiales de aporte que se describen aquí, tienen un amplio campo de aplicación y presentan una resistencia a la corrosión considerable. En algunos casos es necesario utilizar el diagrama de Shaeffler, éste se utiliza principalmente para predecir la estructura residual del metal, obtenido por soldadura en la unión de aceros inoxidables con aceros al carbono con o sin aleación.

Por otra parte la AWS (Sociedad Americana de Soldadura) y ASME (Sociedad Americana de ingenieros Mecánicos), respectivamente, dictan normas de clasificación de electrodos específicamente para este tema como lo son; A.W.S A 5.1-91 especificación de electrodos para aceros al carbono y; A 5.4-92 especificación de electrodos para aceros inoxidable las dos clasificaciones para el proceso SMAW.

En los electrodos de acero aleado las 4 ò 5 cifras de la clasificación van seguidas generalmente de una letra símbolo como: A1, B1, B2, etc. Estos subfijos estandar de la A.W.S son añadidos para indicar adiciones específicas de elementos de aleación. Por ejemplo, un electrodo revestido para soldadura de arco que tenga una clasificación E701 5-A1, es un bajo hidrógeno para todas las posiciones, corriente directa polaridad invertida electrodo con un contenido de molibdeno entre 0.40 a 0.65% (promedio 0.50%).

Tabla 3.18 Materiales de aporte para aceros al carbono para componentes expuestos para ambiente corrosivo ^[22].

Composición Química Requerida de Metal de Aporte											
Cosificación AWS	Numero UNS ^a	Porcentaje en Peso ^b									Limite Combinado para Mn+Ni+Cr+Mo+V
		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	
E6010	W06010	No Especificado									
E6011	W06011										
E6012	W06012										
E6013	W06013										
E6019	W06019										
E6020	W06020										
E6022	W06022										
E6027	W06027										
E7016	W07016	No Especificado	1.6	0.75	No Especificado	0.3	0.2	0.3	0.08	1.75	
E7018	W07018										
E7027	W07027										
E7014	W07014	No Especificado	1.25	0.9	No Especificado	0.3	0.2	0.3	0.08	1.5	
E7015	W07015										
E7024	W07024										
E7028	W07028	No Especificado	1.6	0.9	No Especificado	0.3	0.2	0.3	0.08	1.75	
E7048	W07048										
E7018M	W07018	0.12	0.40 a 1.60	0.8	0.03	0.02	0.25	0.15	0.35	0.05	No Especificado

Nota:

a. SAE/ASTM Sistema de Numeración Unificado para Metales y Aleaciones.

b. Los valores individuales son máximos

Tabla 3.19 Materiales de aporte para aceros Inoxidables para componentes expuestos para ambiente corrosivo [22].

Composición química requisitos para diluir soldadura de metales												
Casificación ^c AWS	Numero ^d UNS	Porcentaje en Peso ^{a,b}										
		C	Cr	Ni	Mo	Cb(Nb)	Mn	Si	P	S	N	Cu
E209-XX ^e	W32210	0.06	20.5 - 24.0	9.5 - 12.0	1.5 - 3.0	—	4.0 - 7.0	0.9	0.04	0.03	0.10 - 0.30	0.75
E219-XX	W32310	0.06	19.0 - 21.5	5.5 - 7.0	0.75	—	8.0 - 10.0	1.00	0.04	0.03	0.10 - 0.31	0.75
E240-XX	W32410	0.06	17.0 - 19.0	4.0 - 6.0	0.75	—	10.5 - 13.5	1.00	0.04	0.03	0.10 - 0.32	0.75
E307-XX	W30710	0.04 - 0.14	18.0 - 21.5	9.0 - 10.7	0.5 - 1.5	—	3.30 - 4.75	1.00	0.04	0.03	—	0.75
E308-XX	W30810	0.08	18.0 - 21.0	9.0 - 11.0	0.75	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E308H-XX	W30810	0.04 - 0.08	18.0 - 21.0	9.0 - 11.0	0.75	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E308L-XX	W30813	0.04	18.0 - 21.0	9.0 - 11.0	0.75	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E308Mo-XX	W30820	0.08	18.0 - 21.0	9.0 - 12.0	2.0 - 3.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
308MoL-XX	W30823	0.04	18.0 - 21.0	9.0 - 12.0	2.0 - 3.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E309-XX	W30910	0.15	22.0 - 25.0	12.0 - 14.0	0.75	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E309L-XX	W30913	0.04	22.0 - 25.0	12.0 - 14.0	0.75	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E309Cb-XX	W30917	0.12	22.0 - 25.0	12.0 - 14.0	0.75	0.70 - 1.00	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E309Mo-XX	W30920	0.12	22.0 - 25.0	12.0 - 14.0	2.0 - 3.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E309MoL-XX	W30923	0.04	22.0 - 25.0	12.0 - 14.0	2.0 - 3.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E310-XX	W31010	0.08 - 0.20	25.0 - 28.0	20.0 - 22.5	0.75	—	1.0 - 2.5	0.75	0.03	0.03	—	0.75
E310H-XX	W31015	0.35 - 0.45	25.0 - 28.0	20.0 - 22.5	0.75	—	1.0 - 2.5	0.75	0.03	0.03	—	0.75
E310Cb-XX	W31017	0.12	25.0 - 28.0	20.0 - 22.5	0.75	0.70 - 1.00	1.0 - 2.5	0.75	0.03	0.03	—	0.75
E310Mo-XX	W31020	0.12	25.0 - 28.0	20.0 - 22.5	2.0 - 3.0	—	1.0 - 2.5	0.75	0.03	0.03	—	0.75
E312-XX	W31310	0.15	28.0 - 32.0	8.0 - 10.5	0.75	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E316-XX	W31610	0.08	17.0 - 20.0	11.0 - 14.0	2.0 - 3.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E316H-XX	W31610	0.04 - 0.08	17.0 - 20.0	11.0 - 14.0	2.0 - 3.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E316L-XX	W31613	0.04	17.0 - 20.0	11.0 - 14.0	2.0 - 3.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E317-XX	W31710	0.08	18.0 - 21.0	12.0 - 14.0	3.0 - 4.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E317L-XX	W31713	0.04	18.0 - 21.0	12.0 - 14.0	3.0 - 4.0	—	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E318-XX	W31910	0.08	17.0 - 20.0	11.0 - 14.0	2.0 - 3.0	6 x C, min to 1.00 max	0.5 - 2.5	0.9	0.04	0.03	—	0.75
E320-XX	W88021	0.07	19.0 - 21.0	32.0 - 36.0	2.0 - 3.0	8 x C, min to 1.00 max	0.5 - 2.5	0.6	0.04	0.03	—	3.0 - 4.0

3.4 Corrosión en presencia de ambientes ácidos y alcalinos

La naturaleza y la agresividad del ambiente determinan la extensión del grado de corrosión de los metales. Usualmente el metal con menos resistencia al ambiente dado, llega a ser la parte anódica. Los efectos de la corrosión sobre instalaciones y equipos industriales producen anualmente pérdidas que llegan a cifras muy considerables.

De todas las fallas que ocurren en las operaciones de la industria del gas y del petróleo la más importante es la corrosión con el 33% de los casos como puede verse en la Figura 3.20^[35].

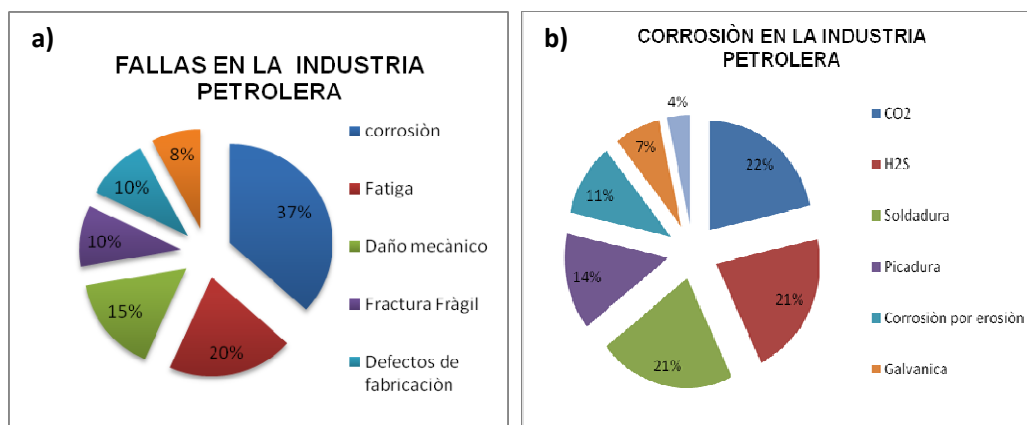


Figura 3.20. a) Fallas en la industria Petrolera, b) Corrosión en la industria petrolera ^[35].

El CO₂ y el H₂S son las especies corrosivas más importantes y contra las cuales es necesario actuar utilizando revestimientos resistentes al daño de esas especies, a la temperatura, presión y también guardar resistencia a la abrasión y al impacto que en una medida u otra están involucrados en la utilización de tuberías y equipos.

El CO_2 y el H_2S son especies químicas que están en equilibrio con las tres fases petróleo, agua y gas por lo que las cantidades de CO_2 y H_2S en cada fase están relacionadas pero con concentraciones diferentes dadas por las solubilidades correspondientes a cada fase.

El hidrógeno puede hacer frágil a los metales, de forma tal que se pueden producir fisuras y fracturas a muy bajos esfuerzos. Pueden suscitarse diferentes mecanismos de falla vinculados con la presencia de hidrógeno, como ser “agrietamiento inducida por hidrógeno (*HIC*), corrosión bajo esfuerzos *inducida por hidrógeno (HSCC)*, agrietamiento inducido por hidrógeno orientada por esfuerzos (*SOHIC*) entre otros. Algunos elementos químicos pueden actuar tales como promotores en estos procesos, como S, P, As, siendo de especial importancia el H_2S , que incrementa fuertemente la velocidad de adsorción y absorción del hidrógeno.

Gradientes de concentraciones, tensiones, temperatura y potencial constituyen las fuerzas que impulsan este proceso de difusión, el cual necesita de un “tiempo de incubación” para que el hidrógeno difunda en la estructura del metal. La microestructura juega un rol muy importante. Diferentes estructuras ofrecen diferentes “agujeros”; la forma y la dimensión de estos lugares libres es muy importante en el proceso de difusión. Por ejemplo, los aceros austeníticos son usualmente resistentes a este tipo de daño, debido a que el hidrógeno tiene un coeficiente de difusión muy bajo en su estructura cúbica centrada en la cara (*face-centered cubic, f.c.c.*) y su mayor solubilidad.

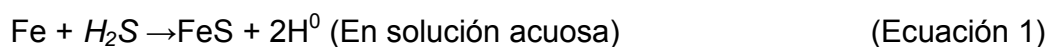
Las discontinuidades internas ofrecen lugares libres adicionales y actúan como “trampas de hidrógeno”. El hidrógeno atómico acumulado en estas discontinuidades se recombina y puede ocasionar presiones muy altas de hidrógeno molecular ^[28].

3.4.1 Corrosión bajo esfuerzos inducida por hidrógeno HSSC

La corrosión bajo esfuerzos se refiere al agrietamiento causado por la presencia simultánea de esfuerzos de tensión y un medio corrosivo específico. Muchos investigadores han clasificado todas las fallas de agrietamiento que ocurren en medios corrosivos como corrosión bajo esfuerzos, incluyendo aquellas debido a la fragilización por hidrógeno. Este fenómeno de agrietamiento tiene serias consecuencias ya que ocurre al nivel de esfuerzos de diseño.

Chan y Jellison ^[37], describen el mecanismo SSC (fractura por esfuerzos debida a sulfhídrico) donde es un mecanismo de corrosión que se caracteriza por exposición al H₂S. Afecta al material y lo hace fallar por medio de una combinación de corrosión y esfuerzos de tensión (residuales o aplicados) en presencia de agua y H₂S. La falla se manifiesta en forma de fractura por esfuerzos debido al hidrógeno. El ácido sulfhídrico se combina con el hierro y produce una reacción química que da como productos sulfuros de hierro e iones de hidrógeno como lo muestra la ecuación 1. Los iones de hidrógeno se recombinan produciendo gas hidrógeno (ecuación 2).

El material se vuelve frágil al absorber el hidrógeno iónico que se incrementa con la presencia de sulfatos. Esta difusión reduce la ductilidad del material y aumenta la susceptibilidad a la fractura. Los materiales con durezas altas son más susceptibles al SSC.



H⁰ Penetra en el metal soldado



Es por eso que las soldaduras pueden ser susceptibles al SCC bajo condiciones ambientales específicas. Para que este agrietamiento suceda se requiere la combinación apropiada de medios corrosivos, microestructurales, y de esfuerzos de tensión.

Frecuentemente las soldaduras están sometidas a cargas de tensión (debido a los esfuerzos residuales) a un nivel que se acerca al esfuerzo producido en el metal base. Una soldadura, con varias características microestructurales heterogéneas, es candidato al daño por SCC. Las grietas de corrosión por tensión tienen una extremidad anódica en la grieta y salen a menudo de productos de corrosión evidentes a lo largo de la fractura. El agrietamiento es característico por la ramificación y tiene un tiempo de retardo antes de la iniciación de la grieta. El aumento del contenido de la ferrita en metal de soldadura de acero inoxidable reduce la susceptibilidad del SCC. El 50 % volumen de la ferrita aproximadamente brindan una resistencia óptima del SCC.

Los parámetros de la soldadura tienen influencia en la cantidad y la distribución de los esfuerzos residuales, esto se debe al grado de la región tensionada y la cantidad de distorsión son directamente proporcionales al tamaño del depósito de la soldadura; este depósito se relaciona directamente con el calor de entrada. La experiencia térmica de la soldadura a menudo es muy localizada, dando por resultado los esfuerzos que pueden causar las distorsiones.

Los esfuerzos residuales son importantes en la iniciación y la propagación de grietas. El uso de pequeños depósitos de soldadura reduce la tensión y así la susceptibilidad de agrietarse debido al medio ambiente. Se sabe que el tratamiento térmico de postsoldadura puede reducir el SCC redistribuyendo la carga localizada y reduciendo la magnitud de los esfuerzos residuales de tensión disponible para inducir a la corrosión por agrietamiento. En estudios realizados sobre aceros inoxidables austeníticos, los tratamientos térmicos postsolidificación también fueron demostrados para modificar los gradientes locales de composición, alterando la microestructura solidificada y aumentando la susceptibilidad al SCC [12].

La morfología de las grietas ^[34], tienen una apariencia de una fractura mecánica frágil. Se observa agrietamiento tanto inter como transgranular. El agrietamiento inter y transgranular pueden ocurrir en una misma aleación dependiendo del ambiente y de la estructura del metal. El agrietamiento generalmente crece en dirección perpendicular a los esfuerzos aplicados, (ver Figura 3.21).

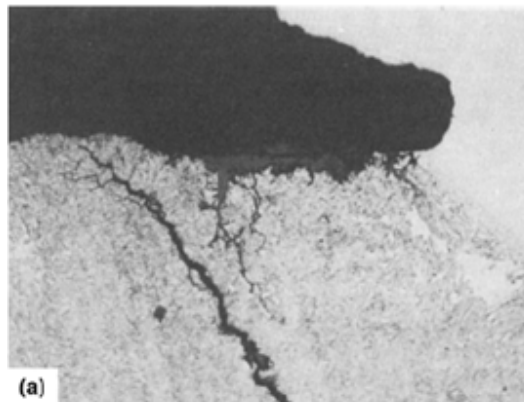


Figura 3.21. Grietas en las zonas afectadas por el calor (HAZ) debajo de la soldadura de un acero inoxidable tipo 410 soldado con un material de aporte ER308. a) Sección a través de la ZAC mostrando el mecanismo de corrosión SSC ^[34].

El agrietamiento bajo esfuerzos por sulfuro se ve afectada por factores que incluyen los siguientes puntos:

- Composición química del material, resistencia, tratamiento térmico y microestructura.
- Concentración del ion Hidrógeno (pH) del medio ambiente.
- La concentración de H₂S y la presión total.
- Esfuerzos de tensión total
- Temperatura y tiempo

El hidrógeno monoatómico puede difundir y concentrarse en los sitios de las discontinuidades microestructural, como fase, precipitación o límites de granos, dislocaciones y sitios de grandes esfuerzos y / o distorsión de la red (tensión), donde puede interferir con la ductilidad del material, como se indica en la NACE MR-0175 [27].

La acumulación de hidrógeno atómico en la red local del metal distorsionado es el resultado directo de la dilatación de la red, que es más capaz de dar cabida a la presencia del hidrógeno intersticial. A concentraciones suficientemente altas en estado sólido, el hidrógeno atómico también puede afectar a la unión entre los átomos para promover descohesión, especialmente a lo largo de las fronteras de grano y otras zonas donde la red ya ha sido distorsionada con el esfuerzo, el trabajo en frío o endurecimiento. Los átomos de hidrógeno permanecen disueltos en el acero, son móviles y, bajo la influencia de tensiones, producen fractura frágil en aceros susceptibles o en regiones de alta dureza. Para que se produzca SSC se requieren tres elementos:

- Cantidad suficiente de H^0 en el metal
- Material susceptible,
- Tensiones (aplicadas o residuales)

En ausencia de uno de estos elementos no ocurrirá SSC. La resistencia a SSC es el factor principal que afecta la selección de materiales para servicios con H_2S dado que puede conducir a una falla catastrófica [25]. El SSC se asocia normalmente con aceros de alta resistencia y aleaciones de límite elástico superior a 550 MPa (80 Ksi) y con alta dureza (>22 HRC) en la ZAC de soldadura de estructuras. Soldaduras que no tienen PWHT son particularmente problemáticas, porque a menudo tienen alta dureza en el HAZ y por lo tanto alta tensión residual que pueden iniciar y promover el SSC [12].

La corrosión bajo tensiones inducida por hidrógeno HSCC, se produce casi exclusivamente en aceros ferríticos y martensíticos no aleados y de baja aleación. Otras condiciones necesarias son la presencia de hidrógeno atómico y tensiones mecánicas. En este caso las fisuras resultan de la reducción de las fuerzas coercitivas del material y están orientadas de acuerdo con las tensiones principales ^[28].

La variable principal que se ha empleado para evitar SSC es la dureza. En general, los aceros al carbono empleados en la industria petrolera son de baja dureza (inferior a 22 HRC), pero los ciclos térmicos durante los procesos de soldadura pueden introducir fases frágiles en la ZAC, susceptibles a la fisuración. NACE/ISO ^[25] considera cuatro regiones de operación ácida para aceros al carbono (C) y de baja aleación en la Figura 3.22 se muestra que existen 3 regiones de severidad creciente que determinan los requisitos sobre los materiales, estas regiones de severidad se determinan por medio de la presión parcial de H₂S y el nivel de pH, la cual va de menor en la región de la Figura 3.15 o hasta la más severa en la región 3. La principal ventaja de esta división en dominios de severidad es la relajación de requisitos de dureza en los dominios 1 y 2 para *tuberías de línea*, y en el dominio 3 para la superficie externa (que no está en contacto con el medio agresivo) ^[25].



Figura 3.22. Regiones de severidad para SSC para aceros al carbono.^[27]

En la gráfica se observa que a concentraciones en gas del 1% y 60 bar en pozo, la presión parcial de 0.6 bar puede significar régimen de transición o servicio amargo, dependiendo del pH que también estará influido por la concentración de CO_3Ca . Finalmente, debemos recordar que el efecto del H_2S sobre acero al carbono de baja aleación depende del nivel de tensión de fluencia del acero en cuestión.

Por encima de los 90.00 psi de esfuerzo a la cedencia el efecto será el de SSC (sulphide stress cracking), es decir, el H atómico que penetra en la red cristalina del acero genera fragilización y puede llevar a fracturas catastróficas como la que se daría, por ejemplo, en un P100 en un medio con una presión parcial de H_2S de 0.6 bar y un pH menor a 4.5 puesto en tensión por la carga de la tubería misma. A tensiones de fluencia menores los problemas estarán más ligados al HIC que se relaciona con el tamaño y forma de las inclusiones no metálicas en el acero. La Figura 3.22 en este documento, representa las diferentes regiones de operación SSC. A continuación se describen las regiones:

Región 1 – Se pueden utilizar materiales aptos para las regiones 2 y 3 en esta región. Los aceros de la serie 4100 pueden ser utilizados en esta región siempre y cuando sean tratados térmicamente por los procesos de austenizado, templado y revenido y que tengan una dureza no mayor a los 30 HRC, una fluencia de material que no exceda los 130,000 psi (896.3 MPa) y un valor mínimo a la cedencia SMYS (especifica el límite elástico mínimo) de 110,000 psi (758.4 MPa).

Región 2 – Materiales aptos para la región 3 pueden ser utilizados en esta región. Los aceros de la serie 4100 pueden ser utilizados siempre y cuando no excedan una dureza de 27 HRC, una fluencia de material actual de 110,000 psi (758.4 MPa), y un SMYS de 80,000 psi (551.6). Si los materiales no satisfacen los requerimientos operacionales para la región 3, la resistencia al SSC deberá ser demostrada (por medio de pruebas NACE).

Región 3 – Aceros austenizados, T y R, al carbono, y de baja aleación con un máximo de dureza de 22 HRC son permitidos. Los aceros de la serie 4100 pueden ser utilizados siempre y cuando no excedan una dureza de 30 HRC, una fluencia máxima de material de 110,000 psi (758.4) con una máxima resistencia de tensión no mayor de 15,000 psi (103.4 MPa) del SMYS. La resistencia del material al SSC deberá ser demostrada (por medio de pruebas NACE). Los valores máximos de dureza permitido son de 26 HRC.

La resistencia a la corrosión se obtiene al reducir los elementos nocivos como lo son el Azufre (S) y el Fósforo (P) e incrementar los niveles de Cromo (Cr) y Molibdeno (Mo). Además, se requiere de procesos de tratamiento térmico más avanzados. La alta dureza y la resistencia al SSC son propiedades altamente deseadas para herramientas de fondo, de manera que las fallas debido al SSC se reduzcan. Estas son dos propiedades opuestas en el espectro, lo que significa que cuando se obtiene una se pierde la otra.

La única manera de obtener ambas propiedades es la de modificar los elementos de la aleación en el material y al mismo tiempo cerrar y mejorar los parámetros de tratamiento térmico. Esto no solamente ayudará a incrementar la dureza del material, sino también incrementará la resistencia al SCC sin reducir las demás propiedades mecánicas ^[33].

El modo más eficaz de prevenir la SCC es:

- 1) El diseño correcto con los materiales adecuados,
- 2) Reducir las tensiones,
- 3) Remoción crítica del medio ambiente de especies tales como los hidróxidos, cloruros, y el oxígeno,
- 4) Evitar el estancamiento de las zonas y las grietas en los intercambiadores de calor, cuando el cloruro e hidróxido podrían llegar a ser concentrados. Los aceros de baja aleación son menos susceptibles que los aceros de alta aleación, pero están sujetos a SCC en el agua que contiene iones cloruro, como lo indica NACE INTERNATIONAL ^[15].

En estudios realizados en ASTM ^[34] análisis de fallas y prevención demuestran que la soldadura es también una de las fuentes más frecuentes por esfuerzos residuales. La contracción de metal de soldadura durante el enfriamiento y la restricción impuesta por el material adyacente y accesorios de soldadura es una fuente de esfuerzos residuales y una condición posible para las fallas por SCC. Un análisis de falla publicado en el ASTM ^[34], describe una falla por SCC en una tubería de acero inoxidable causada por tensiones residuales de soldadura. La falla se provocó en un tubo de acero inoxidable tipo 304 con un espesor de pared de 0.432", este tubo había servido como una línea de circuito primario de un reactor de agua a presión, se encontró que contenía varias grietas circunferenciales de 50 a 100 mm (2 a 4 pulgadas) de longitud. Dos de esas grietas habían penetrado en la pared del tubo, y fueron responsables de las fugas detectadas en una prueba hidrostática durante una inspección general a los 7 años de servicio. La Investigación general incluye inspección visual a detalle de

todas las soldaduras de tuberías y por la técnica de ultrasonido. Tras el descubrimiento de las dos fugas, toda la línea de tubería con 150 mm (6 pulgadas), que contenía 16 soldaduras, se registraron. Se encontraron 5 defectos adicionales situados en la ZAC adyacentes a las soldaduras. Las muestras de los 150 mm (6") de tuberías fueron sometidas a tres laboratorios para el examen independiente.

La inspección de los tres laboratorios revelaron grietas intergranular que se habían originado en la superficie interior de la tubería y que eran típicos de agrietamiento por corrosión. Algunas grietas habían llegado a una profundidad de dos tercios del espesor de la pared. En general, las grietas fueron 50 a 100 mm (2 a 4 pulgadas) de largo. La ramificación de las grietas que se extienden a los depósitos de la soldadura se detiene. La inspección de los ZAC presentaron precipitados de carburo en los límites de grano, que revelan la sensibilización de la soldadura del acero inoxidable tipo 304 en las áreas locales. Grietas adicionales, también intergranular y circunferencial, y que se originan en la superficie interna de la tubería, se descubrieron en los lugares alejados de las soldaduras. Estas grietas, penetraron a una profundidad de sólo un sexto de espesor de pared a través de una solución de estructura de recocido, con evidencia de un trabajo en frío. El análisis de la tubería demostró que la composición química es normal para el tipo de acero inoxidable 304. La especificación del material por parte del manufacturado es ASME SA-376, grado TP304. Todos los análisis indicaron que la tubería suministrada corresponde a una calidad aceptable.

Se llevaron a cabo ensayos de corrosión en un grupo de muestras de 150 mm de acero inoxidable tipo 304 que fueron soldadas entre sí usando material de aporte de acero inoxidable tipo 308. Se utilizaron dos procedimientos de soldadura uno que consta de tres pasos con alto calor de entrada y el otro que consta de diez pasos con un bajo calor de entrada. Las muestras soldadas fueron expuestas al agua que contenía 100 ppm de oxígeno disuelto a 285°C y a 7 MPa (1000 psi).

Posteriormente se detectó que en las muestras soldadas, con alto calor de entrada, se promueven la precipitación de carburos y los esfuerzos residuales, y agrietamientos después de 168 horas de exposición, mientras que la muestra de bajo calor de entrada se encuentra libre de grietas. Los resultados expuestos fueron considerados importantes ya que indicaron que la tubería hendida había sido soldada con una entrada de calor alta con un pequeño número de pasos y que las tuberías de mayor diámetro (en el circuito primario), que no presentaron grietas en servicio, habían sido soldadas con bajo calor de entrada y con pasos múltiples^[34].

Como conclusiones en este análisis de fallas^[34] se obtuvo que el SSC intergranular de los 150 mm (6 pulg) de la tubería de acero inoxidable tipo 304 expuesto a altas temperaturas, alta presión, y expuesto en agua de alta pureza que tenía 7 años de servicio de un intercambiador de calor se cree que pudo haber sido causado por:

Esfuerzos: El procedimiento de soldadura en donde involucra alto calor de entrada sin duda, genera inaceptablemente altos niveles de esfuerzos residuales en la ZAC. El trabajado en frío de la superficie de un material también crea tensiones residuales. Ambas condiciones sensibilizan el material disminuyendo su resistencia al SCC.

Sensibilización: La soldadura con alto calor de entrada causó la precipitación de carburos de cromo en las fronteras del grano en la ZAC. Ello hizo que el acero se sensibilice al ataque intergranular que, junto con la tensión residual, ofrecen un escenario completamente normal para la corrosión bajo esfuerzos (SSC).

Medio ambiente: Aunque el nivel de oxígeno disuelto en el agua era muy bajo, se consideró que posiblemente una exposición prolongada de oxígeno, con un rango de 0.2 a 1.0 ppm, podría haber concentración de iones.

Las medidas correctivas que proponen para su aplicación son:

Todas las tuberías se han instalado mediante bajo calor de entrada, con un procedimiento de varios pases de soldadura. Cuando la corrosión bajo tensión es identificada como el mecanismo de fallas, la acción correctiva apropiada puede ser una reducción en las tensiones residuales (o concentración de tensiones) o una alteración del medio ambiente.

3.4.2 Agrietamiento Inducido por Hidrógeno (HIC)

Fisuración Inducida por Hidrógeno (*HIC*) se refiere a la acumulación de hidrógeno atómico disuelto en segregaciones, dislocaciones, bordes de grano y de fases, inclusiones no metálicas, poros, ubicaciones sometidas a deformaciones plásticas durante el proceso de fabricación o debido a cargas dinámicas, ubicaciones de altas concentraciones de tensiones (por ejemplo muescas), que se puede recombinar para formar hidrógeno molecular.

En éstas condiciones se pueden originar fisuras incluso sin la aplicación de esfuerzos externos, ocurre bajo la acción de tensiones internas residuales y de las tensiones ocasionadas por el propio hidrógeno acumulado. Por este motivo se pueden observar fisuras que acompañan las inclusiones no metálicas, especialmente sulfuros y se conectan entre sí originando la forma tipo "terrazza". Este tipo de discontinuidades no están orientadas según las tensiones principales, pero sí lo está la conexión entre las mismas.

Una vez que el hidrógeno atómico se ha difundido en el material, puede recombinarse para formar H_2 de hidrógeno molecular en el metal en forma de defectos internos como inclusiones, poros, etc. Otros sitios de recombinación se observan comúnmente a interfaces débiles internos como las inclusiones de sulfuro de manganeso o delaminaciones metalúrgicas.

El daño por hidrógeno es, en general, un término que se refiere al daño mecánico de un metal causado por la presencia, o interacción, con hidrógeno puede ser clasificarse en cuatro tipos:

- 1) Ampollamiento
- 2) Fragilización
- 3) Decarburización
- 4) Ataque por hidrógeno

El ampollamiento por hidrógeno resulta de la penetración del hidrógeno atómico dentro de la soldadura. El resultado es una deformación local, y en casos extremos la destrucción total de la pared. El agrietamiento por hidrógeno también es causado por la penetración de ésta a la soldadura y el metal, lo que resulta en una disminución en la ductilidad y la resistencia a la tensión del acero.

El ataque por hidrógeno se refiere a la interacción entre el hidrógeno y alguno de los componentes de la aleación y se lleva a cabo a altas temperaturas. El agrietamiento y la fragilización por hidrógeno pueden ocurrir en la soldadura durante la exposición con petróleo, en diferentes procesos químicos, durante operaciones por soldadura, o como resultado de la corrosión.

El ampollamiento es uno de los daños más comunes que se presentan en los aceros que están en contacto con H_2S y humedad, a este medio se le conoce como “ambiente amargo”.

3.4.2.1 Mecanismo de ampollamiento por HIC

El ampollamiento resulta de la penetración de éste en metal soldado. El resultado es una deformación local, y en casos extremos, la destrucción completa de la pared del tubo o recipiente. En el interior del recipiente o del tubo, se encuentra un electrolito ácido, y por el exterior está en contacto con la atmósfera. La evolución de hidrógeno ocurre en la superficie interior como resultado de una reacción de corrosión. Para cualquier tiempo, existe una concentración fija de átomos en la superficie interna, y algunos de éstos se difunden en la soldadura, combinándose para formar moléculas. El átomo de hidrógeno se difunde fácilmente en la soldadura, dado que el tamaño del hidrógeno es muy pequeño, comparado con el tamaño de los espacios interatómicos de la red cúbica del hierro.

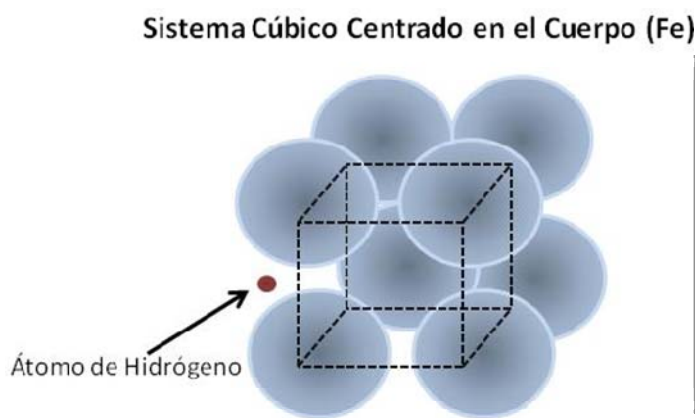


Figura 3.23. Relación del tamaño de los átomos de Fe y H^[24].

Muchos átomos de hidrógeno que se difunden en el acero se combinan para formar hidrógeno molecular en la superficie exterior. Si el hidrógeno que se difunden en el acero, se encuentra con una cavidad, inclusión alargada, fase dura, defectos de laminación, o cualquier discontinuidad, se “atrapa” en esta zona formando ahí el hidrogeno molecular.

Dado que el hidrógeno molecular no se puede difundir, la concentración y la presión del hidrógeno gas se incrementa en las zonas en donde se alojó. La presión de equilibrio del hidrógeno molecular en contacto con el hidrógeno atómico es del orden de cientos de miles de atmósferas, lo cual es suficiente para romper cualquier material conocido.

Las características principales de esta falla son:

- 1) Generalmente, está asociado a las inclusiones no metálicas de sulfuro de manganeso sin globulizar.
- 2) El agrietamiento también se presenta en bandas duras formadas por la segregación de impurezas en aceros de baja resistencia.
- 3) No se requiere la aplicación de tensión externa, para provocar el agrietamiento.
- 4) Ocurre en medios severos (con alta fugacidad de hidrógeno)
- 5) Se presenta en aceros de alta y baja resistencia por lo cual no puede evitarse reduciendo la dureza.

La severidad respecto de HIC se divide en 2 categorías: HIC moderado y HIC severo, detalladas en la Tabla 3.13. Cada una de las cuales requiere de un material específico, aceros de calidad Z y aceros resistentes al HIC. En la Tabla 3.20 se muestran los factores que influyen en la fisuración inducida por el medio.

También, por otra parte, las bandas de ferrita y perlita e inclusiones relacionados pueden producir localmente interfaces débiles en el material que puede resultar en pequeñas ampollas llenas de hidrógeno. Por lo tanto, este fenómeno suele ser motivo de preocupación en los aceros de baja resistencia en placa con resistencia inferior a 550 MPa (80 Ksi) y de baja dureza (<HRC 22) utilizado en laminación y costura por soldadura longitudinal, en tubos soldados por resistencia eléctrica, o la placa de aceros utilizados en la fabricación de buques y refinerías tanques ^[12]

Tabla 3.20 Factores que influyen en la fisuración inducida por el Medio ^[12].

FACTOR	SSC	HIC
TENSION	Tracción (Estática)	Tracción Estática
MEDIO CORROSIVO ACUOSO	Específico para la aleación soldada	Cualquiera
INCREMENTO DE T°C	Acelera	Se incrementa a T°C ambiente. Luego decrece
METAL PURO	Más resistente	Susceptible
MORFOLOGIA DE LA FISURA	Trasgranular, o intergranular. Fisura ramificada con extremos agudos	Trasgranular o intergranular. Extremo de fisura agudo pero sin ramificar
APARIENCIA DE LA SUPERFICIE DE LA FISURA	Clivaje	Clivaje
POLARIZACIÓN CATODICA	Usualmente suprime SCC	Acelera

Como describen Giraldo y Chaves ^[29], evaluaron el agrietamiento inducido por hidrógeno HIC en soldaduras por fusión en aceros ferríticos, en y donde determinaron que este fenómeno se presenta siempre y cuando existan, simultáneamente, los siguientes factores: un nivel crítico de concentración de hidrógeno, un nivel crítico de esfuerzos de tracción y una microestructura susceptible, normalmente martensítica. El mecanismo de nucleación y crecimiento de este tipo de grietas se explica por el efecto fragilizante que tiene el hidrógeno en el acero, por su alta velocidad de difusión y por la existencia de zonas con esfuerzos triaxiales máximos en el frente de una entalla o concentrador de esfuerzos.

La ubicación de estas grietas, es decir, si se presentan en el metal fundido o en la zona afectada térmicamente (ZAC), se explica a través de las diferencias que presenta el acero en estado austenítico (estructura cúbica de cara centrada) y en estado ferrítico (cúbico de cuerpo centrado) en cuanto a la solubilidad y

difusividad de hidrógeno atómico, para lo cual la templabilidad relativa entre el metal base y el metal fundido se convierten en los factores fundamentales para poder predecir su localización en uniones soldadas.

El objetivo de Giraldo y Chaves ^[29], fue presentar una explicación conceptual sobre el mecanismo de nucleación y crecimiento de las grietas inducidas por hidrógeno en soldaduras de acero, lo cual se abordará en esta parte del trabajo, y tratar las variables que tienen influencia en el fenómeno, para que los ingenieros tengan herramientas que los ayuden a desarrollar procedimientos de soldadura adecuados para la producción de estructuras metálicas económicas, confiables y seguras para los usuarios, tema que se describe a continuación en el siguiente punto.

3.4.2.2 Crecimiento de grietas en frío

El hidrógeno en el hierro y el acero

El hidrógeno atómico puede ser introducido en los aceros de varias maneras, como por ejemplo en el proceso de tratamientos superficiales, tales como decapados con ácidos o electroplateado, durante un tratamiento térmico, durante la soldadura, etc. En el caso de la soldadura, el hidrógeno se introduce ya que el arco eléctrico es capaz de disociar el hidrógeno gaseoso (H_2) o los compuestos basados en hidrógeno (como el agua o el vapor de agua) que puedan estar presentes en la atmósfera o en los fundentes de los consumibles de soldadura; la disociación de estos compuestos en hidrógeno atómico facilita que el metal fundido absorba cierta cantidad de este elemento de una manera proporcional a su concentración en la atmósfera del arco ^[29].

El agrietamiento retardado puede ocurrir en un amplio intervalo de esfuerzos aplicados y, a partir de los datos obtenidos de pruebas de laboratorio con cargas sostenidas, se puede afirmar que el comportamiento de aceros

fragilizados con hidrógeno depende del nivel de esfuerzos, del tiempo y de la temperatura como se ilustra en la Figura 3.24. Para un nivel de concentración de hidrógeno existe un esfuerzo crítico superior por encima del cual ocurre la falla, sin demora en el tiempo; para niveles de esfuerzos por debajo de un esfuerzo crítico inferior, el hidrógeno es mínimo y la falla no ocurre; en niveles de esfuerzos intermedios, la falla ocurre después de cierto tiempo el cual se hace más corto para mayores esfuerzos, razón por la cual se conoce como agrietamiento retardado ^[29].

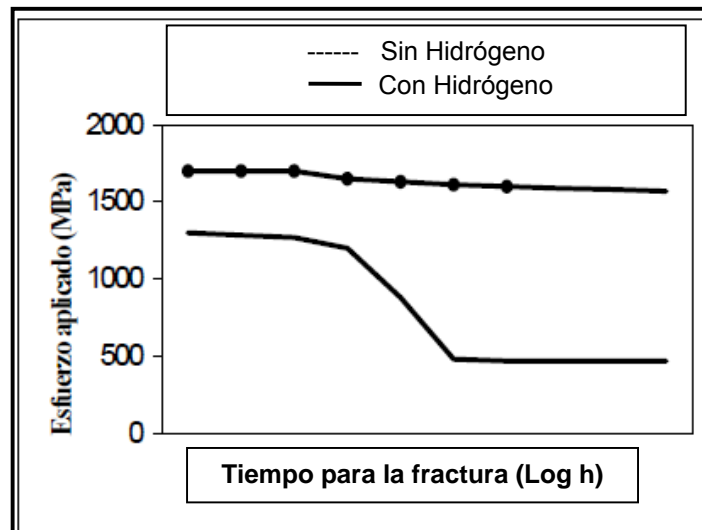


Figura 3.24. Curva de agrietamiento inducido por hidrógeno (agrietamiento retardado) o curva de fatiga estática ^[29].

Para resumir, entonces, el agrietamiento inducido por hidrógeno se presenta después de que el hidrógeno viaje por difusión a través del acero y se acumule en un lugar con un estado de esfuerzos determinado hasta llegar a un nivel de concentración suficiente. En otras palabras, para que se inicie una grieta se debe contar con una combinación crítica de estado de esfuerzos y concentración de hidrógeno ^[29].

- **Zonas de triaxialidad de esfuerzos y propagación de grietas**

Cuando se aplica un esfuerzo unidireccional en un material que contenga una entalla, se generan dos esfuerzos transversales adicionales al esfuerzo longitudinal aplicado que no son uniformes en los límites de la entalla existente, tal como se ilustra en la Figura 3.25 y producen un estado triaxial de esfuerzos que se vuelve máximo en un punto más allá del borde de la entalla; la magnitud de estos esfuerzos dependerá de la agudeza de la entalla, siendo menos crítica para el caso de discontinuidades de forma esférica (como un poro o una inclusión de escoria), que para el caso de una planar (como una grieta o una falta de fusión). A partir del desarrollo de una teoría de esfuerzos triaxiales, se asume que la fragilización se ocasiona por la concentración de hidrógeno cerca de estas entallas [29].

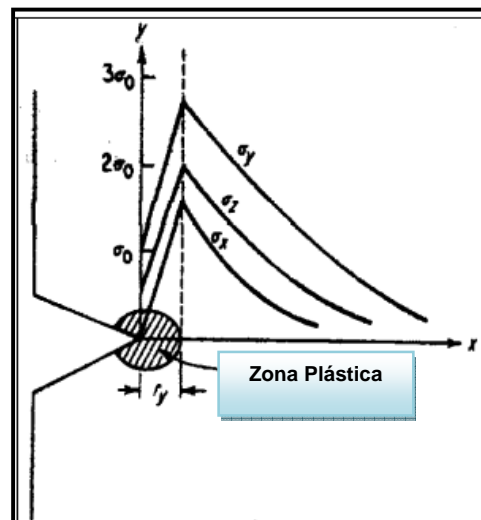


Figura 3.25. Distribución de esfuerzos triaxiales alrededor de una entalla o concentrador de esfuerzos [29].

En la Figura 3.25 se observa que en la curva existen: el esfuerzo crítico superior por encima del cual la falla es inmediata, el esfuerzo crítico inferior por debajo del cual no existirá falla a pesar del tiempo de aplicación de la carga y una región central donde el tiempo para la falla se hace menor cuando mayor es el esfuerzo aplicado [29].

3.4.2.3 Localización de las grietas en frío en soldaduras de aceros

Las grietas asistidas por hidrógeno en soldaduras de acero pueden presentarse en el metal fundido o en la zona afectada térmicamente, dependiendo de la composición química del metal base, en relación con la composición química de la mezcla del metal fundido (se habla de mezcla porque generalmente se trata de una combinación por dilución del metal de aporte y del metal base). El metal fundido al estar en contacto directo con la atmósfera protectora, proporcionada por el proceso de soldadura, es el primero en absorber el hidrógeno atómico disociado que queda incorporado en el material después de la solidificación [29].

- **Grietas ubicadas en la zona afectada térmicamente (ZAC)**

Para explicar el proceso del paso del hidrógeno atómico hacia la ZAC a través de la línea de fusión se requiere considerar una sección longitudinal de un cordón de soldadura durante su aplicación y la influencia que tienen las posiciones relativas de las isotermas de transformación de la austenita en diferentes subproductos entre el metal soldado (TF) y el metal base en la ZAC (TB), tal como se ilustra en la Figura 3.26. En esta figura se traza la curva AC que representa la isoterma de transformación del metal fundido de austenita a ferrita más cementita, el límite de fusión que separa el metal fundido de la ZAC y el límite de la ZAC que lo separa del metal base no afectada por el calor [29].

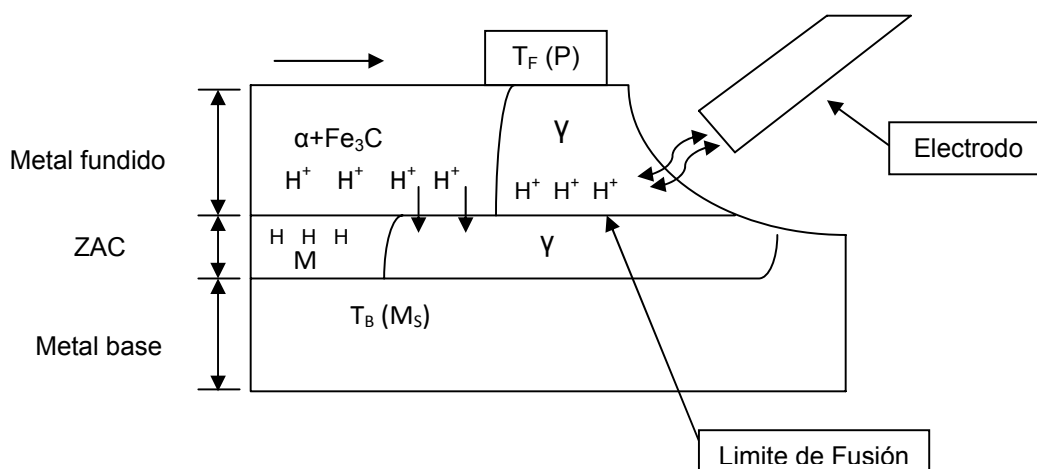


Figura 3.26. Sección longitudinal que muestra la evolución del hidrógeno en la soldadura de un metal base de más templabilidad que el metal fundido ^[29].

Cuando el metal fundido, ya solidificado, experimenta durante la soldadura una transformación perlítica (por efecto de su composición química), la cual se da a una temperatura $T_F (P)$ relativamente alta, mientras que el metal de base experimenta una transformación martensítica, a una temperatura $T_B (M_s)$ relativamente baja, las isothermas $T_F (P)$ y $T_B (M_s)$ están desfasadas en la dirección longitudinal como se muestra en la Figura 3.26. Cuando ocurre la transformación martensítica de la austenita enriquecida en hidrógeno se reúnen las condiciones de una concentración de hidrógeno y una microestructura que, como la martensita, son la base para la formación de grietas en frío; los esfuerzos pueden ser residuales o de servicio en la unión soldada. Por consiguiente, en el caso de un metal base con una templabilidad superior a la del metal de aporte o a la de la mezcla que compone el metal fundido (lo cual depende básicamente de sus respectivas composiciones químicas) la localización de una eventual grieta en frío estará en alguna parte de esa estrecha franja de la ZAC; por este motivo, es común encontrar en la literatura técnica que a este tipo de grietas se les denomine como “grietas debajo del cordón” (proveniente del inglés “underbead crack”) ^[29].

Todos los aspectos explicados anteriormente, le permiten al ingeniero de soldadura predecir, con base en el conocimiento de los metales involucrados en la ejecución de una junta soldada por fusión, saber los lugares de la unión donde se podrían presentar las grietas inducidas por hidrógeno, lo cual es de interés tanto en el campo de la inspección, ya que se puede enfocar la detección de defectos mediante ensayos destructivos o no destructivos en estos lugares, como en el campo del análisis de falla ya que puede convertirse en una ayuda durante la caracterización de cierto tipo de grieta con base en su ubicación. Igualmente, si se toma en consideración el objetivo del presente trabajo, esta información se constituye en una herramienta fundamental para el desarrollo de procedimientos de soldadura seguros.

Estudios realizados por Giraldo y Chávez ^[29], expusieron los conceptos que gobiernan la nucleación y el crecimiento de las grietas inducidas por hidrógeno y se plantearon las condiciones que se deben reunir para su formación en soldaduras por fusión de aceros ferríticos; igualmente, se presentó una explicación del porqué estas grietas pueden presentarse en el metal fundido o en la ZAC según las características de templabilidad de los metales involucrados en una unión soldada.

3.4.2.4 Fisuración por hidrógeno orientada por tensión SOHIC

Este tipo de agrietamiento presenta pequeñas ampollas apiladas, unidas por fisuras inducidas por hidrógeno y alineadas en la dirección del espesor (perpendicular a la carga aplicada), como resultado de altas tensiones de tracción localizadas. Es un mecanismo típico en la zona afectada por el calor (ZAC) de soldaduras donde las tensiones residuales son elevadas y también en áreas donde la tensión aplicada es alta o existen concentradores de tensiones, tales como una fisura por SSC. El SOHIC es un mecanismo mediante el cual el SSC puede propagar en ciertos aceros que, por su dureza (< 22 HRC), serían de otra forma resistentes a SSC.

El SOHIC es una forma especial de HIC que se produce en aceros de baja aleación bajo la acción de la tensión. Se produce en los aceros blandos, pero por lo general bajo tensiones residuales. Se caracteriza por la formación de una matriz de grietas apiladas. Cada grieta individual HIC está orientada paralelamente a la dirección de laminación, pero la piletta es perpendicular a la aplicación del estrés asociado con la concentración de esfuerzos [36].

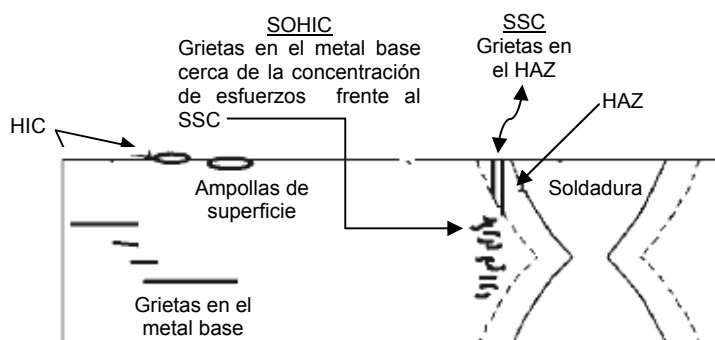


Figura 3.27. Esquema de HIC, SSC y SOHIC [36].

En estudios realizados por González y Reyes ^[41], en un análisis de falla de tubería submarina de 24" de diámetro para transporte de crudo detectaron la falla del tubo que transporta hidrocarburo entre dos plataformas marinas de perforación, mediante inspección de buceo por burbujeo localizada encontraron la falla que consistió en fractura a causa del efecto combinado de esfuerzos residuales y la fragilización por hidrógeno, debido al contacto con un fluido amargo. El material de ambos tramos de tubería analizada, cumple con el estándar API 5L X52 y no presento deficiencias del tipo metalúrgico que pueden ser relacionadas con la falla. En la Figura 3.28 se aprecia, la sección de tubería que fallo, se observa un colapso caracterizado por una protuberancia como se observa en la Figura 3.29; el cual se cree fue producido por deformación plástica generada por compresión excesiva que dio origen a esfuerzos fuera del límite elástico del material.

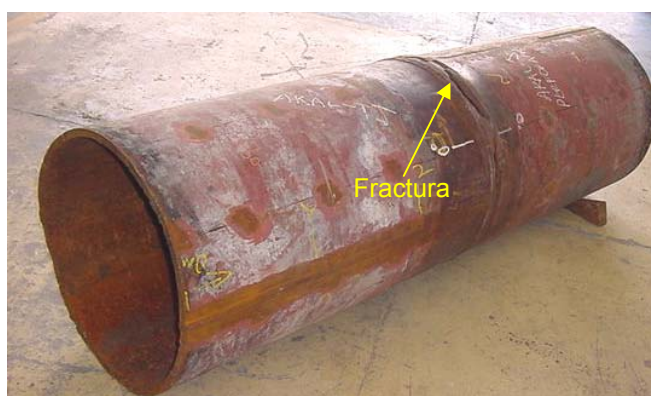


Figura 3.28. Aspecto de la sección de tubería que fallo ^[41].



Figura 3.29. Vista cercana del inicio de colapso, así como la fractura generada en esta región ^[41].

La inspección visual de la superficie de las paredes interna y externa del tubo no evidenció una degradación relevante provocada por corrosión o daño mecánico para el caso de la superficie externa. La fractura presentó un plano de aproximadamente 45°C, hacia la superficie externa, la distancia entre las dos superficies de fractura es de cerca de 1" y se localiza aproximadamente a una distancia de 1.5 – 2" del cordón de soldadura circunferencial.

- **Caracterización del material**

Tabla 3.21 Vía de análisis: %C y S por combustión y detección infrarroja, resto por espectrometría de rayos X^[41].

Elemento (%)	Tubo (%)	API 5L X52
C	0.059	0.30 máx
S	0.003	0.03 máx.
Mn	0.83	1.35 máx.
P	0.007	0.03 máx.
Si	0.21	---
Cr	0.01	---
Ni	0.02	---
Mo	<0.010	---
Cu	0.32	---
V	<0.010	---
Nb	0.024	---
Ti	<0.010	---
*CE (Pcm)	0.12	
**CE (IIW)	0.21	

Posteriormente se realizó un análisis microestructural del tubo donde se observó en las Figuras 3.28 y 3.29 revelando una severidad de inclusiones no metálicas del tipo óxidos (D1d), contenidos en una matriz de Ferrita y Perlita con tamaño de grano Ferrítico 81/2-9 ASTM como se muestran en las Figuras 3.30 y 3.31.



Figura 3.30. Distribución de inclusiones no metálicas en material puntos negros, 100X. (Sin ataque)^[41].



Figura 3.31. Microestructura de Ferrita zonas blancas y Perlita zonas oscuras, 100X (nital 5%)^[41].

Para el análisis de fallas se expusieron las superficies de fractura mediante su separación. Posteriormente a las superficies de fractura, se procedió a verificar la presencia de sulfuros en la sección del tubo mediante la prueba del acetato de plomo, siendo positiva la presencia de H_2S en la tubería.

La evaluación de la superficie de fractura mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), reveló que la Figura 3.32 muestra la superficie de propagación de fractura, debido a que la superficie se encontraba bastante dañada por ataque corrosivo.

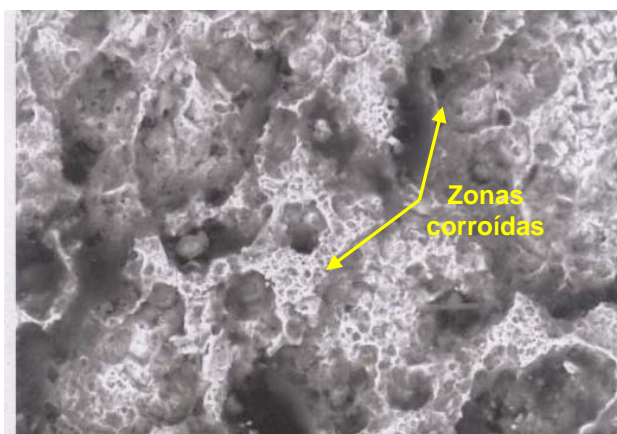


Figura 3.32. Vista cercana de superficie plana de propagación de fractura, las flechas señalan el daño generado por corrosión 230X (MEB) ^[41].

Se evidenciaron grietas en la superficie interna del espesor de paredes del tubo aledañas y paralelas a los inicios de fractura, ver Figura 3.33a y 3.33b. Al realizar microanálisis vía Energía Dispersiva de Rayos X (EDS), a lo largo de dichas grietas, se detectó que el material contenido en su interior está compuesto por las siguientes especies químicas; Hierro (Fe), Azufre (S), Oxígeno (O), Carbono (C) y Silicio (Si), ver Figura 3.34.

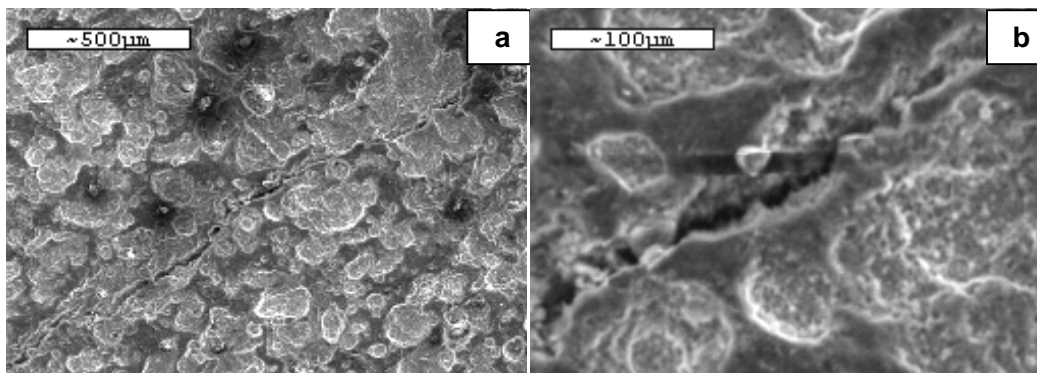


Figura 3.33. a) Vista de grieta adyacente a inicio de fractura 80X (MEB). **b)** Misma grieta observada a mayores magnificaciones 400X (MEB) ^[41].

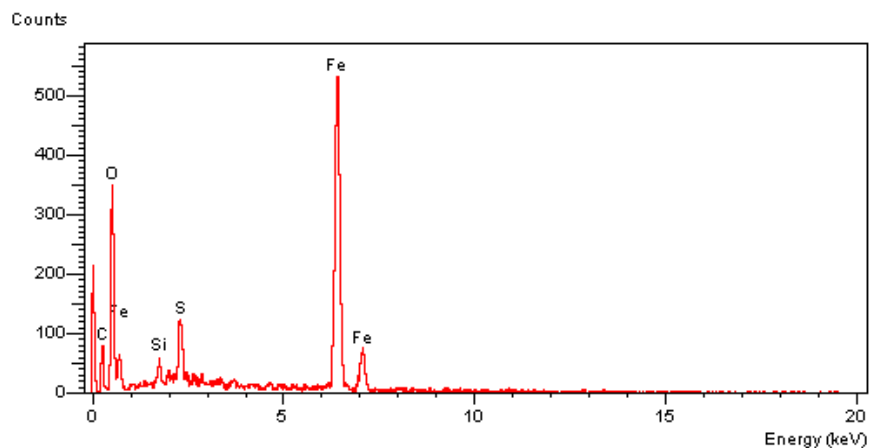


Figura 3.37. Espectro de especies químicas contenidas en interior de la grieta anterior (MEB) ^[41].

Finalmente se procedió a modelar el escenario ideal que dio lugar a la formación de la protuberancia evidencia sobre la zona de falla. En los resultados numéricos demuestran que los esfuerzos longitudinales a compresión en la parte superior del ducto es para un tramo de 9 metros aproximadamente donde la zona de falla se encuentra sometida a esfuerzos a compresión. La simulación del inicio del colapso es donde se genera la protuberancia donde se puede observar que toda la parte superior de la línea se encuentra a compresión como se muestra en la Figura 3.38.

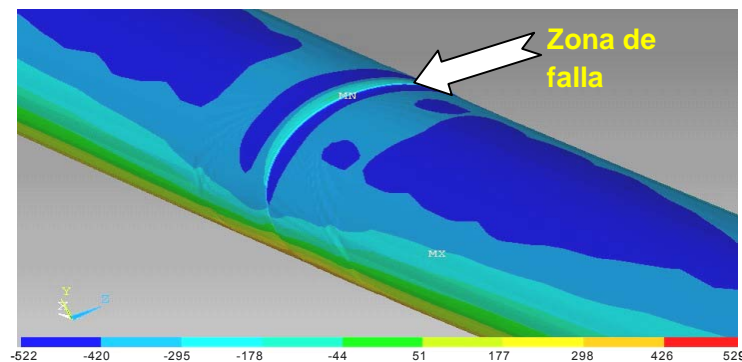


Figura 3.38. Contorno de esfuerzos longitudinales para condiciones de inicio de colapso ^[41].

Al generarse la protuberancia por la flexión excesiva de la línea, ésta queda deformada plásticamente y con esfuerzos residuales a compresión. En estas condiciones, la línea por si sola no regresaría a una posición horizontal. Por lo tanto, al enderezarse de manera forzada por su propio peso para descansar sobre el lecho marino, quedando a tensión la zona afectada, lo cual pudo ser suficiente para contribuir a la generación de la falla.

González y Reyes ^[41], concluyen que el tramo de tubería de 24" de diámetro por 0.6888" de espesor de la línea de conducción de crudo entre las plataformas marinas fallo debido a que el material fracturó a causa del efecto combinado de los altos esfuerzos residuales generados por la formación del inicio de colapso y la acción de fragilización del hidrógeno al estar en contacto con un fluido amargo. El mecanismo de falla se tipifica como "Agrietamiento Asistido por Esfuerzos en Ambiente Amargo" Sulfide stress Cracking (SSC).

CAPÍTULO 4

RECOMENDACIONES

1. Con información documentada se puede dar continuidad y utilizar el presente documento como base para el diseño de uniones en ambientes corrosivos.
2. Se realizó una investigación documentada en normas, códigos, libros, artículos científicos, etc.
3. Utilizar guías de diseño de uniones establecidas por Lincoln arc welding foundation, NACE, API, AWS.
4. Algunos autores sólo consideran el término corrosión en metales, por lo que se recomienda revisar bibliografía científica enfocada a corrosión en soldaduras para eficientar la calidad de la unión en ambientes corrosivos.
5. Cada proceso tiene sus características individuales; por lo tanto, es importante que el diseñador seleccione la soldadura cuidadosamente así que él preserve la resistencia a la corrosión de los materiales.
6. Se debe comprobar que solamente se utilicen materiales que cumplan con los requisitos establecidos por normas dedicadas a recomendar materiales de acero estructural expuestos a servicios agrios o amargos.
7. Es importante implementar medidas necesarias para el control de la corrosión de la unión soldada, de acuerdo a las condiciones

de trabajo del sistema y medio en el cual se encuentre operando la unión.

8. Es importante revisar los antecedentes bibliográficos para la protección de la corrosión establecidas en normas de la NACE International, PEMEX; en caso de que alguna norma no cuente con información de protección el diseñador debe efectuar trabajos correspondientes al estudio de los métodos de protección.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

- El diseño del tipo de unión se debe seleccionar, sobre todo, con base en los requisitos de la carga a que será sometido el ensamble soldado.
- La variación de los esfuerzos debido a los diferentes tipos de uniones se deben principalmente a los problemas originados por concentradores de esfuerzos (axial, cortante, flexión). Según el tipo de unión soldada tiene concentradores de esfuerzos diferentes. Para estudios de mayor alcance se cuenta con las herramientas de paquetes de simulación para el análisis de los esfuerzos mediante elemento finito.
- La mayoría de las soldaduras usadas estructuralmente son de filete, principalmente por la facilidad de fabricación. Efectivamente, las soldaduras a tope, requieren mayor preparación de los bordes de los elementos a unir y mayor precisión.
- En presencia de cargas fluctuantes, en el vértice de las discontinuidades geométricas agudas se produce un fenómeno de deformación elasto-plástico cíclica, a partir de la cual se produce la iniciación de fisuras por fatiga. En tal sentido, el pie de la soldadura, sea a tope o a filete, es donde yacen las discontinuidades que, en general, son los factores limitantes de la vida a la fatiga de uniones soldadas transversalmente al cordón de soldadura. En general, cualquier discontinuidad geométrica que actúe como concentrador de esfuerzos reduce notablemente la resistencia a la fatiga de una unión soldada.
- La falta de penetración y fusión incompleta, es defecto grave y se presenta con mayor frecuencia en soldaduras de grandes espesores,

constituye una iniciación de rotura cuando la unión trabaja a flexión y disminuye la resistencia de la unión por reducción de la sección. Cuando la fusión incompleta produce grietas en la superficie, se puede combinar con factores ambientales induciendo así a la corrosión localizada.

- Actualmente, se conocen diferentes mecanismos que pueden dar lugar al deterioro progresivo de los aceros que se utilizan en la industria petroquímica. Entre ellos cabe destacar el agrietamiento inducido por el hidrógeno (HIC), el agrietamiento bajo esfuerzo inducido por la presencia de sulfuros (SSC) y la fisuración por hidrógeno orientada por la presencia de esfuerzo (SOHIC).
- El diseñador debe tener cuidado y contar con conocimientos ampliamente desarrollados en la selección correcta de los materiales, procesos de soldadura, cargas mecánicas a la que estará trabajando el componente para cumplir con los requerimientos y especificaciones de diseño.
- La correcta selección de materiales resulta en aceros mejorados con una buena resistencia mecánica y tenacidad, alta soldabilidad y excelente comportamiento en medios ácidos agresivos.
- El mecanismo SSC (corrosión bajo esfuerzo en sulfuro) afecta al material y lo hace fallar por medio de una combinación de corrosión y esfuerzos de tensión (residuales o aplicados) en presencia de agua y H_2S .
- Para evitar SSC la variable más importante del material es la dureza, en general se indica en normas establecidas que para aceros al carbono empleados en la industria petrolera deben ser de baja dureza (inferior a 22 HRC).
- La influencia de factores tales como la estructura metalográfica, el proceso de soldadura, las discontinuidades en la raíz, concentración de tensiones, tensiones internas, pueden hacer que los materiales

sean más susceptibles al ataque por hidrógeno. En particular, se debe evitar factores tales como la estructura Widmanstätten, los electrodos que no son de bajo hidrógeno, concentradores de tensiones, y sobremonta excesiva de raíz.

BIBLIOGRÀFIA

¹Gordon, J.E (1976);The New Science of Strong Materials, 2^a ed; Penguin Books, Londres, UK.

²Lancaster, J.F (1978); Welding Metallurgy, 4^a ed; Allen & Unwin, Londres,UK, cap 1.

³Milner, R.D, Apps, R.L (1968); Introduction to Welding and Brazing, 1^a ed; Pergamon, Press, Oxford, Cap 1.

⁴Hicks, Hohn (2001); Welded design theory and practice; Abington publishing; Cambridge, England.

⁵Gerken, J.M (1998); Design of Welding, cap 5, Welding Handbook, 8 th ed; Miami: American Welding society; Miami, FL.

⁶ASM Metals Handbook, Vol. 6; Welding Brazing and Soldering, American Society For Metals, 1983, pp 692-704; Miami, FL.

⁶[En línea] [Consultado el 10 de diciembre de 2009][[www//uclm.es/area/ing-rural/Trans_const/elementosconstruccion0.2PDF](http://www.uclm.es/area/ing-rural/Trans_const/elementosconstruccion0.2PDF); Uniones por soldadura]

⁷Lincoln, James F.(2000); The procedure Handbook of Arc Welding.

⁸Bowels, J. E. (2007); Diseño estructural de acero, Ed. Limusa; Mèxico, D.F.

⁹Mc. Cormac, Nelson,J. K. (2002); Structural Steel Design: LRFD Method, 2nd ed. Alfaomega; Mèxico, D.F.

¹⁰American Institute of Steel Construction AISC(2005); 3nd ed.;printed in the United States of America.

¹¹NRF-137-PEMEX-2006. Diseño de estructuras de acero; Mèxico.

¹² Davis, J. R. (2006); Corrosion of Weldments, The materials information society, Printed in the United States of America.

¹³ Sastri V.S, Ghalli Edwards (2007) ; Corrosion and Protección, ed. John Wiley & Sonsinc; USA.

¹⁴[En línea] [Consultado el 10 de diciembre de 2009] [WWW.bonnet.es/diseñar.pdf-Diseño para evitar la corrosión]

¹⁵Avery, R.E and Tuthill (1992); Design for corrosion services-Nace International Guidelines for the welded fabrication of nickel containingstainless steels for corrosion resistant services.[En línea] [Consultado el 10 Diciembre 2009] [WWW.stainless-steel-world.net/pdf/11012.pdf], pp. 1-34

¹⁶NRF-137-PEMEX-2006. Diseño de estructuras de acero; México.

¹⁷ [En línea] [Consultado el 10 de diciembre de 2009] [WWW.bibliotecadigital.ilce.edu.mx/seleccióndeltipodeprotección]

¹⁸NRF-186-PEMEX-2007. Soldadura en acero estructural para plataformas marinas, México.

¹⁹Aguilar, E. (2008); Reparación de gasoductos api-5l-x80 en línea viva con aplicación de soldadura, Monografía de especialidad en soldadura, pp. 70-79, COMIMSA, Saltillo, México.

²⁰ Davis, J.R. (2006); Corrosion of Weldments, The materials information society, printed in the United States of America.

²¹ASM Metals Handbook Vol. 13, (1992); Corrosion, pp 819-820.

²² AWS A5.1; (2004); Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, American Welding Society; Miami, FL.

²³Aristidez, S; Barboza, J, (2001); Influencia de los cordones de soldadura sobre la resistencia a la corrosión del acero API 5L-X52, en agua sedimentada de crudo de petróleo; pp. 41-50; Jornadas SAM-CONAMET, Perú.

²⁴Reyes, A. F. (2004); Efecto de la microestructura en las condiciones de flujo de hidrógeno a través de aceros al carbono. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

²⁵Malaisi, G. (2007); Criterios para la selección y especificación de requisitos adicionales de materiales Sour Service, pp.14-21; Asociación Argentina de Materiales, [En línea] [Consultado el 10 de diciembre de 2009] [WWW.materiales-sam.org.ar]

²⁶NRF-001-PEMEX-2000. Tuberías de acero para recolección y transporte de hidrocarburos amargos, México.

²⁷NACE MR-0175; 2002. Standart material requeriments; Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oifield Equipment.

²⁸Infanzón, S; Romero, J (2003); Ensayos no destructivos en la detección de ataque por hidrógeno a alta temperatura. [En línea] [Consultado el 10 de diciembre de 2009] [www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material]

²⁹Giraldo, J. E. y Cháves, C. A. (2002); Agrietamiento inducido por hidrógeno en soldaduras de acero, pp.59-64 Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

³⁰Camero, S., y Aristizabal, V; (2008); Estudio del daño por hidrógeno en uniones soldadas de acero API 5L-X52. Pp101-112; Revista Metalúrgica, Madrid, España.

³¹NACE MR-0175, 2002

³²Paisani, L., Firoto, G., (2009); Aceros inoxidables, Universidad Nacional de Rosario; Universidad Nacional de Rosario.

³³Jellison, M., Chan, A., (2007); Nuevas aleaciones de acero para herramientas de fondo superan a los materiales tradicionales en aplicaciones de servicio amargo; 2º Congreso de perforación, reparación y servicio de pozos, Buenos Aires.

³⁴ASM Metals Handbook Vol. 11(2002), Análisis de Fallas y prevención.

³⁵Crolet, J. L., Bonis, M. R., (1983); pH measurements in CO₂ aqueous solutions under high pressure an temperature, corrosion, pp. 39-46.

³⁶Anezi, M.A., Frankel, G. S and Agrawal A.K. (1999), Susceptibility of Conventional Pressure Vessel Steel to Hydrogen-Induced Cracking and Stress- Oriented Hydrogen-Induced Cracking in Hydrogen Sulfide-Containing Diglycolamine Solutions, Corrosion engineering section, Vol 55, No.11, pp.101-109.

³⁷[En línea] [Normas de referencia PEMEX] [Consultado el 10 de diciembre de 2009] [WWW.pemex.com/índex.]

³⁸[En línea] [Normas de referencia NACE INTERNATIONAL] [Consultado el 10 de diciembre de 2009] [WWW.nace.org/content]

³⁹Oaki, J.E., Alencastre J., (2002); Estudios de los esfuerzos en uniones soldadas por el método de los elementos finitos. Pp.1189-1200, Universidad Católica del Perú; Lima, Perú.

⁴⁰Vallejo, M.U., Modelación de una conexión soldada con SAP2000, Universidad Nacional de Colombia.

⁴¹González, M.A, Reyes A, (2003); Análisis de falla de tubería submarina de 24" diámetro para transporte de crudo; pp. 1-12; Corporación Mexicana de Investigación en Materiales; Saltillo, Coahuila.

⁴²Teràn, G., Tovar, c, (2004); Estudio de la corrosión producida en aceros inoxidables 304 en procesos de soldadura; pp.61-66; Universidad Nacional de Colombia; Medellín, Colombia.

⁴³ Godoy, L., (2006); Corrosión; Mecánica avanzada de materiales; pp. 1-7; Universidad Nacional de Puerto Rico.

LISTA DE FIGURAS

Número	Figura	Pág.
2.1	Relación entre las temperaturas pico experimentales en varias regiones de una soldadura y como se correlacionan con el diagrama Fe-C.[1]	11
2.2	Esquema de las regiones de una soldadura.[2]	12
2.3	Evolución histórica de la soldadura de los distintos procesos de soldadura.[3]	15
2.4	Formas de unión.[4]	18
2.5	Área crítica de cortante para soldaduras de mete. a) Soldadura de filete para junta te. b) Soldadura de filete para junta traslapada. e) Dimensión en la garganta para área mínima de cortante. [5].	20
2.6	Soldaduras de ranura.[6]	22
2.7	Diseño del bisel en la junta de soldadura para tubos de igual espesor de pared.[7]	24
2.8	Diseño del bisel en la junta de soldadura para tubos de diferentes espesores de pared.[7]	25
2.9	Detalles recomendadas para las conexiones de bridas.[7]	26
2.10	Proceso de soldadura para unión de metales. a) Unión por fusión por el proceso FCAW b) Unión en estado sólido por soldadura por fricción.	27
2.11	Costo relativo estimado en unión de filete y de las soldaduras de ranura para varios espesores de placas.[9]	31
2.12	Las cargas aplicadas en una barra curvada dan lugar a diagrama del momento de flexión según las indicaciones de la figura (b), c) los momentos de flexión tienden a hacer mover la barra en la dirección demostrada, así reduciendo la curvatura.[9]	34
2.13	Columna recta con la carga concéntrica; b) con incremento de carga la columna tiende a moverse lateralmente, c) diagrama de momento de flexión como resultado del movimiento lateral, el pandeado adicional d) resultado del momento de flexión.[9]	35
2.14	Radio de giro sobre el eje x-x y ejes y-y de una columna.[9]	37
2.15	Fuerza cortante en soldaduras de filete.[9]	38
2.16	a) Soldadura de filete longitudinal b) Soldadura de filete transversal.[9]	41
2.17	a) Junta traslapada b) Junta a tope.[9]	47
2.18	Esquema de los factores geométricos.[39]	50
2.19	Corte de unión a tope mostrando la zona de concentración de esfuerzos.[39]	51
2.20	Corte de una unión en T donde se muestra como se concentran los esfuerzos.[39]	52
3.1	Diseño para favorecer la limpieza y el drenaje.[14]	56
3.2	Diseño para evitar cavidades o trampas.[14]	56

LISTA DE FIGURAS

Número	Figura	Pág.
3.3	a) Esquina soldada desde el interior del tanque (diseño pobre por adentro y diseño pero aun por fuera); b) Esquina soldada desde ambos lados (Diseño pobre en el interior pero mejor diseño por fuera del tanque); c) Soldadura en la pared de la esquina con un mejor diseño en el interior y afuera del tanque el cual tiene buena resistencia a la corrosión y a la fatiga.[15]	58
3.4	Soldadura de caño con penetración incompleta (corrosión severa).[15]	59
3.5	Vigas de soporte con agrietamiento, a) Agrietamiento severo en filete escalonado, b) Filetes en ambos lados grieta continua sellada.[15]	59
3.6	Esquema del montaje de un sistema de protección de una tubería enterrada con un ánodo de sacrificio.[35]	61
3.7	Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio en estructuras fijas en el mar.[35]	62
3.8	Industrias que requieren soldadura en sus componentes.	64
3.15	Curva de polarización para los valores de la Tabla 2.10.[23]	83
3.16	Curva de polarización para los valores de la Tabla 2.16.[23]	84
3.18	Regiones de severidad para SSC para aceros al carbono.[25]	90
3.19	Diagrama de flujo para la especificación de requisitos para servicio acido.[25]	91
3.20	Fallas en la industria Petrolera, b) Corrosión en la industria petrolera.[35]	102
3.21	Grietas en las zonas afectadas por el calor (HAZ) debajo de la soldadura de un acero inoxidable tipo 410 soldado con un material de aporte ER308. a) Sección a través de la ZAC mostrando el mecanismo de corrosión SSC. [34]	106
3.22	Regiones de severidad para SSC para aceros al carbono.[27]	108
3.23	Relación del tamaño de los átomos de Fe y H.[24]	116
3.24	Curva de agrietamiento inducido por hidrógeno (agrietamiento retardado) o curva de fatiga estática.[29]	120
3.25	Distribución de esfuerzos triaxiales alrededor de una entalla o concentrador de esfuerzos.[29]	121
3.26	Sección longitudinal que muestra la evolución del hidrógeno en la soldadura de un metal base de más templabilidad que el metal fundido.[29]	123
3.27	Esquema de HIC, SSC y SOHIC.[36]	125 126
3.28	Aspecto de la sección de tubería que falló.[41]	
3.29	Vista cercana del inicio de colapso.[41]	
3.30	Distribución de inclusiones no metálicas en material.[41]	128
3.31	Microestructura de Ferrita y Perlita, 100X.[41]	128

LISTA DE TABLAS

Número	Tabla	Pág.
2.1	Se muestra los diferentes procesos de unión por soldadura en estado sólido así como por fusión.	28
2.2	Factores en el diseño de uniones soldada.[8]	29
2.3	Resistencia de Diseño para Soldaduras de Acero por Medio de la Carga y el Diseño de Factor de Resistencia de AISC (LRFD	40
2.4	Factores de resistencia característicos.[9]	42
2.5	Resistencia de diseño de soldaduras (AISC, 1994).[9]	44
2.6	Tamaños mínimos para las soldaduras de filete (AISC, 1994).[9]	46
3.1	Procesos de soldadura por arco para aceros al carbón.[12]	66
3.2	Especificaciones AWS del material de aporte por el tipo de material base y proceso de soldadura.	72
3.3	Resistencia a la corrosión de las soldaduras de la aleación 255 de Ferralium usando varios metales de aporte de aleación base níquel y diferentes técnicas de soldadura.[12]	73
3.4	(a) Clasificación de los aceros estructurales empelados en plataformas marinas fijas para la designación del electrodo y proceso de soldadura, (b) Proceso y electrodos de soldadura para los aceros indicados en el punto (a).[18]	75
3.5	(a) Clasificación de aceros estructurales empleados en plataformas marinas fijas para la designación del electrodo y proceso de soldadura.[18]	76
	b)Proceso y electrodos de soldadura para los aceros listados en la tabla (2.5 a). ^[18]	77
3.6	(a) Clasificación de acero estructurales empleados en plataformas marinas fijas para la designación del electrodo y proceso de soldadura. Tabla 2.6 (b), proceso y electrodos de soldadura para los aceros empleados en la tabla 2.6 (a).[18]	77
	(a) Muestra los electrodos y proceso para aplicación estructural y fabricación de recipientes a presión.[18]	78
3.7	(b) Muestra los electrodos con los procesos en aplicaciones estructural y fabricación de recipientes a presión.[18]	79
3.8	Composición química del acero y propiedades mecánicas.[23]	80
3.9	Tipos de juntas experimentales y parámetros de soldadura utilizados en la elaboración de probetas.[23]	81
3.1	Resultado de las curvas de polarización. [23]	82
3.10.1	Resultados de las curvas de polarización.[23]	82
3.11	Características de las inclusiones en el AWS-E6010 y AWS-E7018. [23]	82
3.12	Resultados de las curvas de polarización.[23]	83
3.13	Requisitos adicionales para placas.[25]	89

LISTA DE TABLAS

Número	Tabla	Pág.
3.14	Especificación para aceros al carbón para servicio de tubería en ambientes amargos.[26]	92
3.15	Contenido de manganeso y azufre.[26]	93
3.16	Tolerancia en el nivel de inclusiones.[26]	93
3.17	Aceros aceptables para la exposición directa a entornos de Servicio Amargo (véase el párrafo 1.3 de la NACE MR 0175).[27]	95
3.18	Materiales de aporte para Aceros al Carbono para componentes expuestos para ambiente corrosivo.[22]	100
3.19	Materiales de aporte para Aceros Inoxidables para componentes expuestos para ambiente corrosivo.[22]	101
3.20	Factores que influyen en la fisuración inducida por el Medio.	118
3.21	Vía análisis: %C y S por combustión y detección infrarroja, resto por espectrómetro de rayos "X".[41]	127

