

14



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

"TENDENCIAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION
EN CAMBIADORES DE CALOR"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N :
FERNANDO BUSTAMANTE RANGEL
ALFREDO MONDRAGON CORONA

28 2557

ASESOR: M.I. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

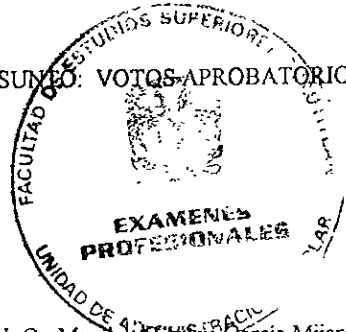
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: Q. Ma del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisámos la TESIS:

..Tendencias de materiales de construcción en cambiadores de calor"

que presenta el pasante: Fernando Bustamante Rangel
con número de cuenta: 8938447-7 para obtener el TÍTULO de
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcallí, Edo de Méx., a 24 de Septiembre de 199 9.

PRESIDENTE Ing. Enrique Cortés González [Firma]

VOCAL Ing. Jesús García Lira [Firma]

SECRETARIO M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez [Firma]

PRIMER SUPLENTE Ing. Rogelio Xelhuantzi Parada [Firma]

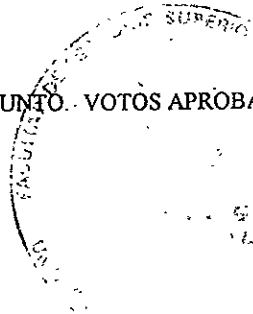
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Eusebio Reyes Carranza [Firma]



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

AT'N: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisámos la TESIS:

"Tendencias de materiales de construcción en cambiadores de calor"

que presenta el pasante: Alfredo Mondragón Corona
con número de cuenta. 9109764-8 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo de Méx, a 24 de Septiembre de 199 9

PRESIDENTE Ing. Enrique Cortés González [Firma]

VOCAL Ing. Jesús García Lira [Firma]

SECRETARIO M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez [Firma]

PRIMER SUPLENTE Ing. Rogelio Xelhuantzi Parada [Firma]

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Eusebio Reyes Carranza [Firma]

A mi padre:

Gracias por tu apoyo y ser mi guía, por estar siempre a mi lado cuando lo necesito.

A mi madre:

Gracias por tu cariño y cuidados, por siempre decirme palabras de aliento. Tu eres mi principal motivación.

A mis hermanas:

Gracias por haber soportado al hermano mayor, les dedico también este trabajo.

A mi padre: Por el apoyo que me brindó durante la carrera, un apoyo incondicional y sin interés alguno.

Por haber estado en todo momento a mi lado preocupandose por todas las cosas buenas y malas que me sucedían, enseñandome que nada es fácil y que siempre hay que dar lo mejor de uno.

Por el gran esfuerzo que realizó al haberme dado la oportunidad de ser un profesionista.

(Gracias papá)

A mi madre: Por haberme dado la vida y alentarme en todo momento a ser el mejor.

Por sus cuidados y atención desde que era niño hasta mis últimos días como universitario.

Por haberme soportado como soy, por todo esto y muchísimas cosas más:

(Gracias mamá)

A mis hermanas (Sandra y Daniela): Por su amistad y por los momentos agradables que compartieron conmigo durante la carrera.

(Gracias)

A mi familia en general: Por los cuidados y apoyo que de ellos recibí.

(Gracias)

Al Instituto Mexicano del Petróleo:

Por habernos dado la oportunidad y facilitarnos los medios para la realización de este trabajo.

A la División de Ingeniería de Intercambio Térmico:

Por haber llenado de gratos momentos nuestra estancia. En especial a los ingenieros Joel Mendoza Canales y Enrique Morales Ramírez por el apoyo técnico y moral que de ellos recibimos durante nuestra permanencia en el instituto.

INDICE GENERAL

INTRODUCCION	1
---------------------	----------

CAPITULO 1**FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES**

1.1 Información requerida	5
1.2 Características del material	6
1.2.1 Propiedades físicas	6
1.2.2 Propiedades mecánicas	6
1.3 Costo de materiales	9
1.4 Características de fabricación	10
1.5 Disponibilidad de materiales	11
1.6 Requerimientos de operación	11
1.7 Formas de corrosión	13
1.7.1 Corrosión uniforme	13
1.7.2 Corrosión galvánica	15
1.7.3 Corrosión bajo esfuerzos	18
1.7.4 Corrosión en grietas o hendiduras	19
1.7.5 Corrosión por picadura	20
1.7.6 Corrosión intergranular	22
1.7.7 Ataque selectivo	23
1.7.8 Corrosión erosión	24
1.8 Recomendaciones generales	25

CAPITULO 2

REQUERIMIENTOS DE MATERIALES

2.1 Materiales recomendados por la norma TEMA	29
2.2 Requerimientos específicos para cambiadores de calor de tubos y envolvente	30
2.3 Esfuerzos permisibles de diseño	31

CAPITULO 3

SERVICIOS COMUNES

3.1 Servicios no corrosivos	33
3.2 Servicios a bajas temperaturas	35
3.3 Servicios a altas temperaturas	38
3.4 Servicios con agua de enfriamiento	45
3.5 Servicios con hidrógeno	45
3.6 Servicios con agua de mar	49
3.7 Servicios con ácidos y alcalis	51

CAPITULO 4

TENDENCIAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION EN CAMBIADORES DE CALOR

4.1 Aceros aluminizados	56
4.1.1 Antecedentes	56
4.1.2 Métodos de aluminizados	59
4.1.2.1 Aluminizado mediante inmersión en caliente	59
4.1.2.2 Aluminizado mediante el proceso de difusión	67
4.1.2.3 Aluminizado mediante la utilización de una suspensión espesa de aluminio	68

4.1.2.4 Aluminizado mediante el proceso de rociado térmico	72
4.1.3 Especificación de los aceros aluminizados	78
4.1.3.1 Peso del recubrimiento	79
4.1.3.2 Metales base	80
4.1.4 Fabricación	82
4.1.4.1 Prueba de doblado	83
4.1.5 Pruebas e inspección	83
4.1.6 Disponibilidad	83
4.1.6.1 Lámina	83
4.1.6.2 Tubo	85
4.1.7 Requerimientos de temperatura para aluminizado	85
4.1.8 Propiedades mecánicas a temperatura ambiente	86
4.1.8.1 Propiedades mecánicas a altas temperaturas	87
4.1.9 Soldabilidad	88
4.1.10 Expansionado o rolado	90
4.1.11 Medidas disponibles	91
4.1.12 Costo	92
4.1.13 Resistencia a la corrosión	92
4.1.14 Resistencia a la oxidación	94
4.1.15 Resistencia a la carburización	95
4.2 Aceros microaleados	96
4.2.1 Antecedentes	96
4.2.2 Generaciones de aceros microaleados	98
4.2.3 Procesos que se aplican a los aceros microaleados	99
4.2.4 Tipos de aceros microaleados	100
4.2.4.1 Aceros microaleados al vanadio	101
4.2.4.2 Aceros microaleados al niobio	103
4.2.4.3 Aceros microaleados al niobio-vanadio	104

4.2.4.4 Aceros microaleados al niobio-molibdeno	105
4.2.4.5 Aceros microaleados al titanio	105
4.2.4.6 Aceros microaleados al niobio-titanio	106
4.2.5 Composición y especificaciones de los aceros microaleados	106
4.2.6 Propiedades mecánicas	108
4.2.7 Formabilidad	113
4.2.8 Soldabilidad	115
4.2.9 Disponibilidad	116
4.3 Aceros inoxidables dúplex	118
4.3.1 Antecedentes	118
4.3.2 Composición y especificaciones	120
4.3.3 Propiedades mecánicas	121
4.3.4 Resistencia a la corrosión	123
4.3.5 Formabilidad	129
4.3.6 Soldabilidad	129
4.4 Aceros con carbono controlado	131
4.4.1 Antecedentes	131
4.4.2 Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) en aceros al carbono	132
4.4.3 Carbono equivalente (CE)	134
4.4.4 Control del carbono equivalente (CE)	136
4.4.5 Soldabilidad	139
4.4.5.1 Soldabilidad de los aceros de bajo carbono	142
4.4.5.2 Soldabilidad de los aceros al carbono-manganeso	143

CAPITULO 5

APLICACIONES

5.1 Aplicaciones de aceros aluminizados	145
5.1.1 Tubería	146
5.1.1.1 Tubos calentadores	146
5.1.1.2 Tubos de transferencia de cambiadores de calor	147
5.1.1.3 Tubería para hornos retardadores de coke	148
5.1.2 Pernos de alta resistencia	149
5.1.3 Válvulas	149
5.2 Aplicaciones de aceros microaleados	149
5.3 Aplicaciones de aceros inoxidables dúplex	151
5.4 Aplicaciones de aceros con carbono controlado	158
5.4.1 Cambiadores de calor de tubos y envolvente	159
5.4.2 Cambiadores de calor tipo doble tubo y multitubo	160
CONCLUSIONES	161
BIBLIOGRAFIA	165

INTRODUCCION.

Este trabajo tiene como objetivo analizar las tendencias de materiales para la construcción de cambiadores de calor, tales como: aceros microaleados, aceros con carbono controlado, aceros aluminizados y aceros de alta resistencia (aceros inoxidables dúplex), con la finalidad de enriquecer la diversidad de materiales recomendados por algunos códigos y normas tales como el código **ASME** American Society of Mechanical Engineers (*Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos*) Sección VIII, División I y II y la norma **TEMA** Tubular Exchangers Manufacturers Association (*Asociación de Fabricantes de Cambiadores de Calor de Tubos y Coraza*).

Se estudiará la aplicación de estas tendencias en las diferentes partes constitutivas de los cambiadores de calor, tomando como base las condiciones de diseño y el tipo de servicio que ofrecerá, por lo que estos materiales deberán cumplir con las características adecuadas para proporcionar el mejor funcionamiento, garantizar la seguridad del personal, aumentar su tiempo de vida útil y evitar pérdidas considerables de capital debidas al reemplazo y/o reparación de los mismos.

Por lo tanto, para estudiar estas tendencias de materiales y hacer una buena selección de ellos, es conveniente en primer lugar conocer qué es un cambiador de calor, cómo opera y cuáles son sus partes constitutivas.

Un cambiador de calor es un recipiente a presión cuya función principal, es la de intercambiar calor entre dos o más corrientes en un proceso determinado, es decir, permite la transferencia de calor de un fluido a otro, a través de paredes metálicas y sin que ocurra un contacto directo entre ellos. La forma elemental de un cambiador de calor es la de un ducto por cuyo interior circula un fluido y el exterior es bañado por otro, existiendo un potencial térmico entre ellos. Los cambiadores de calor se usan principalmente en industrias donde se llevan a cabo operaciones de proceso tales como: industria petrolera, química, de alimentos, farmacéutica, etc.

Clasificación de los cambiadores de calor

Los cambiadores de calor se clasifican principalmente bajo dos consideraciones:

1) De acuerdo al tipo de servicio que prestan:

- Evaporadores
- Rehervidores
- Calentadores

- Precalentadores
- Condensadores
- Enfriadores
- Postenfriadores
- Reactores, etc.

2) De acuerdo a su tipo de construcción:

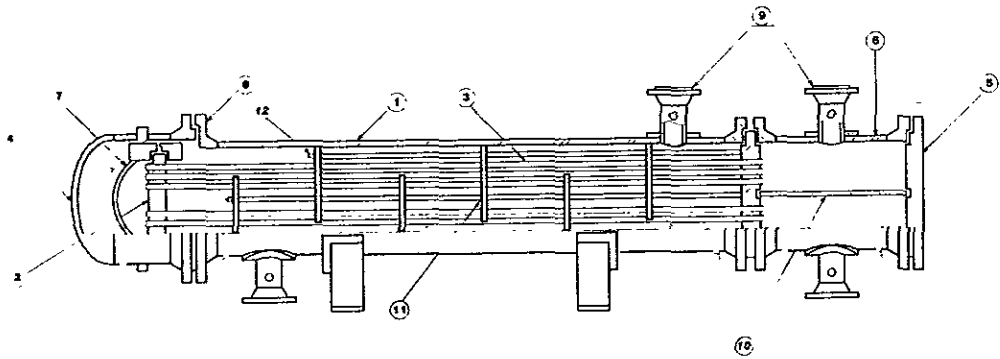
- Cambiadores de tubos y coraza o envolvente
- *Cambiadores de tubos concéntricos*
- Cambiadores tipo multitubo
- Cambiadores enfriados por aire
- Cambiadores de placas, etc.

Sin embargo, los equipos de mayor difusión y uso en la industria petrolera son los de tubo y coraza, por lo que este estudio se enfocará principalmente en este tipo de cambiadores.

Para su diseño, se utilizan principalmente el código ASME y la norma TEMA.

Partes constitutivas de los cambiadores de calor de tubos y coraza.

- **Coraza:** Es un cuerpo cilíndrico construido de una sola pieza que puede ser un tubo sin costura o una placa rolada que contendrá en su interior el haz de tubos y a través del cual circula el fluido que baña el exterior de dicho haz (figura 1).
- **Haz de tubos:** Es el elemento formado por los tubos de transferencia, situado en el interior de la coraza y orientado paralelamente a ella.
Consta también de mamparas, cuya función además de soportar a los tubos, es crear turbulencias y dirigir el fluido que circula por el exterior de los tubos mismos.
- **Espejos:** El haz de tubos remata sus extremos en placas perforadas llamadas espejos que sirven por una parte como elementos divisores del flujo del lado coraza y de lado tubos y por otra como elementos de sujeción de los tubos.
- **Tubos de transferencia:** Son tubos de longitud normalizada por TEMA cuyo diámetro nominal corresponde a su diámetro exterior y su espesor varía según el calibrador BWG del tubo.



1. Coraza
2. Espejo
3. Tubos de transferencia
4. Tapa abombada
5. Tapa plana
6. Canal de distribución
7. Cabezal flotante
8. Brida
9. Boquillas
10. Placa divisoria
11. Mampara
12. Varilla tensora

Figura 1.- Partes constitutivas de un cambiador de calor.

CAPITULO 1.

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES.

1.1 Información requerida.

Los conocimientos que necesita el diseñador de cambiadores de calor para una correcta selección de materiales deben ser cada vez más amplios, ya que durante los últimos años la selección de materiales ha asumido una gran importancia y, más aún, debe estar en evaluación continua. En efecto, la aparición de nuevos materiales es frecuente mientras que decrece la disponibilidad de otros. Otras limitaciones las imponen la preocupación relativa a la contaminación ambiental, reciclado, la higiene y seguridad de la mano de obra. Además, el afán por reducir peso y ahorrar energía puede dictar el uso de materiales diferentes. También promueven una reevaluación de materiales, las presiones de la competencia nacional o extranjera, las exigencias de calidad, duración y las reacciones del mercado.

La relación de los materiales y su proceso de elaboración también debe ser considerada, ya que muchas veces, la aparición de nuevos procesos obliga a reconsiderar los materiales en uso. Por lo tanto, para lograr resultados satisfactorios con costos moderados y excelente calidad, es indispensable que los ingenieros tanto de proyectos como de fabricación ejerzan el máximo de cuidado al seleccionar, definir y utilizar materiales.

Para efectuar la selección de materiales de los diferentes elementos constitutivos de los cambiadores de calor, se requiere de la siguiente información:

- *Diagrama de flujo de proceso.* Que es la representación esquemática de cada uno de los equipos de proceso y su interrelación, mostrándose los elementos básicos de control del proceso y un cuadro sinóptico del balance de materia y energía.
- *Balance de materia y energía.* Este documento incluye condiciones de operación, flujos y composición de las corrientes indicadas en el diagrama de flujo de proceso, conteniendo también la concentración de los componentes de las corrientes.
- *Información de proceso para el diseño de cambiadores de calor.* Este documento contiene la información de proceso necesaria para efectuar el diseño de cambiadores de calor, indicando número de equipos, condiciones de operación y de diseño, carga térmica, sobrediseño requerido, factores de ensuciamiento y materiales de construcción propuestos, indicando las sustancias corrosivas que existen en las corrientes de proceso.
- *Hoja de datos de cambiadores de calor.* En estas hojas están contenidos los resultados del diseño térmico, necesarios para efectuar el diseño mecánico de los cambiadores de calor.

Contiene además los materiales propuestos para cada uno de los elementos principales del cambiador.

- *Condiciones de operación.* Las condiciones de operación se obtienen de los documentos antes mencionados, la información requerida de las condiciones de operación es la siguiente:
- Características del fluido de operación.
- Velocidad del fluido.
- Presión y temperatura.
- Variaciones en las condiciones de operación.

1.2 Características del material.

Cuando se selecciona un material, el ingeniero debe asegurarse de que sus propiedades tanto físicas como mecánicas sean las adecuadas para asegurar la durabilidad, confiabilidad y buen funcionamiento del equipo.

1.2.1 Propiedades físicas.

- *Densidad.* La densidad es la masa por unidad de volumen del material, normalmente expresada en g/cm^3 . Esta propiedad es importante ya que se debe tomar en cuenta el peso del equipo, pues un material con mayor peso, provoca que el costo del equipo sea más elevado. se haga más difícil su transportación, su cimentación, etc.
- *Conductividad térmica.* Es una medida de la intensidad con la cual el calor se transmite a través del material. La conductividad térmica relaciona el calor transmitido a través de una determinada sección por unidad de tiempo cuando existe un gradiente de temperatura. Es de esperar que a temperaturas elevadas se incremente la rapidez de la transferencia de calor. En los metales, la conductividad térmica a menudo decrece inicialmente con la temperatura, se vuelve casi constante y después se incrementa ligeramente. Esta propiedad juega un papel importante en el funcionamiento del cambiador, por lo que es preferible un material con coeficiente de conductividad térmica elevado.
- *Coefficiente de expansión térmica.* Es el cambio que sufren las dimensiones del material por unidad de longitud. Está directamente relacionado con los cambios de temperatura, es decir, que los materiales que tienen una alta temperatura de fusión, poseen un bajo coeficiente de expansión térmica. Como se puede ver, este coeficiente es importante en la selección de materiales, ya que un cambiador de calor trabaja con fluidos que tienen diferentes temperaturas, las cuales pueden ser muy elevadas, lo cual provoca que las dimensiones del equipo cambien en forma considerable. Por lo que existen algunas alternativas que

compensan la expansión térmica sin que se presenten deformaciones graves. Una de ellas es la de implementar un cabezal flotante el cual absorbe las expansiones y contracciones del haz de tubos. Otra medida que se adopta es la de usar juntas de expansión, las cuales se utilizan en equipos con espejos fijos, y cuyo objetivo es el de absorber las expansiones y contracciones que sufre el haz de tubos.

1.2.2 Propiedades mecánicas.

Son características que tienen los materiales cuando están sometidos a la acción de esfuerzos y deformaciones. Debido a que los cambiadores de calor se encuentran sometidos a condiciones de temperatura y presión, las propiedades mecánicas de los materiales que deben tomarse en cuenta son:

- *Límite elástico.* Es el esfuerzo máximo que puede soportar un material antes de que se deforme plásticamente, (figura 2). Como se mencionó anteriormente, un cambiador de calor está sometido a condiciones de presión y temperatura, por lo que debe asegurarse que el material no se deforme plásticamente durante la operación del equipo por tal motivo, es necesario que este tenga un límite elástico elevado.
- *Punto de fluencia o cedencia (S_Y).* Se presenta cuando ocurre un incremento notable en la deformación sin un incremento en el esfuerzo (figura 2). Debido a que este punto es difícil de detectar, la ASTM American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Ensayo en Materiales) ha adoptado por convención, localizarlo a una deformación de .002 pulg/pulg. Esto es, en el diagrama esfuerzo-deformación del material, se traza una línea recta paralela a la primera porción del diagrama con origen en .002 pulg/pulg hasta intersectar con la curva del diagrama. Al punto de intersección se le conoce como punto de fluencia. Para fines prácticos, el punto de fluencia representa la transición entre la zona elástica y plástica.
- *Resistencia máxima a la tensión (S_T).* Es el esfuerzo máximo que puede soportar un material sin fracturarse. Se determina al dividir la carga máxima entre el área transversal original del elemento.

$$S_T = \frac{P_{max}}{A_0}$$

Donde:

P_{max} = Carga máxima.

A_0 = Área transversal original del elemento.

Como se aprecia en la figura 2, a partir de este punto, el material continúa deformándose pero con un esfuerzo menor, hasta llegar al punto de ruptura. Esta propiedad es muy importante en todo diseño de ingeniería, más aun en el diseño de cambiadores de calor donde el material está sujeto a cargas de tensión y condiciones de cargas estáticas.

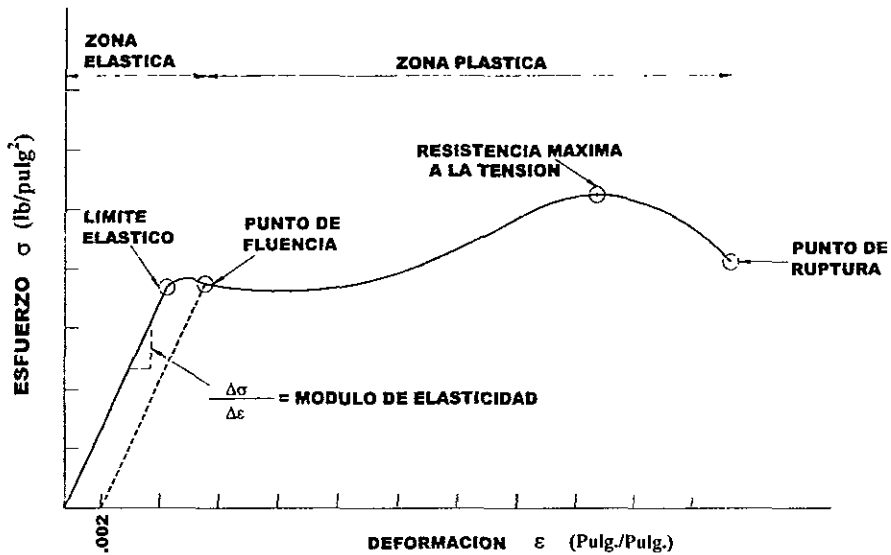


Figura 2.- Diagrama Esfuerzo – Deformación.

- *Módulo de elasticidad (E).* Es una propiedad inherente de cualquier material, que mide la magnitud de su rigidez. Esta propiedad es muy importante para el diseño de los diferentes componentes de un cambiador de calor ya que es necesario que su deformación sea lo más pequeña posible. El módulo de elasticidad es una relación entre el esfuerzo y la deformación en la zona elástica (figura 2). Un material tiene una rigidez elevada cuando su deformación en la zona elástica es relativamente pequeña. Por ejemplo, la deformación de un elemento de acero es menor que la de un elemento de aleación de aluminio sujeto a las mismas condiciones de esfuerzos. Esto se debe a que el módulo de elasticidad del acero es tres veces mayor que el del aluminio. Por lo que, un material con un módulo de elasticidad elevado sufre una deformación menor que aquel que tiene un módulo de elasticidad más pequeño.

- *Ductilidad* Es la capacidad que tiene un material a cambiar de forma sin fracturarse. El diseñador de cambiadores de calor prefiere que sus componentes sean de un material que presente al menos cierta ductilidad, de manera que si el esfuerzo aplicado es demasiado alto, el componente se deforme plásticamente antes de romperse. Esta propiedad se puede medir de dos maneras, una es mediante el porcentaje de elongación que puede sufrir el material antes de romperse y la segunda es mediante el porcentaje en la reducción del área de su sección transversal. Por otra parte, es frecuente calentar el material a altas temperaturas para mejorar su ductilidad durante las operaciones de formado.

Otro factor a considerar dentro de las propiedades que debe cumplir un material para asegurar un tiempo de vida largo y un buen funcionamiento es la resistencia a la corrosión.

- *Resistencia a la corrosión.* Los materiales para la construcción de cambiadores de calor deben ser resistentes a diferentes formas de corrosión, las cuales se pueden presentar antes o durante la operación del equipo. Por ejemplo, algunos manejan agua de río, de mar o agua reciclada de torres de enfriamiento. La composición de este tipo de agua varía debido a diferentes factores, tales como: el medio ambiente, posibles accidentes, etc., por lo que debe contar con protección adecuada contra la corrosión.

La resistencia a la corrosión es particularmente difícil de controlar debido a que el equipo está expuesto al ataque por parte de dos medios diferentes.

1.3 Costo de materiales.

En muchas ocasiones, el aspecto económico es el factor dominante para la elección entre varios materiales que satisfacen los mismos requerimientos de proceso.

A pesar de que el costo no es un requisito de servicio, forma parte del proceso de selección tanto por el precio del material, como por el costo de su elaboración, ya que a un alto costo del material le corresponde un alto costo de fabricación.

Por otra parte, debido a las fuertes presiones de competencia y mercado, las consideraciones económicas son tan importantes como las tecnológicas. Sin embargo, cabe señalar que el costo no debe ser considerado sino hasta que el material haya mostrado las propiedades adecuadas para los requerimientos y necesidades del equipo. Con frecuencia, la última decisión demandará un compromiso balanceado entre costo, producción y comportamiento en servicio o calidad.

A menudo, los costos de materiales son reportados en 2 formas: 1) en dólares por libra y 2) en dólares por unidad de peso. Cabe señalar que si el equipo tiene una combinación de estas dos formas, el análisis de costos deberá estar basado en el costo por unidad de volumen.

La densidad del material es una propiedad muy importante en el análisis del costo de materiales, ya que esta propiedad está directamente relacionada con el peso del material y por ende con el costo del mismo. Por lo tanto, es recomendable que el material seleccionado tenga una densidad relativamente baja.

1.4 Características de fabricación.

Durante el proceso de selección de materiales, la consideración de las posibles operaciones de fabricación de cada material es muy importante, ya que es imprescindible la familiaridad con las alternativas de fabricación, además de un conocimiento de los factores que las acompañan; tales como rentabilidad, calidad, acabado superficial, precisión, etc. Cabe mencionar, que no todos los procesos de fabricación son compatibles con todos los materiales, ya que algunos condicionantes de fabricación tienden a limitar la utilización de ciertos materiales y viceversa. Por lo tanto, se debe llegar a una combinación de material y proceso de fabricación que sea la solución óptima para el producto específico, ya que los procesos de fabricación influyen en las propiedades de los materiales, lo cual puede traer como consecuencia un mal funcionamiento del equipo.

Por otra parte, durante la fabricación, los materiales se someten a diversos procesos de maquinado, formado y soldadura; debido a lo anterior, es necesario tomar en cuenta las *facilidades o dificultades que se presentan durante dichos procesos de manufactura.*

Soldabilidad. Los materiales utilizados para la construcción de cambiadores de calor deben tener buenas propiedades de soldabilidad, debido a que gran parte de sus elementos constitutivos son de construcción soldada. En el caso de que se tengan que soldar materiales diferentes, estos deberán ser compatibles en lo que a soldabilidad se refiere.

Para materiales con elementos de aleación, se deben tener mayores precauciones durante los procedimientos de soldadura, de tal manera que se conserven las características que proporcionan los elementos aleantes.

Maquinabilidad. Es necesario maquinar ciertos elementos constitutivos, como es el caso de las bridas, espejos, tapas planas, etc. Para darles la forma, dimensiones y acabado requeridos.

La fabricación de determinado elemento, resultará de mayor costo si se utilizan materiales difíciles de maquinar, ya que se requieren procedimientos y herramientas especiales.

Se tiene un índice de maquinabilidad que indica la relativa facilidad con la

que un material puede ser cortado y maquinado. En el caso de los aceros, se suele considerar como valor de maquinabilidad del 100 % al acero AISI

B 1112 estirado en frío que se corta con herramienta de acero de alta velocidad y empleando aceite de corte adecuado. El latón de fácil maquinado es una referencia para las aleaciones de cobre.

Formabilidad. Ciertos elementos, como la envolvente, canal, tapas, etc., son sometidos a procesos de rolado y formado, siendo necesario evaluar la facilidad de los materiales a ser sometidos a dichos procesos.

Las características de formabilidad de los materiales están en función del tamaño de grano que presenten. Es recomendable un grano fino en los materiales que van a ser formados.

El tratamiento térmico de normalizado le imparte propiedades de formabilidad a los materiales.

Dependiendo del tipo de material y del espesor, el formado de placas puede ser en frío o en caliente.

1.5 Disponibilidad de materiales.

La adquisición de materiales, la cual depende del mercado de materiales, es también de suma importancia, debido a que en muchas ocasiones se solicitan materiales especiales para ciertos ambientes corrosivos, pero si no se toma en cuenta el factor mercado, puede alargarse el tiempo de entrega debido a que en muchas ocasiones la gran mayoría de estos materiales son difíciles de obtener porque tienen que ser importados, lo que ocasiona un incremento en los costos, retrasos en la construcción del equipo y en ocasiones se llega a entorpecer la operación y mantenimiento de la planta.

Por tal motivo, es recomendable que el diseñador busque los materiales equivalentes en el mercado nacional, para que de esta manera su adquisición sea lo más rápido posible, disminuyan considerablemente los costos y el fabricante pueda garantizar tiempos de entrega más cortos.

1.6 Requerimientos de operación y mantenimiento.

Los requerimientos de operación que deben tomarse en cuenta son: las cargas actuantes sobre el equipo, (las cuales se deben a diferentes factores tales como la temperatura, la presión y el propio peso del equipo), la vida estimada del equipo y la variedad de materiales.

- *Carga.* Cada uno de los elementos que integran a un cambiador de calor está sujeto a cargas internas y externas, por lo que el diseñador debe tener siempre en mente que el tipo de

fuerza o carga que actúa en el material, puede cambiar radicalmente su comportamiento. Generalmente, el punto de fluencia es la propiedad más crítica y suele ser la consideración más importante en el diseño de un elemento.

Un material con alto punto de fluencia puede fallar fácilmente con cargas menores si la carga es cíclica (fatiga) o se aplica súbitamente (impacto). Por esto, es importante que el diseñador reconozca el tipo de carga a la que se somete el elemento. Las cargas más importantes que actúan sobre un cambiador de calor son causadas por:

- *Altas Temperaturas:* Las propiedades mecánicas de los materiales a temperatura ambiente, presentan valores que sufren cambios cuando se incrementa la temperatura, por lo que se deben tener en cuenta las siguientes propiedades: resistencia máxima a la tensión y punto de fluencia, ya que disminuyen en función del incremento de la temperatura, con lo que también disminuyen los esfuerzos permisibles, la dureza y la fragilidad, mientras que la tenacidad, maleabilidad y ductilidad aumentan. Por esta razón, se justifica el trabajo de los materiales en caliente, ya que es más fácil deformarlos a altas temperaturas sin que lleguen a fracturarse.
- *Bajas Temperaturas:* La disminución en la temperatura también ocasiona variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales, siendo las más importantes: la resistencia máxima a la tensión y el punto de fluencia que aumentan junto con la dureza, mientras que la tenacidad, ductilidad y maleabilidad disminuyen. El cambio de ser tenaz a frágil, causado por baja temperatura es el más peligroso en las propiedades de los materiales, ya que en algunos se presenta en forma brusca, existiendo por consecuencia la posibilidad de fractura originada por choque o alguna concentración de esfuerzos.
- *Presión.* Los cambiadores de calor están sometidos a presiones internas y externas, por lo que deben diseñarse para resistir las fuerzas de tensión que se originan debido a la presión interna. Esto, no causa variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales, pero para resistir los esfuerzos generados, el material debe poseer una buena resistencia a la tensión. Por lo tanto, se considera a la presión como un factor generador de cargas muy importante para el cálculo de espesores de los distintos componentes del cambiador y de cualquier recipiente en general. Por tal motivo, el diseñador debe tener bien claro que los materiales que tienen baja resistencia a la tensión, requieren de un gran espesor, lo que implica la utilización de una mayor cantidad de material para la fabricación del elemento y por ende un aumento en el costo de fabricación. Para el cálculo de los espesores, se deben utilizar como datos la presión de diseño y los esfuerzos permisibles a la temperatura de diseño, estos últimos especificados en el código ASME Sección VIII, División 1.

- *Peso del equipo.* Algunas fallas comunes que se presentan en los cambiadores de calor se deben a grietas que se originan por efecto de la deformación, la cual se va desarrollando durante las etapas de fabricación, montaje y operación.

Todos los recipientes esféricos y cilíndricos son bastante eficientes desde el punto de vista estructural para soportar fluidos a presión, debido a su configuración geométrica. Sin embargo, es debido a esta configuración, que no están acondicionados para resistir los efectos de cargas concentradas, las cuales en ocasiones son el origen de los problemas de corrosión por la concentración de esfuerzos. Por lo tanto, durante la etapa de diseño, se debe tomar en cuenta el peso en operación y las reacciones que se provocan en los soportes, para hacer una correcta localización de estos elementos y con esto evitar la fatiga en el equipo.

- *Vida estimada del equipo.* Este es otro factor que no debe pasarse por alto en la selección de materiales, ya que generalmente, un equipo de proceso se proyecta para un determinado tiempo de vida útil, lo cual sirve como base para establecer un criterio sobre la clase de materiales a utilizar. Por ejemplo, para las envolventes, el tiempo de vida estimado es de 20 años, mientras que para el haz de tubos es de 5 a 10 años.
- *Variedad de materiales.* Es recomendable evitar demasiada variedad de materiales y tratar de usar hasta donde sea posible materiales idénticos para diferentes servicios.

En lo relativo al mantenimiento, este se debe llevar a cabo a intervalos regulares con la frecuencia que la experiencia indique con el propósito de evitar bajas eficiencias en los equipos debido al ensuciamiento en los tubos de transferencia. Por tal motivo, se debe efectuar la limpieza de los tubos, ya sea por medios mecánicos o químicos, siendo estos últimos los más importantes a considerar en la selección de materiales, ya que para efectuar este tipo de limpieza, se utilizan soluciones altamente corrosivas como las de ácido sulfúrico, lo que obliga al diseñador a seleccionar materiales resistentes al ataque corrosivo producido por estas soluciones.

1.7 Formas de corrosión.

1.7.1 Corrosión uniforme.

La corrosión uniforme se caracteriza por la pérdida uniforme de material en la superficie corroída. De alguna u otra forma, todos los metales sufren este tipo de corrosión bajo ciertas circunstancias.

De ser inevitable, se dice que este tipo de corrosión es el más deseable, ya que cuando se presenta, se puede predecir con cierta exactitud la vida de los equipos a diferencia de las formas localizadas de corrosión, como la corrosión por picadura o corrosión bajo esfuerzos.

La corrosión uniforme se debe a una reacción química o electroquímica uniforme que se extiende sobre la superficie del metal. Si se usa el microscopio, no se puede distinguir entre una zona puramente anódica o catódica.

Este tipo de ataque se encuentra principalmente donde el metal está en contacto directo con una atmósfera ácida, húmeda o en cualquier solución en general. Sin embargo, la presencia de tales condiciones no es esencial. Por ejemplo, a una temperatura elevada, el fenómeno de oxidación, también se caracteriza por un ataque uniforme, aunque este ocurra en un ambiente virtualmente seco.

Ocasionalmente, es práctico y económico utilizar inhibidores para reducir al mínimo la corrosión, o bien en casos plenamente justificados, variar las condiciones de operación.

Para metales sujetos a corrosión uniforme durante su servicio, se establecen los siguientes rangos:

1. Satisfactorio. Velocidad de corrosión menor a 0.127 mm/año (5 mpy). Los metales en esta categoría son apropiados para la fabricación de partes críticas, tales como tubos de transferencia.
2. Adecuado. Velocidad de corrosión de 0.127 a 0.508 mm/año (5 a 20 mpy). Los metales que comprenden este rango son apropiados para la fabricación de partes donde puede admitirse un rango de corrosión previsto desde el diseño, como es el caso de la coraza, canal, tapas, boquillas y partes estructurales.
3. No recomendable. Velocidad de corrosión mayor a 0.508 mm/año (20 mpy).

Como ejemplo de daño por corrosión uniforme, en la Figura 3 se muestra un tubo de transferencia fabricado de titanio, perteneciente a un condensador de carbonato de amonio.

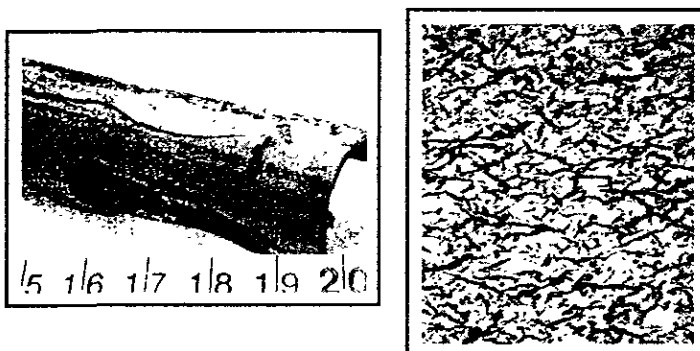


Figura 3.- Corrosión uniforme.

Como se puede observar, el elemento falló debido al agrietamiento por corrosión uniforme, pues el espesor del tubo se redujo de 3 a 1 mm, lo que provocó el agrietamiento. El tiempo aproximado en que se presentó la falla fue de cinco años. Los fluidos que se manejaron fueron: agua de enfriamiento por la parte exterior de los tubos y por el interior de los mismos, carbonato de amonio. La recomendación en este caso consiste en reducir la temperatura al reciclar el condensado de carbonato de amonio, o bien, utilizar acero inoxidable tipo dúplex (.03%C, 22%Cr, 5.5% Ni, 3.2%Mo “Sandvik” SAF 2205 UNS S31803).

1.7.2 Corrosión galvánica.

En términos generales, la corrosión galvánica se presenta cuando dos metales con propiedades diferentes entran en contacto por medio de un electrolito. En estas circunstancias, las dos partes del metal constituyen lo que se denomina una “celda galvánica”, en la que la parte con menor potencial electroquímico (o metal activo) se corroe. Al mismo tiempo, la parte de metal más noble, o sea con el mayor potencial electroquímico, funcionará como cátodo y se protegerá de la corrosión. En la tabla 1 se muestra la serie galvánica de los materiales comúnmente utilizados.

Si la superficie del metal menos noble es pequeña, se produce una alta densidad de corriente y se acelera la corrosión anódica. Cuando se tiene una superficie mayor del metal menos noble con relación al otro metal, se produce una densidad de corriente relativamente baja y la corrosión anódica sólo se acelera ligeramente.

En general, el grado de ataque por corrosión galvánica depende principalmente de los siguientes factores:

- Diferencia de potencial electroquímico entre los metales involucrados (tabla 1).
- Relación entre las superficies de contacto.
- Características del electrolito.

A continuación se indican algunas recomendaciones para el control de la corrosión galvánica:

1. Evitar en lo que sea posible, el uso de materiales diferentes.
2. Evitar exponer a un ambiente electrolítico áreas anódicas pequeñas en relación con las áreas catódicas.
3. Cuando se utilicen materiales diferentes, emplear recubrimientos.
4. Instalar ánodos de sacrificio para proteger las áreas anódicas del equipo.

Como ejemplo del daño por corrosión galvánica, en la figura 4 se muestra un cabezal de distribución (canal de entrada), fabricado en acero al carbono recubierto de cuproníquel 90-10, de un enfriador de etileno. Se observa severa corrosión galvánica que se produjo al remover el recubrimiento durante las maniobras de mantenimiento del haz de tubos. Se recomienda en este

caso utilizar únicamente recubrimiento en la brida canal a espejo, introduciendo ánodos de sacrificio de magnesio.

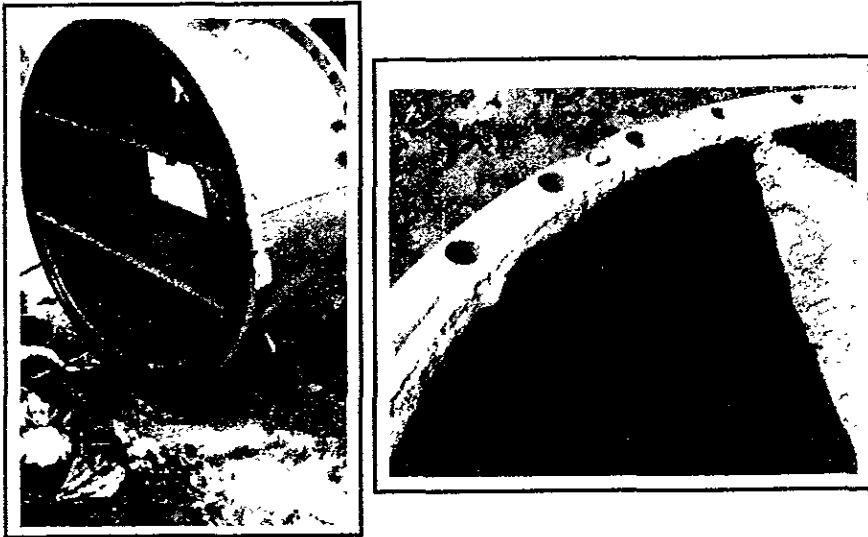
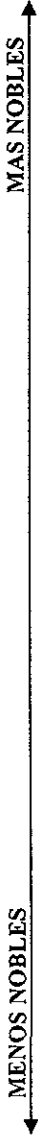


Figura 4.- Corrosión galvánica.

Tabla 1.- Serie galvánica.

Extremo protegido (catódico)	
 <p>MAS NOBLES</p> <p>MENOS NOBLES</p>	Platino
	Oro
	Grafito
	Plata
	Acero inoxidable tipo 316 (pasivo)
	Acero inoxidable tipo 304 (pasivo)
	Titanio
	Acero inoxidable tipo 410 (pasivo)
	Monel
	Inconel (pasivo)
	Níquel (pasivo)
	Bronce
	Aleaciones Cu-Ni
	Bronce al Silicio
	Cobre
	Latón rojo
	Latón al aluminio
	Latón admiralty
	Latón amarillo
	Aleaciones Ni-Mo-Fe-Mn
	Inconel (activo)
	Níquel (activo)
	Latón naval
	Bronce al manganeso
	Metal muntz
	Estaño
	Plomo
Soldadura Pb-Sn	
Acero inoxidable tipo 316 (activo)	
Acero inoxidable tipo 304 (activo)	
Acero inoxidable tipo 410 (activo)	
Hierro fundido	
Hierro forjado	
Acero al carbono	
Aluminio 2024	
Cadmio	
Aluminio 6053	
Aluminio 1100	
Acero galvanizado	
Zinc	
Aleaciones de magnesio	
Magnesio	
Extremo corroído (anódico)	

1.7.3 Corrosión bajo esfuerzos.

Este tipo de corrosión se presenta al combinarse la acción de esfuerzos de tensión y un medio ambiente corrosivo, además de ser muy difícil de predecir, ya que el equipo puede trabajar adecuadamente por algún tiempo y de repente sin advertencia o deformación alguna, puede fracturarse.

La corrosión bajo esfuerzos se caracteriza por fisuras ramificadas e intergranulares. Este ataque se intensifica en zonas cercanas a soldaduras, si el material ha sido sensibilizado debido a la temperatura alcanzada durante el proceso de soldadura o debido a la temperatura de operación.

Las fuentes principales de esfuerzos localizados y elevados en el material se presentan durante el proceso térmico, la fabricación y operación.

El agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos se favorece al encontrarse presentes iones específicos como impurezas en el medio ambiente en el que opera el material.

El fenómeno de corrosión bajo esfuerzos se puede prevenir o reducir, al aplicar uno o más de los siguientes métodos:

1. Reduciendo el valor de esfuerzos residuales a un nivel mínimo.
2. Eliminando los compuestos nocivos del medio ambiente.
3. Cambiando la aleación.
4. Utilizando inhibidores.

Como ilustración del daño por corrosión bajo esfuerzos, en la figura 5 se muestra una sección de la tubería de alimentación fabricada en acero inoxidable (AISI 304, 18Cr-8Ni) de un condensador de vapor.

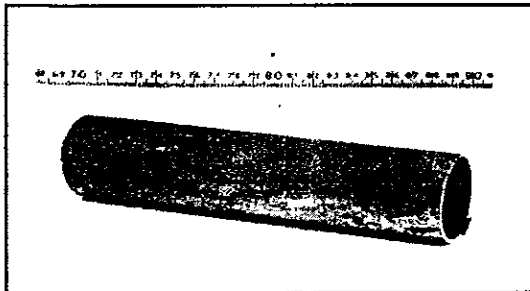


Figura 5.- Corrosión bajo esfuerzos

La falla se debió principalmente a que por el interior de la tubería fluja condensado libre de sales a una temperatura de 95 °C (203 °F), mientras que su superficie externa se encontraba expuesta a agua de lluvia con alto contenido de cloruro, la cual se concentró en la periferia del tubo y se evaporó sobre el lado caliente del mismo. Una solución al problema sería recubrir al tubo con aluminio y posteriormente aislarlo, ya que el aluminio da protección catódica al acero inoxidable.

1.7.4 Corrosión en grietas o hendiduras.

Este es un tipo de corrosión intensa localizada que provoca grietas entre dos superficies de las cuales al menos una de ellas es un metal.

Generalmente, la corrosión en grietas o hendiduras se debe a los efectos producidos por una celda de concentración de oxígeno. Sin embargo, este tipo de corrosión también se debe a los cambios de acidez en la grieta, el refuerzo de iones o desgaste de algún inhibidor.

Este tipo de corrosión generalmente se puede observar en materiales como el acero inoxidable en servicios con soluciones de cloruro, donde no existen celdas de concentración de oxígeno.

Por otra parte, este tipo de ataque está generalmente asociado con pequeños volúmenes de solución estancados causados por agujeros, superficies de juntas a traslape, depósitos superficiales y hendiduras bajo tuercas y cabezas de remache.

Algunas recomendaciones para la protección en contra de este tipo de corrosión son las siguientes:

1. Diseñar equipos con conexiones para drenado. Drenar el equipo regularmente y remover los depósitos.
2. Evitar diseños con áreas de estancamiento. En el caso en donde no sea posible evitar estos diseños, es recomendable reducir al máximo las grietas o hendiduras, especialmente en áreas de transferencia de calor.
3. Utilizar juntas soldadas en lugar de juntas apernadas o remachadas. Verificar que las soldaduras sean de penetración completa y evitar la presencia de porosidades. Evitar al máximo las grietas en juntas a traslape mediante la utilización de soldadura continua.
4. Para el caso de los cambiadores de calor, evitar que el material de los empaques sea fibroso o absorbente.
5. Seleccionar materiales resistentes a este tipo de corrosión donde el ambiente de trabajo así lo requiera. En algunos casos, la utilización de inhibidores puede ser de gran ayuda.

Como ejemplo de fallas causadas por este tipo de corrosión, en la figura 6 se muestran las placas fabricadas en acero inoxidable AISI 316 16Cr-10Ni-2Mo de un enfriador de aceite.

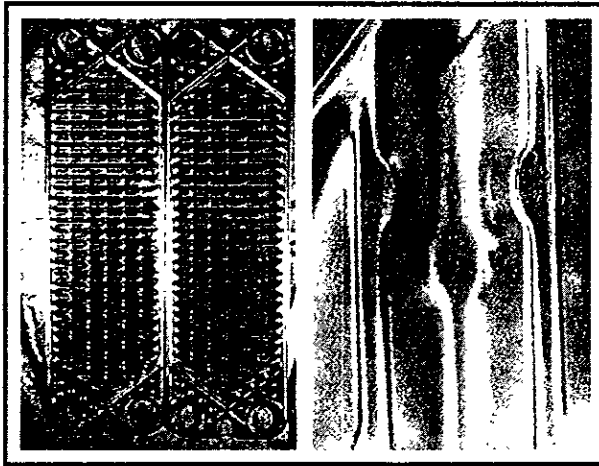


Figura 6.- Corrosión en grietas o hendiduras

Este cambiador estuvo expuesto a un ambiente con alto contenido de oxígeno en el cual el agua contenía 100 p.p.m de cloruros.

La causa de corrosión se debió principalmente a la presencia de hendiduras en los puntos de presión de las placas del cambiador de calor. El tiempo aproximado de falla fue de 1 año.

Una posible solución es la construcción de placas de titanio o si el presupuesto lo permite, utilizar un cambiador de calor de tubos y coraza.

1.7.5 Corrosión por picadura.

Es una forma extrema de ataque localizado, el cual da como resultado la formación de cavidades o agujeros en la superficie del metal. Estos agujeros pueden ser grandes o pequeños en relación con su diámetro, pero la mayoría de ellos son pequeños.

Generalmente, la superficie más grande del metal permanece libre de corrosión, mientras que la corrosión en los agujeros penetra significativamente el espesor de la pared del metal.

Este tipo de ataque ocurre generalmente en aceros inoxidables y aleaciones de aluminio expuestas a soluciones que contienen cloruros. Sin embargo, existen otros metales que también son sensibles a este tipo de corrosión. Otras causas de este tipo de corrosión son las siguientes:

- La corrosión por picadura ocurre cuando alguna capa protectora se rompe localmente. Después de esta ruptura se da la formación de un ánodo, mientras que la capa protectora que

no sufre ruptura actúa como cátodo. Este hecho acelera el ataque localizado, lo que provoca la picadura en la superficie del metal en el lugar donde se encuentra el ánodo. Es decir, el electrolito que se forma en el agujero acelera el mecanismo de corrosión.

- Cloruros. Generalmente, la picadura se genera a través de iones de cloro. Estos iones son agentes muy agresivos que provocan la destrucción de las capas protectoras, lo que da lugar a la picadura del metal.

Algunos métodos de prevención son los siguientes:

1. Seleccionando materiales resistentes a este tipo de ataque.
2. Controlando el ambiente químico; por ejemplo, monitorear los niveles de contaminación de cloruro y eliminar el oxígeno u otros agentes que aumenten el potencial electroquímico.
3. Utilizando protección catódica.

Como ejemplo de corrosión por picadura, en la figura 7 se muestra un tubo de transferencia fabricado de acero inoxidable AISI 430 $87\text{Fe}-11\text{Cr}-0.12\text{C}$ de un enfriador de gas.

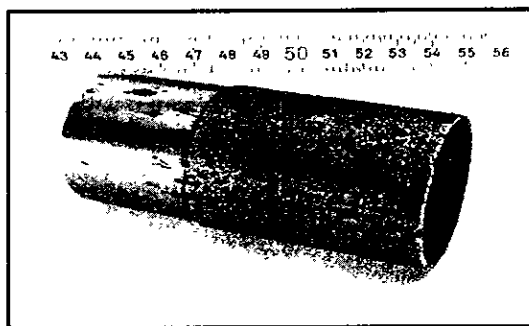


Figura 7.- Corrosión por picadura.

La causa de corrosión se debió principalmente a que el material utilizado para la construcción del tubo de transferencia no es lo suficientemente resistente al contenido de cloro del agua de enfriamiento, que fluía por el exterior del tubo con 100 p.p.m de cloruros. Por el interior del mismo fluía gas a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($392\text{ }^{\circ}\text{F}$).

El tiempo aproximado en que se presentó la falla fue de 1 año.

1.7.6 Corrosión intergranular.

Este tipo de corrosión se asocia generalmente con aceros inoxidable austeníticos de los tipos 304, 309, 310, 316 y 317 (18Cr-8Ni) que han sido calentados a temperaturas de 482 a 815 °C (899 a 1500 °F) y han sido expuestos a ambientes corrosivos que atacan a lo largo de los límites de grano. Este tipo de ataque puede ocurrir rápidamente y afectar seriamente la resistencia de una aleación. Cuando es muy severo, se producen disminuciones en la resistencia y ductilidad, las cuales normalmente se encuentran en desproporción con respecto a la cantidad de material que se desgasta o deteriora.

Bajo ciertas condiciones, los límites de grano son muy reactivos, lo que da como resultado la corrosión intergranular. Por ejemplo, cuando los aceros inoxidable son calentados en el rango de 482 a 816 °C, el carburo $Cr_{23}C_6$ se precipita en los límites de grano por lo que disminuye el contenido de cromo de las regiones adyacentes y se dice que el acero se ha sensibilizado y queda susceptible a la corrosión en los límites de grano.

Otros tipos de aceros inoxidable que están expuestos a este tipo de corrosión son los tipos 321L y 347L, así como los grados con bajo contenido de carbono como los tipos 304L y 316L, los cuales tienen un contenido máximo de carbono del 0.03 %.

Algunos tratamientos térmicos pueden mejorar la resistencia a este tipo de corrosión. Sin embargo, en algunos casos, estos no son recomendables para recipientes a presión, tanques o accesorios para tuberías debido a la deformación resultante del calentamiento y enfriamiento no uniformes.

Los ambientes alcalinos son otra causa de corrosión intergranular, generalmente sobre aceros inoxidable y aleaciones de níquel.

Cabe señalar que la corrosión intergranular es difícil de detectar a simple vista, por lo que es necesario la utilización de un microscopio que ayude a visualizar la penetración a lo largo de los límites de grano.

Algunos métodos de prevención son los siguientes:

1. Seleccionar aleaciones de bajo carbono para aceros inoxidable o aleaciones de níquel en servicios corrosivos.
2. Seleccionar aleaciones con pequeños contenidos de titanio o niobio, ya que esto produce que el contenido de cromo se quede en la matriz del metal y así, evitar la corrosión.

Como ejemplo de corrosión intergranular, en la figura 8 se muestra un tubo de transferencia fabricado en acero inoxidable para un condensador de ácido nítrico.

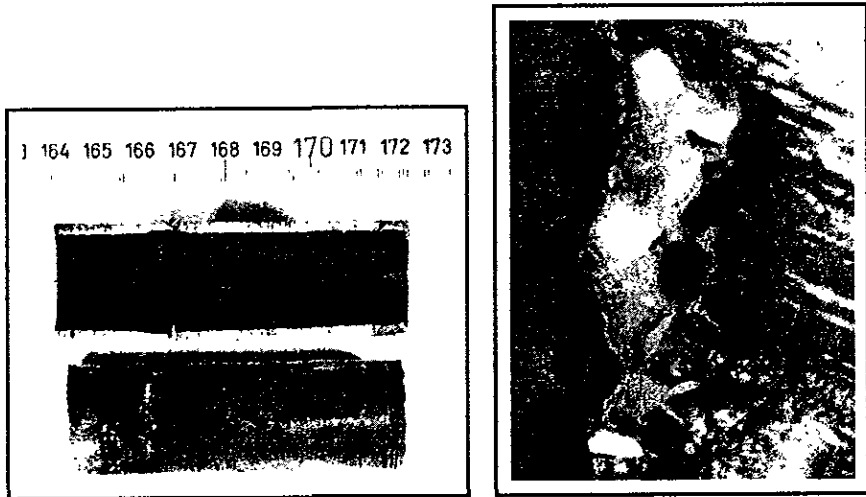


Figura 8.- Corrosión intergranular.

Esta falla se debió a que el material es susceptible a la corrosión intergranular bajo estas condiciones de operación; además, la soldadura contenía inclusiones tal y como se puede observar en la misma figura. El tiempo aproximado de falla fue de 6 meses.

Para remediar esta situación se recomienda utilizar tubos de titanio.

1.7.7 Ataque selectivo.

Es la separación de un elemento de una aleación sólida por un proceso de corrosión. El mejor ejemplo es la remoción selectiva del cinc en los latones, mejor conocida como descincificación. Por ejemplo, los latones (aleaciones Cu-Zn) que contienen menos de 85 % de cobre y están expuestos a condiciones de humedad por periodos de tiempo prolongados, disminuyen su resistencia a este ataque.

Algunos métodos de prevención son los siguientes

1. Disminuir la agresividad del medio ambiente.
2. Seleccionar materiales cuyo límite de grano no se vea afectado por este ataque.
3. Seleccionar el tratamiento térmico adecuado.
4. Utilizar protección catódica.

La figura 9 ilustra el daño ocasionado por ataque selectivo; se trata de un tubo de transferencia fabricado de bronce, para un enfriador de agua.

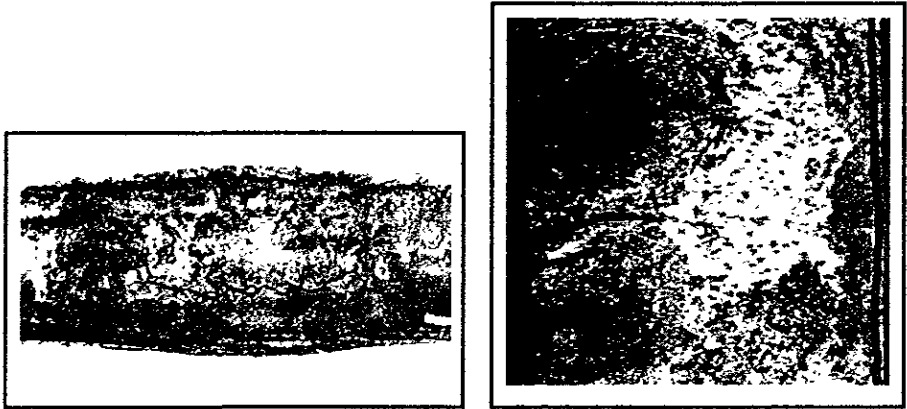


Figura 9.- Ataque selectivo.

Esta falla se debió al contenido de hipoclorito de sodio con un ph excesivamente alto. Se recomienda mejorar el control del contenido de hipoclorito de sodio en el agua.

1.7.8 Corrosión erosión.

La causa de este tipo de corrosión es el movimiento de un fluido corrosivo sobre la superficie de un material, lo que provoca que se remueva la capa protectora de óxido que se forma, quedando el metal totalmente expuesto a la acción corrosiva del fluido.

Este tipo de corrosión aumenta con la velocidad del fluido hasta un cierto límite y varía con el acabado superficial del material.

Puede ocurrir en puntos donde la velocidad es alta o donde existen turbulencias. En el lado de la envolvente, se puede presentar una combinación de daño por choque o por corrosión erosión, por lo que es común instalar una placa de choque en la boquilla de entrada para proteger a los tubos de transferencia.

Las posibilidades de protección, entre otras, pueden ser las siguientes:

1. Seleccionar un material más resistente (generalmente, los materiales con mayor dureza son más resistentes).
2. Cambiar el diseño del equipo (forma, geometría, etc.).

3. Utilizar inhibidores.
4. Aplicar recubrimientos
5. Usar protección catódica.

Como ejemplo de este tipo de corrosión, en la figura 10 se muestra un tubo de transferencia fabricado de bronce naval (70%Cu, 29%Zn 1%Sn) de un condensador de propano.

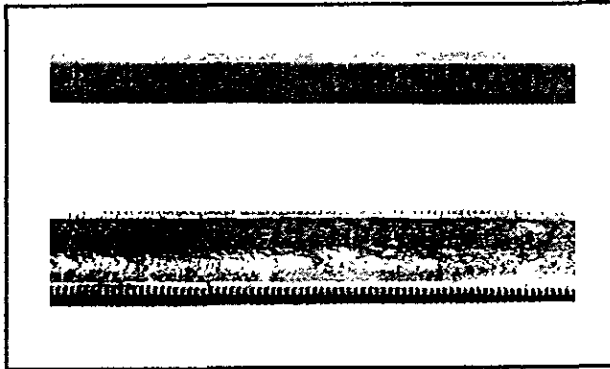


Figura 10.- Corrosión erosión.

La causa de la falla fue que a través de los tubos circulaba agua, la cual fluía a una velocidad de 2.0 m/s. velocidad muy elevada para este tipo de bronce, ya que su velocidad máxima permitida es de 1.5 m/s. Una posible solución es usar tubos de cuproníquel (70Cu-30Ni 30 Fe2 Mn2), ya que este material tiene una velocidad máxima permisible de 3.5 m/s.

1.8 Recomendaciones generales.

Para la selección de materiales, se deben considerar todos los factores tanto de diseño, fabricación, confiabilidad y aspectos funcionales, por lo que el diseñador debe realizar una labor completa de análisis, selección y especificaciones en la etapa de diseño técnico y no dejarla para la etapa de producción o fabricación, en donde otras personas menos conocedoras de los aspectos funcionales del equipo, puedan introducir cambios poco adecuados. Es decir, el diseñador debe definir perfectamente los materiales de cada uno de los elementos constitutivos los cuales sean compatibles con, y elaborados por, los medios existentes y que pueda disponerse de ellos sin retrasos en las cantidades necesarias, con la finalidad de evitar sustitución de materiales cuando la fabricación o producción se encuentre en una etapa avanzada, lo cual

genere problemas con el cliente por retraso en la entrega del equipo y por consiguiente un aumento en el costo de fabricación.

Sin embargo, cabe señalar que no se puede descartar la posibilidad de sustitución de un material de algún elemento constitutivo cuando la fabricación del mismo ya ha iniciado, debido a la aparición de un material nuevo que reduzca los costos y mejore las características funcionales. Por lo anterior, se recomienda que los materiales de nueva aparición sean analizados con mucho cuidado para asegurar que sus características estén perfectamente establecidas, ya que es muy difícil que los datos conocidos acerca de las propiedades y confiabilidad de un material nuevo sean comparables con los relativos a un material en uso actual.

Por otra parte, el diseñador se puede apoyar en equipos con servicios similares y que han estado operando exitosamente, con la finalidad de utilizar los mismos materiales en partes constitutivas similares, aunque debe tenerse mucho cuidado en la variación de las condiciones de servicio tales como presión, temperatura, características del fluido y medio corrosivo, las cuales pueden exigir la utilización de materiales distintos.

Otra recomendación radica en realizar una lista de materiales con todos los factores y las condiciones de servicio ya mencionadas anteriormente, indicando la importancia relativa de cada necesidad, ya que puede ser que algunas de ellas sean críticas y otras no.

Por otra parte, en muchos casos no habrá ningún material que destaque como opción indiscutible, ya que varios materiales cumplirán en distintos grados con las normas y especificaciones requeridas. Es importante realizar una lista con la calificación de las propiedades del material que contribuya a asegurar que quien haya realizado la selección de materiales haya considerado todos los factores necesarios por lo que será de mucha utilidad realizar un formulario comparativo como el que se muestra en la tabla 2.

En este formulario se asigna un coeficiente de calificación en función de su importancia a las distintas propiedades de los distintos materiales sugeridos para cada elemento constitutivo. Después cada material propuesto recibe una puntuación de 1 a 5 para cada propiedad según sea la magnitud de esta, es decir, desde la propiedad más baja hasta 5 a la propiedad más alta. Posteriormente, se multiplican el coeficiente ponderal y el índice calificativo, registrando el resultado en la tabla para cada propiedad del material. Finalmente, se obtiene la calificación del material realizando una división entre las sumatorias del índice de calificación relativo y el coeficiente ponderal o calificativo.

Tabla 2.- Formulario de evaluación para la comparación de materiales.

ELEMENTO CONSTITUTIVO	MATERIAL	ELIMINACIÓN PASA-NO PASA **			INDICE DE CALIFICACIÓN RELATIVO (* IND CALIF. X ***COEF. PONDERAL)								INDICE CALIFICATIVO DEL MATERIAL Σ IND CAL REL. Σ COEF CALIF				
		CORROSIÓN	SOLDAB (AUTOG)	SOLDAB (ARCO)	RESISTENCIA (3)	TENACIDAD (3)	RIGIDEZ (3) ***	ESF. PERMISIBLE (3)	FATIGA (4)	RESISTENCIA (4)	RECIBEN SOLDADO	TENSIONES (3)		TERMICAS	COSTO (2)		
ENVOLVENTE																	
ESPEJOS																	
PLACAS DE TRANSFERENCIA																	
TAPA PLANA																	
TAPA ABOMBADA																	
BRIDAS																	
BOQUILLAS																	
MANIPULADORES																	
PLACAS DIVISORIAS																	
VARILLAS TENSORAS																	
ESPACIADORES																	
PLACA DE CHOQUE																	

* Índice calificativo = de 1, el más bajo, a 5, el más alto.

*** Coeficiente ponderal o calificativo = de 1, el menos importante, a 5, el más importante.

** Código = S = Suficiente

I = Insuficiente

De esta manera, es posible seleccionar el material adecuado para cada elemento en función de la calificación obtenida en el formulario, ya que no se descarta la posibilidad de que para cada elemento existan 2 o 3 materiales de interés de los cuales sólo uno es el que reúne las mejores características para el buen funcionamiento del equipo.

Por otra parte, el formulario permite utilizar un procedimiento totalmente computarizable para la selección de materiales, creando a la vez una gran base de datos con información sobre las propiedades de los materiales más utilizados en el diseño. Así mismo, es una buena herramienta

de apoyo para el diseñador, ya que se pueden resumir todos los requisitos del material en una *simple tabla*, asegurándose así de no pasar por alto ninguna de las condiciones principales y a la vez realizar una adecuada selección de materiales.

CAPITULO 2.

REQUERIMIENTOS DE MATERIALES.

2.1 Materiales recomendados por la norma TEMA.

La norma TEMA, en su edición de 1978, incluían una lista de materiales recomendados para la construcción de cambiadores de calor, la cual estaba en función de la forma de suministro del material y del elemento constitutivo. Sin embargo, en el año de 1998 publicó la séptima edición ampliada y mejorada. Todas las secciones fueron revisadas y enriquecidas con datos que no se tenían en la edición anterior. Además, se incluyeron innovaciones y sugerencias que han sido el resultado de la aplicación de las normas durante varios años tanto por los fabricantes como por los diseñadores de cambiadores de calor de tubos y coraza. Cabe mencionar que varias de estas sugerencias e innovaciones fueron recibidas del American Petroleum Institute (API Instituto Americano del Petróleo) y del ASME.

La norma TEMA en esta nueva edición no incluyen una lista de materiales recomendados, en su lugar toman como aceptables los recomendados en el código ASME, Sección VIII, División II.

Por otra parte, los materiales de construcción para cambiadores de calor se fabrican en formas comerciales que se denominan “formas de suministro”, las cuales son solicitadas mediante las especificaciones de los códigos, tomando en consideración la forma del elemento que ha de fabricarse. Estas formas de suministro son las siguientes:

- Placa.- Se emplea en la fabricación de mamparas, silletas, tapas formadas y planas, placas divisorias, fajas de sello, mamparas de choque, espejos y secciones cilíndricas (corazas y cabezales).
- Forja.- Se emplea en la fabricación de bridas, coples y en algunos casos cuando los espejos y tapas planas cuentan con espesores mayores a 2 ½ pulg.
- Tubos de cédula y calibre.- Los tubos de cédula pueden conseguirse en el mercado desde 1/8 pulg. (3.2 mm), hasta 42 pulg. (1067 mm) de diámetro nominal, el cual no corresponde al diámetro interno o externo real. Son fabricados con costura o sin ella. esto es, soldados o extruídos, de los cuales se prefieren los segundos. Los tubos de cédula se emplean en la fabricación de cuellos de boquillas, espaciadores y secciones cilíndricas como corazas y cabezales cuando no excedan 18 pulg. (457 mm) de diámetro nominal.

Por otra parte, los tubos calibre se fabrican en diámetros nominales desde ¼ pulg. (6.35 mm) hasta 2 ½ pulg. (63.5 mm), que corresponden al diámetro exterior y cada uno de ellos se fabrica con diferentes espesores normalizados. Pueden fabricarse también con o sin costura. Los tubos calibre se emplean normalmente en la fabricación de tubos de transferencia.

- Barra.- Se utiliza para la fabricación de varillas tensoras, espárragos y tornillos.

2.2 Requerimientos específicos para cambiadores de calor de tubos y envolvente.

- Tubos de Transferencia.- Los tubos de transferencia, deberán ser suministrados en condiciones de tratamiento térmico, el cual puede ser: recocido, normalizado o normalizado y templado, de acuerdo como lo especifica ASTM.

Los tubos de transferencia con costura, podrán ser utilizados cuando las condiciones de servicio lo permitan, en este caso, el proveedor deberá inspeccionar cada tubo con "Corrientes de Eddy" y prueba hidrostática antes de instalar los tubos. además de cumplir con todas las pruebas mecánicas y certificaciones indicadas en la especificación ASTM-A-450.

- Esparragos y tuercas.- Los esparragos y tuercas para uniones exteriores deberán estar hechos de materiales bajo la especificación ASTM.

Los esparragos y tuercas para instalar en el interior de los equipos, deben ser de material compatible con el del interior de la envolvente, ya sea material sólido o recubrimiento y apropiado para las condiciones corrosivas del fluido.

- Bridas.- Para envolventes y cabezales diseñados de acero al carbono y con uniones bridadas, las bridas deberán de ser de un material similar al de dichos componentes.

Para envolventes y cabezales de aleación con uniones bridadas, las bridas podrán ser (cuando las condiciones de operación lo permitan) diseñadas de acero al carbono recubierto con material de aleación en las partes que estén en contacto con el fluido de proceso y superficies de asentamiento de empaques.

- Conexiones.- Las bridas utilizadas en conexiones deberán ser fabricadas de acero forjado. No se permite el uso de bridas fabricadas de acero fundido o placa.

Los cuellos de las conexiones se deberán fabricar de tubos sin costura o de placa rolada con soldadura longitudinal cuando no se disponga en las dimensiones solicitadas.

Para cambiadores de calor cuyas boquillas sean de aleación, se podrán usar bridas deslizables con recubrimientos, siempre y cuando las condiciones de servicio lo permitan.

- Empaques.- Los empaques para uniones bridadas, excepto para boquillas, deberán ser elegidos de acuerdo con los tipos recomendados por la norma TEMA y código ASME Sección VIII, División I. De no indicarse en las hojas de datos los materiales de los empaques, estos deberán ser apropiados para el manejo de los fluidos a las condiciones de proceso especificadas.

Los empaques de las uniones con bridas, deberán de ser del tipo "asbesto enchaquetado de metal", a menos que las condiciones de servicio requieran un material sólido. El material de enchaquetado de los empaques deberá ser apropiado para resistir la corrosión de fluidos de proceso y compatible con el de las caras de asentamiento en bridas, tapas y espejos.

Los empaques para las conexiones en serie, deben ser del tipo metal devanado en espiral con inserción de asbesto, en materiales similares a los indicados para los empaques de las uniones del cambiador.

- Mamparas.- Se seleccionan principalmente de acero al carbono, ya que son elementos que no están sujetos a presión. Aunque en algunas ocasiones se seleccionen de un material similar al de los tubos para el caso en que el fluido de lado envolvente sea un buen electrolito.
- Placa divisoria.- Se seleccionan del mismo material de los cabezales y placas a los cuales van soldadas. En los casos en que las placas divisorias sean hechas de acero al carbono y los espejos a los cuales van empacadas sean de un material distinto será indispensable proporcionar en el extremo de la placa divisoria un material igual o similar al del espejo, manteniendo de acero al carbono el resto de la placa divisoria y uniendo ambas partes mediante soldadura, para posteriormente recubrir la unión con resina epóxica, para evitar con ello la corrosión bimetalica y la presencia de puentes electrolíticos.

2.3 Esfuerzos permisibles de diseño.

Los valores del esfuerzo máximo permisible están establecidos en base a características del material, tales como: resistencia máxima a la tensión, punto de fluencia, punto de ruptura y a la variación de estos debido a la temperatura.

El esfuerzo permisible del material puede fijarse de la siguiente manera:

1. Como un porcentaje del punto de fluencia.
2. Como un porcentaje de la resistencia máxima a la tensión.

Los valores de los esfuerzos permisibles de los materiales de uso frecuente en la construcción de estos equipos, se encuentran tabulados en el código ASME Sección VIII, División II.

Cuando los valores del esfuerzo máximo permisible de los materiales ferrosos y no ferrosos no se encuentren tabulados en el código ASME, estos deberán calcularse en función de la tabla 3.

Tabla 3.- Valores de esfuerzos permisibles.

MATERIALES	RESISTENCIA A LA TENSION MINIMA ESPECIFICADA		PUNTO DE FLUENCIA MINIMO ESPECIFICADO	
	TEMPERATURA AMBIENTE	TEMPERATURA DE DISEÑO	TEMPERATURA AMBIENTE	TEMPERATURA DE DISEÑO
FERROSOS	$1/4 S_T$	$1/4 S_T^*$	$5/8 S_Y$	$5/8 S_Y^*$
NO FERROSOS	$1/4 S_T$	$1/4 S_T^*$	$2/3 S_Y$	$2/3 S_Y^*$

S_T = Resistencia a la tensión mínima especificada.

S_Y = Punto de fluencia mínimo especificado

* Valor correspondiente de la prueba realizada a la temperatura de operación

CAPITULO 3. SERVICIOS COMUNES.

3.1 Servicios no corrosivos.

La temperatura y presión de diseño son el criterio fundamental en la selección de materiales resistentes a la corrosión.

Para el rango de temperaturas criogénicas de -267 a -101 °C (-450 a -150 °F), los aceros al carbono y de baja aleación son muy frágiles, por lo que no se recomiendan para estas temperaturas. Sin embargo, los aceros inoxidable austeníticos (serie 300) o metales no ferrosos como las aleaciones de aluminio que no muestran pérdida de resistencia al impacto a muy bajas temperaturas son ampliamente utilizados. En la tabla 4 se listan algunos de estos materiales.

Al rango de temperatura bajo el cual un material cambia gradualmente de dúctil a frágil se le llama *temperatura de transición* y es fácil de determinar mediante pruebas de impacto Charpy. El diseñador de equipos que operan a muy bajas temperaturas, se debe basar en las propiedades de los materiales aprobadas por el código ASME para seleccionar el material adecuado. Sin embargo, para algunos códigos de materiales, el valor más alto del punto de fluencia y del esfuerzo máximo a la tensión de las aleaciones que se utilizan para servicios a muy bajas temperaturas, pueden ser utilizados para reducir peso y costo.

Para bajas temperaturas de -101 a 0 °C (-150 a 32 °F), se recomienda utilizar aceros de baja aleación y aceros al carbono con microestructura de grano fino, ya que mediante varias pruebas a estos materiales, se ha detectado que a estas temperaturas, su desempeño es satisfactorio (tabla 4).

Para el rango de temperaturas intermedias de 1 a 426 °C (33 °F a 800 °F), los aceros al carbono son lo suficientemente resistentes a la corrosión, por lo que no es necesario seleccionar un material más resistente y por ende más caro. La estructura del acero al carbono por encima de 426 °C (800 °F), regresa a sus dimensiones iniciales cuando las cargas aplicadas son retiradas y el esfuerzo máximo a la tensión se encuentra por debajo del punto de fluencia.

La selección de materiales para servicios a elevadas temperaturas (por arriba de 426 °C). es generalmente un problema muy complejo, ya que a este rango de temperaturas, se comienzan a detectar cambios notables en las propiedades mecánicas de los materiales, lo que hace necesario tomar en cuenta varios factores.

Los cambios en las propiedades mecánicas de los materiales a elevadas temperaturas pueden darse debido a la composición química y al tamaño de grano. Por lo que para intermedias y bajas temperaturas, se prefiere una microestructura de grano fino. pues esta proporciona alta resistencia a la tensión, a la fatiga y al impacto, además de que ayuda a mejorar la resistencia a la

corrosión. Mientras que para elevadas temperaturas, donde el principal requerimiento es una alta resistencia a la ruptura por deformación plástica, se prefiere una microestructura de grano grueso.

Tabla 4.- Materiales de construcción para servicios no corrosivos.

	TEMPERATURA DE SERVICIO °C	PLACA	TUBO	FORJA	PRESION DE APERNADO
CRIOGENICA	-253 A -196	SA240 TIPOS 304, 304L, 347	SA312 TIPOS 304, 304L, 347	SA182 GRADOS F304 F304L, F347	PERNOS SA320 GR. B8 TUERCAS SA194 GR. 4 (S5 SA20)
	-195 A -102	SA240 TIPOS 304, 304L, 316, 316L, SA353	SA312 TIPOS 304, 304L, 316 316L, SA333 GR. 8	SA182 GRADOS F304 F304L, F316, SA522	
BAJAS TEMPERATURAS	-101 A -60	SA203 GR. D o E	SA333 GR. 3	SA350 GR. LF3	PERNOS SA320 GR. L7 TUERCAS SA194 GR. 4
	-59 A -46	SA203 GR. A o B	SA333 GR. 3	SA350 GR. LF3	
	-45 A -29	SA516 Todos los grados sometidos a prueba de impacto	SA333 GR. 1	SA350 GR. LF1 o LF2	PERNOS SA193 GR. B7 TUERCAS SA194 GR. 2H
	-28 A -16	SA516 Todos los grados mayores a 1 pulg. de espesor sometidos a prueba de impacto	SA53 (Con costura) o SA106		
	-15 A 0	SA516 Todos los grados mayores a 2 pulg. de espesor sometidos a prueba de impacto			
INTERMEDIA	1 A 15	SA285 GR. C, 3/4 pulg. de espesor máx., SA515 GR. 55, 60, 65, 1.5 pulg. de espesor máx., SA516 todos los grados, todos los espesores,	SA53 (Con costura), SA106 SA335P1	SA181 GR. 1 o II SA105 GR. 1 o II	
	16 A 412	SA285 GR. C, 3/4 pulg. de espesor máx., SA515 GR. 55, 60, 65, 1.5 pulg. de espesor máx., SA516 todos los grados, todos los espesores, SA204 gr. B, todos los espesores		SA181 GR. 1 o II SA105 GR. 1 o II	
ELEVADAS TEMPERATURAS	413 A 468	SA204 GR. B o C	SA335 P1	SA182 GR. 1 I	SA193 GR. B5 SA194 GR. 3
	469 A 537	SA387 GR. 11 C I I SA387 GR. 12 C I I	SA335 P11 SA335 P12	SA182 GR. F11 SA182 GR. F12	
	537 A 593	SA387 GR. 22 C I I SA387 GR. 21 C I I	SA335 P22	SA182 GR. F22	
	593 A 815	SA204 TIPOS 304, 316 321, 347	SA312 TIPOS 304H, 316H 321H, 347H	SA182 GRADO 304H, 316H 321H 347H	SA193 GR. B8 SA194 GR. 8
	Mayor que de los 815	ACERO INOXIDABLE TIPO 310, INCOLOY			

Los aceros que comúnmente se utilizan para la construcción de cambiadores de calor en servicios no corrosivos a elevadas temperaturas son:

Se concluyó que las placas no habrían fallado de haber tenido una tenacidad de 2 kgf-m, a la temperatura de servicio. Por lo que actualmente se utilizan estos criterios para el diseño de cambiadores de calor en servicios a bajas temperaturas. La gráfica UG-84.1 del código ASME, Sección VIII, División I, muestra la tenacidad mínima que deben tener los materiales con diferentes puntos de fluencia, en función de la temperatura de diseño.

En estudios recientes hechos a aceros al carbono, se obtuvieron las siguientes recomendaciones:

- a) El alto contenido de carbono, aumenta la dureza pero disminuye la resistencia en áreas de concentración de esfuerzos. Por ejemplo, un acero al carbono con 0.20 %C, comúnmente utilizado en la construcción de cambiadores de calor, es más resistente a la fragilización a bajas temperaturas que con un contenido de 0.30 %C, ya que por cada incremento de 0.01 % en el contenido de carbono, la temperatura de transición aumenta en 5 °F (2.8 °C).
- b) Se recomienda el uso de materiales con microestructuras de grano fino, que se pueden obtener utilizando pequeñas cantidades de aluminio.
- c) En aceros rolados en caliente se producen microestructuras con grano grueso, por lo que las piezas que se fabriquen mediante este proceso, deben someterse posteriormente a un normalizado. Este tratamiento térmico, consiste en recalentar el acero a una temperatura en la región austenítica, y posteriormente dejarlo enfriar al aire libre. Por lo tanto, para obtener una buena tenacidad a bajas temperaturas, se deben especificar aceros normalizados.
- d) La adición de manganeso hasta en 1.5 %, reduce la temperatura de transición en la prueba de impacto Charpy en -12 °C (10 °F) por cada incremento de 0.1 % de Mn. Esto quiere decir que el material resistirá una menor temperatura con la misma energía de impacto absorbida.
- e) Cuando se añade suficiente níquel a la aleación, la temperatura de transición casi desaparece.

El diseño y la fabricación de cambiadores de calor para servicios a bajas temperaturas, se hace de acuerdo al código ASME, Sección VIII, División I según el siguiente procedimiento:

1. La temperatura de diseño se debe calcular mediante el párrafo UG-20 del código ASME.
2. Si la temperatura es menor de -29 °C (-20 °F), se debe aplicar la prueba de impacto Charpy.
3. El material requerido para la fabricación debe cumplir con los requerimientos de la prueba de impacto Charpy (que se indica en el párrafo UG-84 del código ASME) a la temperatura de diseño. Esto incluye a todos los elementos constitutivos, tales como: placas, bridas, boquillas, etc.

Para una placa de acero al carbono, el diseñador seleccionará el SA-516 (C-Mn-Si) y el fabricante y/o proveedor, seleccionará de los que tenga en existencia, el de menor contenido de carbono, con mayor contenido de manganeso y que se le haya hecho un normalizado.

4. La soldadura debe cumplir con los valores requeridos por la prueba de impacto Charpy a la temperatura de diseño
5. Los soldadores deben ser calificados de acuerdo a la soldabilidad del material, por ejemplo el acero al carbono requiere la menor calificación. Es decir, una placa de acero al carbono es menos difícil de soldar que una de acero inoxidable.
6. Durante la fabricación se deben tomar muestras y hacerles las respectivas pruebas de impacto Charpy con el fin de cumplir con los requerimientos indicados por el código ASME.

3.3 Servicios a altas temperaturas.

Los efectos degradantes en los servicios a altas temperaturas se presentan comúnmente en ambientes gaseosos, tales como: hidrógeno, oxígeno, vapor de agua, monóxido de carbono, metano, compuestos de azufre, cloro, cloruro de hidrógeno, etc.

Sus efectos mecánicos incluyen deformación plástica y fractura bajo la acción de fuerzas, fatiga y cambios en las fases de las aleaciones, que causan cambios en las propiedades mecánicas incluso a temperatura ambiente.

Las reacciones de los gases son diferentes entre sí, a su vez, dependen del tipo de gas y el material que se utilice. Por ejemplo, el oxígeno forma una capa de óxido en los metales la cual los protege de los efectos de la corrosión, siempre y cuando cumpla con las siguientes características:

1. El coeficiente de expansión térmica de la capa debe ser aproximado al del metal base.
2. Buena adherencia con el metal base.
3. Elevado punto de fusión.
4. Buena plasticidad a elevadas temperaturas, lo que aumenta la resistencia a la fractura.
5. Bajo coeficiente de difusión de los iones del metal o el oxígeno.
6. Que la capa cubra completamente la superficie del metal.

La adición de cromo y en menor proporción de silicio y aluminio, mejoran la resistencia a la oxidación en varias aleaciones.

También existe la llamada oxidación catastrófica la cual se presenta cuando reacciona el oxígeno en la superficie del metal a una temperatura elevada y los óxidos que se forman tienen un punto de fusión bajo lo que puede ocasionar incluso que el metal se incendie, como ocurre con los óxidos de niobio.

El molibdeno y el vanadio tienen óxidos volátiles con catastróficas consecuencias a elevadas temperaturas. De hecho, aún las aleaciones con pequeñas cantidades de estos metales se comportan de esta manera.

El aire también forma óxidos en los metales, por lo que se debe tener cuidado de no utilizar aire contaminado ya que este acelera la oxidación y por ende reduce la vida del equipo.

Al manejar vapor de agua, el cual es poco más corrosivo que el aire, hace que los límites de temperatura para el uso del acero al carbono y aceros inoxidable, sean de 28 a 50 °C (82 a 122 °F) por debajo de los límites de temperatura para el manejo de aire.

Los hidrocarburos tales como el metano y el monóxido de carbono, forman carburos en varias aleaciones por arriba de 705 °C (1301 °F). Estos carburos en cantidades pequeñas pueden tener efectos despreciables, pero los aceros con una grave carburización en su superficie pierden ductilidad y se hacen frágiles, incluso los aceros inoxidable pueden dañarse de esta manera.

Al incrementar el contenido de níquel se mejora la resistencia a la carburización, esto se debe a que posiblemente el níquel no forma un carburo estable. También la adición de silicio puede retardar la carburización.

El manejo de compuestos de azufre puede acelerar la corrosión a temperaturas elevadas, en especial el sulfuro de hidrógeno y vapores de azufre. El ataque por azufre es más severo que la oxidación por dos razones.

Primera, los sulfuros que se forman en los metales tiene bajo punto de fusión por lo que estos se disuelven a temperaturas no muy elevadas.

Segunda, los sulfuros tiene poca adherencia a la superficie del metal y no son como los óxidos que forman capas tenaces, continuas y protectoras.

En general, las aleaciones con contenido de níquel tienen poca resistencia al ataque por azufre. En estas aleaciones se forman sulfuros que se disuelven a una temperatura de 644 °C (1191 °F) aproximadamente, esto produce una falla al penetrar el fluido en los bordes de grano del metal, incluso los crayones con contenido de azufre que se utilizan durante el proceso de fabricación, para marcar las placas, pueden producir corrosión localizada durante el tratamiento térmico posterior. por lo que es conveniente eliminar cualquier contenido de azufre al utilizar aleaciones con alto contenido de níquel.

Por el contrario, el contenido de cromo contribuye con una buena resistencia al ataque por azufre. Se requiere de un mínimo de 17 % de cromo en los aceros inoxidable para prevenir los daños del azufre en los servicios con sulfuro de hidrógeno En la tabla 5, se muestra la resistencia a la corrosión de varios metales y aleaciones en gases con contenido azufre.

Tabla 5.- Resistencia de varios metales y aleaciones en gases conteniendo azufre.

	H ₂ S	S	SO ₂
Baja ↑ Resistencia a la corrosión ↓ Buena	Ni, Co	Ni, Cu	Ni
	Acero de bajo carbono	Acero de bajo carbono	Fe
	Fe	Fe	Acero inox. 430
	Aleación Fe-Mn	Acero inox. 420 (Fe - 14Cr)	Ta
	Aleación 600 (Ni - 15Cr - 8Fe)	Aleación Cu - Mn	Cu, bronce
	Cu	Aleación 600 (Ni - 15Cr - 8Fe)	Aleaciones de aluminio
	Acero inox. 430 (Fe - 16 Cr)	Mn	Mo, W
	Acero inox. 446 (Fe - 25 Cr)	Cr	Acero inox. 304
	Cr	Acero inox. 430	Aleación 600
	Acero inox 304 (18Cr - 8 Ni)	Acero inox. 304	Aleación Cu - 12Al
	Aleación Fe - 12 Al	Aleación X (Ni - 22Cr - 18 Fe - 9Mo)	Zr
	Aleación Ni - 15Al	Al, Mg	
	Ta, Mo, W Al, Mg		

El vapor de azufre concentrado a altas temperaturas, (mayores de 570 °C) es altamente corrosivo en los aceros inoxidable al Cr-Ni. Los valores de la velocidad de desgaste son de 18.9 mpy (milésimas de pulgada por año) para el acero inoxidable 310 (25Cr-20Ni S31000) y de 54.8 mpy para el acero inoxidable 321 (18Cr-8Ni S32100). Por lo que el acero inoxidable 310 ha demostrado ser el mejor para servicios con vapor de azufre, comparado con los demás aceros de la serie 300. a temperaturas que van de 445 a 704 °C (833 a 1300 °F).

El aluminio tiene buena resistencia al ataque por azufre. Puede difundirse sobre aceros al carbono, aceros inoxidables y aleaciones de níquel al vaporizarlo sobre la superficie del acero o aleación base a una temperatura de 927 °C (1700 °F). Este tipo de recubrimiento se usa para servicios de gases con contenidos de azufre, y no es recomendable para líquidos a bajas temperaturas. También puede ser útil agregar pequeñas cantidades de aluminio a la aleación. Por ejemplo, la aleación 601 (59Ni-21Cr -1.1Al N06601) al agregarle 1.35 % de Al, demostró tener buena resistencia a la sulfurización en pruebas llevadas a cabo a temperaturas entre 593 y 705 °C (1100 y 1301 °F) mientras que el acero inoxidable 309 no tuvo la misma resistencia, esto se debió principalmente a la pequeña cantidad de aluminio presente en la aleación 601, ya que ambas aleaciones contienen el mismo porcentaje de cromo por lo que este no fue un factor determinante en la resistencia al ataque por azufre.

El cloro y cloruro de hidrógeno no representan mayor problema para la mayoría de las aleaciones mientras estén secos. *La presencia de humedad aumenta los efectos corrosivos del cloro, lo que involucra un costo más elevado ya que se deben usar aleaciones como la C y titanio el cual puede incendiarse en cloro seco.* Sin embargo, los valores de la velocidad de desgaste aumentan al incrementarse la temperatura.

Para servicios con cloro seco se pueden utilizar aceros inoxidables con contenidos de 18Cr-8Ni; siempre y cuando se tomen las precauciones adecuadas, ya que la presencia de agua puede ocasionar corrosión por picadura o por concentración de esfuerzos.

La introducción accidental de agua en el sistema puede ocasionar corrosión uniforme en el acero al carbono.

La deformación plástica (punto de fluencia) y la resistencia a la fractura (punto de ruptura) son factores determinantes en el diseño si se emplean aceros al carbono o de baja aleación a temperaturas mayores de 370 °C (698 °F), 540 °C (1004 °F) para aceros inoxidables de la serie 300 y 650 °C (1202 °F) para aleaciones a base de níquel. Otras consideraciones que deben seguirse: incluyen una buena resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga y estabilidad metalúrgica. Por ejemplo, el uso del cromo en la aleación proporciona una buena resistencia a la corrosión por oxidación y sulfurización, la resistencia a la fatiga se mejora si se tiene una buena

ductilidad a elevadas temperaturas y un bajo coeficiente de expansión térmica, el cual se puede obtener si se incrementa el contenido de níquel que es una ventaja en estas aleaciones.

En general, los aceros inoxidable austeníticos tienen buena resistencia a elevadas temperaturas, gracias a su contenido de níquel. Aunque existen diferentes formas de mejorar la resistencia en otras aleaciones, a continuación se presentan algunas.

1. *Endurecimiento por solución sólida.* En este método, se añaden otros metales que tengan un radio atómico mayor que los elementos de la aleación, formándose uniones más fuertes que proporcionan mayor dureza. Los metales que comúnmente se añaden son el tungsteno (W) y el molibdeno (Mo).
2. *Endurecimiento por precipitación.* Este es el caso del acero inoxidable 321 que tiene mejor resistencia a elevadas temperaturas que el acero inoxidable 304, debido a su contenido de carburos de titanio dispersos en su microestructura. En el caso de la aleación 800H (30Ni-39.5Fe-19Cr-0.15Al-0.1Ti N08810), su buena resistencia se debe a su bajo contenido de carbono de alrededor de 0.06 %.

En general, al aplicarse un trabajo en frío, se proporciona una mayor dureza a temperatura ambiente, pero este no es recomendable para temperaturas elevadas ya que ocurre una *recristalización*, por lo que se recomienda un recocido completo posterior al trabajo en frío, con el objeto de aumentar el tamaño de grano y mejorar así la resistencia de la aleación.

Se ha comprobado que los granos finos tienen mejor resistencia a temperatura ambiente pero a temperaturas elevadas se hacen más débiles ya que se tiene una mayor cantidad de bordes de grano, por lo tanto, aumentan las regiones donde pueden ocurrir las fallas.

Las temperaturas elevadas también involucran cambios de fase en cualquier aleación; por ejemplo, si se forman carburos y estos cambian de forma o se disuelven pueden debilitarla. Además, se forman nuevas fases como la sigma, que es un ejemplo clásico de la reacción de temperaturas elevadas en una aleación, la cual causa fragilización.

La formación de la fase sigma puede ocasionar daños, en aleaciones de níquel si se tiene una temperatura entre 760 y 927 °C (1400 y 1700 °F). En aceros inoxidable ferríticos ocurre la formación de esta fase con mayor facilidad. Por ejemplo, en el acero inoxidable 430 (87Fe-11Cr-0.12C S43000) se forma más rápido que en un acero inoxidable austenítico. La temperatura de formación de la fase sigma en aceros inoxidable está entre 595 y 870 °C (1103 y 1598° F).

Los constituyentes de la fase sigma son generalmente frágiles, contienen un alto porcentaje de elementos de transición como el vanadio o cromo, además de manganeso, hierro, cobalto y níquel. Se han visto hasta 53 parejas de elementos.

La aparición de esta fase, en los aceros inoxidables austeníticos, ocurre más lentamente, esto se debe a que también presentan regiones ferríticas. También puede formarse en soldaduras con composición 18Cr-8Ni.

En refineries, se ha observado que la presencia de esta fase, no es la causa principal de la falla en los equipos. Sin embargo, las fundiciones HH (25Cr-12Ni A297), pueden desarrollar suficiente cantidad de esta fase y en consecuencia se reduce su ductilidad peligrosamente, por lo que baja la resistencia de esta fundición al deformarse en 1 ó 2%, y si se reduce la temperatura de operación, se ocasiona un choque térmico que puede producir una fractura.

Para evitar este tipo de problemas en aceros inoxidables, se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Utilizar un contenido de níquel tan alto como sea posible.
- Evitar el uso de aceros inoxidables ferríticos y en lugar de estos, usar aceros inoxidables austeníticos.
- Las aleaciones 800H u 800HT que contienen 32.5 % Ni, previenen la formación de la fase sigma, pero su costo es elevado. En seguida se encuentra el acero inoxidable 310 que contiene 20.5 % Ni.
- Especificar un acero inoxidable austenítico forjado en lugar de uno fundido.
- Asegurarse de que el proveedor haya hecho el tratamiento térmico correspondiente una vez realizado cualquier trabajo de formado. La fase sigma se forma más rápidamente en un acero trabajado en frío que en uno tratado térmicamente.
- Si se manejan líquidos corrosivos, asegúrese de usar una aleación en la que no se precipiten carburos durante su exposición a temperaturas elevadas.

Por ejemplo, en el acero inoxidable 304, se precipitan carburos de cromo a temperaturas entre 480 y 815 °C (896 y 1500 °F), esto deja regiones expuestas de cromo que pueden sufrir corrosión intergranular por el ataque de ácido sulfúrico o nítrico principalmente. El acero inoxidable 321, parece ser la mejor opción, ya que su contenido de titanio estabiliza al carbono, formándose carburos de titanio que mejoran el punto de fluencia y punto de ruptura. Se debe asegurar que el fabricante utilice los métodos de soldadura adecuados para este tipo de acero.

La tabla 6 muestra las temperaturas de operación máximas para diferentes aleaciones de uso común en cambiadores de calor.

Tabla 6.- Temperaturas de operación máximas para aleaciones de uso común.

Aleación	Datos del fabricante*	Código ASME, Sección VIII, Div. 1			Otras limitaciones a la temperatura de operación	
		Suministro	Especificación ASME	Temp. máx. de diseño °C	Temp. °C	Limitante
Acero al carbono (0.20 - 0.28 % C)	649	Placa	SA-285	482	426	Grafitización
			SA-515	538		
			SA-516	538		
		Tubo	SA-63	482		
			SA-106	538		
Acero al C-Mo (0.5 % Mo)	704	Placa	SA-204	538	468	Grafitización
		Tubo	SA-369	538		
Aceros al Cr-Mo (1.25Cr-0.5Mo) (5.0Cr-0.5Mo)	704	Placa	SA-387	649	566	Formación de escamas por oxidación
	760	Placa	SA-387	649		
Acero inox. 304 (18Cr-8Ni)	871	Placa	SA-240	816	482	Precipitación de Carburos
Acero inox. 304L (18-8, bajo carbono)	871	Placa	SA-240	426	899	Formación de escamas por oxidación
Acero inox 321 (18-8, Ti)	871	Placa	SA-240	816	899	Formación de escamas por oxidación
Acero inox 310 (25Cr-20Ni)	982	Tubo	SA-312	816	1149	Formación de escamas por oxidación
Aleación 800H (21Cr-32.5Ni)	982	Placa	SB-409	816	982	Oxidación
Aleación B (72Ni-28Mo)		Placa	SB-333	426	760	Formación de escamas por oxidación
Aleación C-276 (59Ni-16Cr-16Mo)		Placa	SB-575	426	1093	Formación de escamas por oxidación
Níquel 200 (99Ni-0.25Cu)		Placa	SB-162	316	316	Grafitización
Níquel 201 (99Ni-0.25Cu, bajo C)		Placa	SB-162	649	788	Oxidación por aire
Aleación 400 (65Ni-32Cu)		Placa	SB-127	482	538	Oxidación por aire

* Temperaturas máximas para una resistencia a la ruptura de 70.3 kg/cm² (1000 lb/pulg²).

3.4 Servicios con agua de enfriamiento.

El agua es el principal medio de enfriamiento que se utiliza en las plantas de proceso, la cual es obtenida de ríos, lagos o pozos. Sin embargo, el manejo de agua de enfriamiento puede generar depósitos (incrustaciones y lodos) en algunos elementos constitutivos de los cambiadores de calor aún cuando se le da un tratamiento para su utilización.

Las incrustaciones son sales precipitadas debido a la disminución de la solubilidad de éstas en el agua, siendo las más comunes: el carbonato de calcio, sulfato de calcio y silicatos.

Los lodos son agentes contaminantes contenidos en el agua de enfriamiento formados generalmente por sólidos en suspensión tales como: arena, arcilla, aceites y materia microbiológica.

Generalmente, en los cambiadores de calor, el agua de enfriamiento se maneja en el lado tubos, ya que cuando se maneja por el lado envolvente se generan bajas velocidades las cuales causan un rápido asentamiento de precipitados, sobre todo en partes adyacentes a las mamparas. Por lo que se utilizan boquillas para limpieza química, las cuales permiten eliminar los depósitos que se llegan a concentrar principalmente en los tubos de transferencia y así evitar la corrosión por picadura que es el ataque principal que generan estos depósitos.

Como ya se mencionó anteriormente, el acero al carbono es el material comúnmente utilizado en la construcción de cambiadores de calor debido a sus buenas propiedades mecánicas y a su bajo costo. Sin embargo, el manejo de agua de enfriamiento en estos equipos no permite usar acero al carbono para la construcción de partes constitutivas que están expuestas a este medio, debido a que forma una celda diferencial entre la parte superior del depósito, con un nivel alto de concentración de oxígeno, lo cual origina un efecto galvánico entre el agua de enfriamiento y la superficie metálica en la parte inferior del depósito. Dicho efecto trae como resultado una corrosión localizada, por picadura.

Por tal motivo, para el manejo de agua de enfriamiento se recomienda el uso de aleaciones de cobre como son los admiralties (70 a 73 %Cu) inhibidos, y en caso de altas temperaturas, se recomiendan aleaciones cobre-níquel.

3.5 Servicios con hidrogeno.

El hidrógeno está presente en varios procesos de la Industria Petrolera. El daño que causa, en los cambiadores de calor, se debe a que se encuentra a diferentes presiones y temperaturas, lo que produce un cambio en las propiedades tanto físicas como mecánicas del metal.

A altas temperaturas, puede degradar las propiedades de la aleación debido a la descarbonización. Para aceros al carbono y de baja aleación, el contenido de carbono es el principal determinante

de la resistencia máxima y la dureza. El hidrógeno, a altas temperaturas puede atacar a los aceros de 2 formas:

1. Descarburización de superficie: Esta se debe a la combinación de altas temperaturas y bajas presiones de hidrógeno. Este tipo de descarburización no produce fisuras en la superficie del material. Generalmente los efectos son: adelgazamiento, reducción localizada en la resistencia y dureza, además de un incremento en la ductilidad. El porcentaje de descarburización está directamente relacionado con la estabilidad del carburo.
2. Descarburización interna: Esta se debe a la combinación de bajas temperaturas (las cuales están consideradas por encima de 221 °C (430 °F) y altas presiones de hidrógeno. Este tipo de descarburización produce fisuras en el metal. El ataque se produce de la siguiente manera: el hidrógeno penetra en el acero para generar metano, pues este no se puede difundir fuera del acero. El metano generado permanece en vacío, por lo que se desarrollan altos esfuerzos los cuales son suficientes para fisurar, agrietar o ampollar al acero. Una pieza de acero completamente descarburizada y fisurada reduce su resistencia a la tensión de 60,000 lb/pulg² a 25,000 lb/pulg².

La inclusión de estabilizadores de carburo en los aceros, tales como cromo o molibdeno, disminuyen los problemas de ataque por hidrógeno, ya que estos provocan que el carbono sea mucho más compacto y que el problema de descarburización se reduzca considerablemente.

Otros elementos tales como el tungsteno, vanadio, titanio y niobio, reducen el número de sitios de nucleación mediante la formación de carburos más estables que resisten la ruptura por hidrógeno y reducen la tendencia a la formación de metano. Sin embargo, la presencia de inclusiones no metálicas tienden a incrementar las fallas por ampollamiento. Cuando los aceros tienen impurezas segregadas o laminaciones, las acumulaciones de hidrógeno o metano en estas áreas pueden causar severo ampollamiento.

Para combatir el problema de descarburización, también se ha pensado en la utilización de los llamados aceros de aleación “templable”, los cuales contienen pequeñas cantidades de cromo (1.2 ó 3 %), o pequeñas cantidades de molibdeno (.5 ó 1 %), que caracterizan a dichos aceros. Estos aceros son más resistentes a la descarburización comparados con el acero al carbono y son más baratos que los aceros inoxidable de la serie 300. Sin embargo, su alta dureza hace que sean difíciles de soldar, lo que ha impedido su utilización, pues se requieren de complicados y costosos procedimientos tales como precalentamientos mínimos y tratamientos térmicos post-soldadura para disminuir su dureza.

Los aceros inoxidables comúnmente recomendados para la construcción de cambiadores de calor en servicios con hidrógeno son los de la serie 300, tipos 304, 316 y 310, pues contienen de

16 a 26 % de cromo, lo cual los hace bastante resistentes al ataque por hidrógeno a elevadas temperaturas. Otros materiales utilizados en servicios con hidrógeno son los aceros inoxidable al cromo-molibdeno 1.25Cr-0.5Mo (SA387C), 2Cr-0.5Mo (SA387D), 3Cr-0.5Mo (SA387E), 6Cr-0.5Mo (SA357), así como el acero al carbono-molibdeno 0.5Mo (SA204) y el acero al carbono SA516. Para la correcta selección de estos materiales se utilizan las curvas Nelson (figura 12), las cuales muestran los límites de operación para servicios con hidrógeno.

De acuerdo a estas curvas, los materiales anteriormente listados no sufren ataque por hidrógeno si la temperatura de operación y la presión parcial de hidrógeno se encuentran sobre, por debajo o a la izquierda de la curva aplicable para cada tipo de acero. Las líneas punteadas de la gráfica representan los límites por encima de los cuales, el acero sufre descarburización de superficie debido al ataque por hidrógeno.

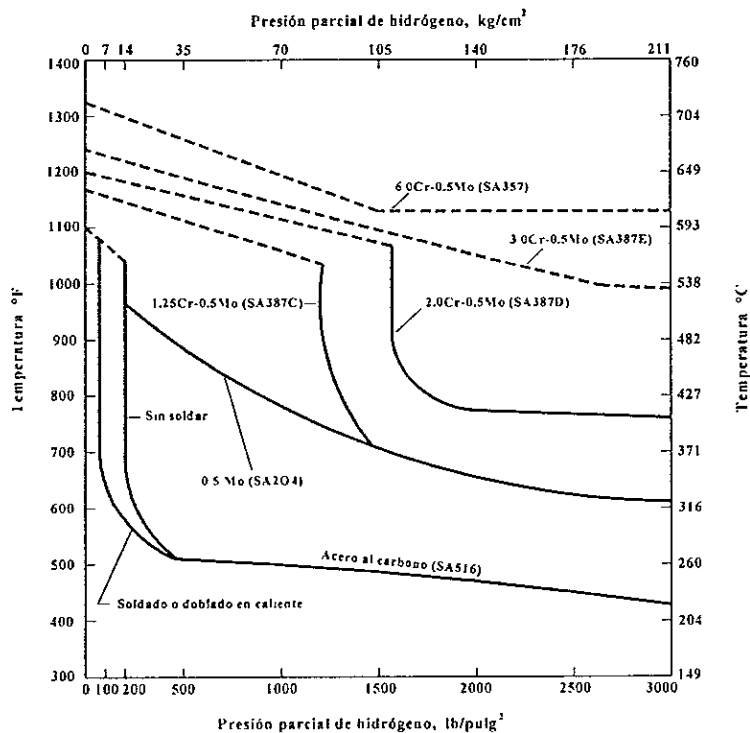


Figura 12.- Curvas Nelson para la selección de materiales en servicios con hidrógeno.

Además de los materiales mencionados anteriormente, también se utilizan otras aleaciones resistentes al ataque por hidrógeno tales como los aceros con carbono controlado y los aceros de baja aleación, pues también contienen estabilizadores de carburo que los hacen resistentes a la descarburización. Así mismo, se utilizan los aceros inoxidable austeníticos pues soportan presiones por arriba de las 13,000 lb/pulg², además de que son resistentes a la descarburización aún a temperaturas por arriba de 538 °C (1000 °F).

El tratamiento térmico post-soldadura ha sido utilizado en los aceros al cromo-molibdeno para mejorar su resistencia a este ataque. Este tratamiento térmico estabiliza los carburos de aleación, lo que reduce la cantidad de carbono disponible para combinarse con el hidrógeno, lo cual mejora su resistencia a este ataque.

Sin embargo, el diseñador debe hacer un balance de las ventajas y desventajas que puede tener, pues a ciertas temperaturas, puede afectar algunas propiedades mecánicas del material tales como la resistencia y la tenacidad.

Además del daño que pueden sufrir los aceros por ataque de hidrógeno a altas temperaturas, también se pueden presentar daños por ataque a bajas temperaturas, pues bajo estas condiciones, el hidrógeno también penetra en el acero causando daños severos debido a los diferentes mecanismos de corrosión u operaciones de trabajo del metal tales como soldadura o procesos electroquímicos

Las formas de ataque por hidrógeno a bajas temperaturas comúnmente detectadas en los aceros utilizados en la industria petrolera y en particular en los utilizados en la construcción de cambiadores de calor son:

1. Fragilización por hidrógeno (HE).
2. Agrietamiento debido a esfuerzos por hidrógeno (HSC).
3. Agrietamiento debido a esfuerzos por sulfuro (SSC).
4. Ampollamiento debido al hidrógeno (HBC).
5. Agrietamiento inducido debido a esfuerzos orientados por hidrógeno (SOHIC).

Estas formas de ataque dependen generalmente de 3 factores importantes: microestructuras susceptibles, altos esfuerzos residuales y reacciones de la corrosión.

Con respecto a las microestructuras susceptibles, se ha adoptado una medida de prevención contra estas formas de ataque, la cual consiste en la inclusión de bajas cantidades de azufre (.006 %S máx. e inclusiones de .002 %S máx.) en el acero. Dichas inclusiones se realizan de forma controlada y no controlada respectivamente. Esta medida, mejora la resistencia al ataque por HBC y SOHIC.

El control del carbono equivalente y el mejoramiento del tratamiento térmico post-soldadura incrementan la resistencia al HSC y algunos tipos de SOHIC, mediante la disminución de la dureza del metal en zonas afectadas por calentamiento de la soldadura.

En lo concerniente a los altos esfuerzos residuales, se han adoptado medidas tales como el mejoramiento en los diseños mecánicos, selección de materiales adecuados, técnicas de soldadura y tratamientos térmicos post-soldadura con el fin de incrementar la resistencia al HSC y SOHIC.

Las reacciones de la corrosión son las causantes del ampolamiento debido al hidrógeno (HBC) en los aceros, pues se generan altos porcentajes de corrosión en ciertos procesos que manejan sulfuros, amonio, cianuros y agua, los cuales conducen al HBC.

Una medida de prevención contra este tipo de ataque es la utilización de ciertos aceros inoxidables tales como el tipo 316 en la fabricación de equipos que operan en ambientes que contienen ciertos fluidos corrosivos como los anteriormente mencionados.

3.6 Servicios con agua de mar.

La salinidad, temperatura, velocidad, etc., del agua de mar conduce al deterioro de muchos equipos y sistemas. Los efectos que tiene el agua de mar sobre los diferentes materiales son muy diversos, ya que se presentan varios tipos de corrosión.

La corrosión uniforme, se presenta principalmente cuando el metal se encuentra en contacto con agua de mar tranquila, este tipo de corrosión produce una pérdida de peso en el metal expuesto. Es muy común sobre todo en agua de mar a baja velocidad la presencia de organismos marinos u otros depósitos, lo que ocasiona picaduras en el metal aunque éste presente buena resistencia a la corrosión uniforme. Las picaduras en algunos casos penetran por completo el espesor del material.

El agua de mar a baja velocidad aseguraría una larga vida de los equipos, si las pérdidas del metal fueran uniformes y no localizadas. Por lo que las velocidades de corrosión promedio no proporcionan una idea real de la durabilidad de los equipos si toda la pérdida de peso ocurre por picaduras.

Muy pocos materiales presentan la misma resistencia a la corrosión uniforme que a las picaduras. De hecho, muchos de los materiales más nobles que sufren poca o ninguna corrosión uniforme, son los más susceptibles a las picaduras profundas y en agua de mar a baja velocidad suelen ser catastróficas.

En varias pruebas realizadas a diferentes grados de aceros de baja aleación inmersos en agua de mar durante 5, 10 y 15 años, se ha encontrado que el ataque producido por este medio ha sido

debido a la corrosión uniforme. A su vez, se han detectado disminuciones en los valores de desgaste de la mayoría de estos aceros cuando el tiempo de exposición es muy corto e ininterrumpido (1.5, 2.5 y 4.5 años). Esta disminución en los valores de desgaste, se da en los primeros años de exposición, ya que después de este tiempo, el promedio de la mayoría de los aceros inmersos en agua de mar permanece constante (de 3 a 5 mpy). Sin embargo, para los aceros que contienen 2.6 % Cr, el desgaste disminuye a 1.5 mpy, permaneciendo constante.

El ensuciamiento es una característica del agua de mar que origina celdas de concentración de oxígeno, las cuales a su vez dan lugar a la corrosión por grietas o hendiduras. Las diferencias en la concentración de oxígeno disuelto conducen a la corrosión localizada del metal en áreas ocultas, apartadas o cubiertas por depósitos o debajo de hendiduras.

Uno de los principales problemas que se presentan es la corrosión galvánica, la cual comparada con el agua dulce intensifica los efectos galvánicos en los materiales.

Un inconveniente en este tipo de servicio, es el uso de materiales diferentes, ya que este tipo de construcción puede dar como resultado la intensificación de los efectos galvánicos si no se protegen catódicamente las partes constitutivas más importantes y pequeñas.

En caso de equipos en los que no sea posible o conveniente instalar protección catódica, es conveniente tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Construir equipos para servicio con agua de mar, con un solo tipo de metal.
- Si no es posible construir equipos de un solo material, deberá establecerse que elemento se tiene que proteger y por lo tanto fabricarse con un material más noble.
- Especificar una tolerancia a la corrosión adecuada para el material menos noble.
- Considerar el uso de recubrimientos.

Otra forma de corrosión que se intensifica en los servicios con agua de mar, es la corrosión selectiva, debido principalmente a la interacción de la estructura interna del material y el flujo del agua de mar. Este tipo de corrosión produce cambios indeseables en las propiedades tanto físicas como mecánicas.

Cuando la velocidad del agua de mar fluctúa entre 0.9 y 1.8 m/s, disminuye el ensuciamiento y las picaduras, en las aleaciones más nobles puede desaparecer en algunos casos. Conforme la velocidad se incrementa, se elimina la capa protectora contra la corrosión en los aceros y aleaciones de cobre, mientras que en los aceros inoxidables y muchas aleaciones de níquel permanecen pasivas e inertes. A altas velocidades, los metales se dividen en dos grupos diferentes: los que son de velocidad limitada como el acero al carbono y los de velocidad controlada como el acero inoxidable y muchas aleaciones de níquel.

Uno de los materiales ampliamente utilizado en servicios con agua de mar, es el cuproníquel (SB 111-176 90Ni-10Cu), pues tiene excelente resistencia a la corrosión en un amplio rango de ambientes como los químicos y marinos. Así mismo, es resistente a ciertos componentes que contiene el agua tales como ácidos minerales, sales y alcalis.

3.7 Servicios con ácidos y alcalis.

En muchos procesos de la industria petrolera, intervienen servicios con ácidos o alcalis o derivados de estos. Dichas sustancias originan gran parte de los problemas de corrosión que se presentan en los cambiadores de calor, haciendo que durante la selección de materiales se deba tener mucho cuidado con el comportamiento del material al contacto con estas sustancias, ya que suelen ser altamente corrosivas y tóxicas, por lo que se deben extremar las precauciones con el objeto de evitar posibles accidentes que pudieran ocasionar daños tanto a los equipos como al personal.

Generalmente, los alcalis no causan corrosión severa en las aleaciones de níquel. Sin embargo, suelen causar agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC) en algunas aleaciones. La tabla 7 muestra las aleaciones que generalmente sufren SCC debido a la presencia de alcalis en ciertos ambientes.

El acero al carbono puede resistir concentraciones mayores al 50 % de hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) sin que se presente el agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos, aunque cabe mencionar que las temperaturas se deben conservar lo suficientemente bajas para evitar el ataque. Sin embargo, a elevadas temperaturas, el NaOH puede causar SCC en los aceros al carbono, aceros inoxidable tipos 304 y 316, aleación 400 (65Ni-32Cu) y aleación 600 (76Ni-15Cr-8Fe).

El níquel es el material más recomendado para los equipos que manejan soluciones cáusticas puras.

Para evitar la grafitización y posible ataque intergranular de los equipos que manejan soluciones cáusticas a temperaturas por debajo de 316 °C (600 °F), el material recomendado es el níquel aleación 200 (99Ni-.25Cu ASTM B162, ASME SB 162). Mientras que para temperaturas mayores, el material recomendado es la aleación 201 (99Ni-.25Cu ASTM 162, ASME SB 162). Como puede observarse, el níquel es bastante resistente al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos. sin embargo. si el mercurio se presenta como una impureza. aquel puede agrietarse.

Tabla 7.- Ambientes que pueden causar agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC) debido a la presencia de alcalis.

MATERIAL	AMBIENTE
Aleaciones de aluminio	Soluciones de cloruro de sodio (NaCl) y agua pesada (H ₂ O ₂)
	Agua de mar
	Aire
	Vapor de agua
Aceros al carbono	Soluciones de hidróxido de sodio (NaOH)
	Soluciones de nitrato
	Acido sulfúrico (H ₂ SO ₄) o ácido nítrico (HNO ₃)
	Soluciones de ácido sulfhídrico (H ₂ S)
Aleaciones de cobre	Soluciones y vapores de amonio
	Aminas
	Agua y vapor de agua
Aleación 400 (65Ni-32Cu)	Hidroxido de sodio (NaOH) fundido
	Acido fluorhídrico
	Soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) en ebullición
Níquel	Mercurio
	Sulfuro
Aceros inoxidables tipos 304 y 316	Soluciones de cloruro
	Acido sulfhídrico (H ₂ S)
	Soluciones de hidróxido de sodio (NaOH)
Aleaciones de Titanio	Acido Nítrico (HNO ₃)
	Agua de mar
	Metanol
	Tetraóxido de nitrógeno (N ₂ O ₄)

Los aceros inoxidables 304 y 316 presentan niveles bajos de este tipo de corrosión, sin embargo, sufren agrietamiento en servicios con soluciones cáusticas. Estos aceros están limitados para el manejo de concentraciones mayores al 50 % y temperaturas mayores de 93 °C (199 °F). La aleación 20 (32Ni-3Cu-19Cr-32Mo ASTM B729, ASME SB 729) con un incremento en los contenidos de níquel y cromo, mejora su resistencia a la corrosión bajo esfuerzos en servicios con soluciones cáusticas.

El titanio, zirconio y aleación 400 también son resistentes a las soluciones cáusticas, aunque a este último se le debe aplicar un relevado de esfuerzos si se utiliza a elevadas temperaturas.

Tabla 8.- Materiales recomendados para el manejo de ácidos fuertes.

ACIDO	MATERIAL	COMENTARIO
Acético	Acero inoxidable 316L	Si existen excesos de anhídrido acético se puede acelerar e ataque por corrosión, las impurezas de cloruro (en niveles ppm) pueden causar corrosión por picadura y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos
	Cobre y aleaciones	No se recomiendan para condiciones severas de oxidación
Fórmico	Acero inoxidable 304L	Se recomienda únicamente a temperaturas ambiente
	Cobre y aleaciones	No se recomienda para condiciones severas de oxidación incluyendo el aire
Clorhídrico	Aleación C (59Ni-16Cr-16Mo ASTM A494)	No se recomienda para ácido clorhídrico concentrado a altas temperaturas.
	Aleación B (70Ni-28Mo ASTM A494)	No se recomiendan para condiciones severas de oxidación
Fluorhídrico	Aleación 400 (65Ni-32Cu)	No se recomiendan para condiciones severas de oxidación.
	Cobre	Se recomienda sólo para temperaturas por debajo de los 65 °C (150 °F) y donde las condiciones de oxidación no son tan severas
	Cuproniquel	No se recomiendan para condiciones severas de oxidación, además de que los porcentajes de concentración y temperatura bajo los cuales puede tener un buen comportamiento el material, están muy limitados
	Acero al carbono	No se recomienda para concentraciones menores del 60 o 65%, dependiendo de las impurezas que se presenten
Nítrico	Acero inoxidable 304L	Se debe usar de bajo carbono o de grado estabilizado si va a ser sometido a procesos de soldadura. No se recomienda para concentraciones de vapor de ácido a temperaturas mayores de 65.5 °C (150 °F)
	Aluminio (3003 y 5052)	Se recomienda sólo para concentraciones aproximadas al 95%, ya que a menores concentraciones, no son muy recomendables
Oleum (sulfuro)	Acero al carbono	No se recomienda para concentraciones de 100 a 101% de ácido sulfúrico. El rango de temperaturas para su utilización es muy limitado
	Acero inoxidable 304L	A altas temperaturas y a una concentración aproximada del 40% de oleum, se corroe a 1 lmpy
Fosfórico	Acero inoxidable 316L	Se debe usar de bajo carbono o de grado estabilizado si va a ser sometido a procesos de soldadura. Recomendable para concentraciones mayores al 85% y temperaturas por arriba de los 93 °C (200 °F)
	Aleación 20	Costo relativamente alto.
Sulfúrico	Acero al carbono	Se recomienda para concentraciones menores al 70%, a temperatura ambiente y velocidades menores a 4 ft/s
	Aleación 20	El rango de temperaturas para su utilización está muy limitado para concentraciones del 65 al 75%
	Acero inoxidable 316L	Se recomienda para soluciones diluidas, a temperaturas ambiente y en donde las concentraciones de H ₂ SO ₄ son de aproximadamente el 10%

Por ejemplo, para el manejo de hipoclorito de sodio y gas de cloro húmedo, el material comúnmente utilizado es el titanio, ya que posee excelente resistencia a estas dos soluciones.

Los ácidos que generalmente se manejan en la industria petrolera y que causan ataques severos en ciertos materiales de construcción son: ácido sulfúrico, nítrico, clorhídrico, fluorhídrico y fosfórico.

La tabla 8 muestra los materiales recomendados para el manejo de estos ácidos.

La recomendación de los materiales de construcción para servicios con ácidos depende de los siguientes factores:

- Oxidación. El cromo forma una capa protectora de óxido en los aceros inoxidables y aleaciones de níquel, la cual los hace resistentes al ataque de ácidos (que no contienen halógenos). Dichas aleaciones tienen un mejor comportamiento bajo condiciones severas de oxidación.

El aluminio, generalmente no es resistente a todos los ácidos listados en la tabla 5, sin embargo, puede ser utilizado para el manejo de ácido nítrico (preferentemente en concentraciones de aproximadamente 95 %).

Otros metales y aleaciones tales como el níquel, aleación B y aleación 400, el cobre y cuproníquel, son más resistentes a los ataques por concentración de ácidos. Sin embargo, en una prueba de laboratorio se encontró que la aleación B en concentraciones de 17.7 % de H_2SO_4 se corroe a velocidades mayores a 1.5 mpy. Por tal motivo, no es recomendable utilizar esta aleación bajo condiciones severas de oxidación.

- Concentraciones de cloruro y/o fluoruro. Los cloruros destruyen la capa protectora de óxido que genera el cromo en los aceros inoxidables. Esto causa corrosión por picadura y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos en los aceros inoxidables 304 y 316. Por lo que los altos contenidos de cloruro en soluciones de ácido sulfúrico, pueden causar que las aleaciones que son susceptibles para servicios con ácido sulfúrico, no lo sean.
- Resistencia a la concentración de ácidos. Las aleaciones de titanio, aleación 400 y níquel 200 son recomendadas únicamente para manejar ácido clorhídrico a bajas concentraciones.
- Condiciones de servicio (temperatura y velocidad de la solución). La temperatura es uno de los factores que aceleran severamente el ataque por corrosión en ciertos materiales y aleaciones. Por ejemplo, el titanio en concentraciones del 10 % de HCl y a una temperatura de 35 °C (95 °F) se desgasta entre 5 y 50 mpy, mientras que para la misma concentración pero a una temperatura de 50 °C (122 °F), sus valores de desgaste son mayores a 50 mpy.

Adicionando 0.05 % de sulfato de cobre ($CUSO_4$) al ambiente de exposición, se logran reducir las condiciones de oxidación, además de que el valor de desgaste se reduce a 12 mpy. El acero al carbono es recomendable para manejar ácido sulfúrico concentrado en porcentajes de 78 a 98 %, a temperaturas ambiente y conservando la velocidad de la solución en un rango de 36.6 a 73.2 m/min. (2 a 4 pies/s).

Cabe mencionar que el buen comportamiento de los materiales en soluciones de H_2SO_4 depende de la reducción u oxidación de esta. Por lo que la adición de altos contenidos de níquel en el metal o aleación puede ayudar a disminuir el problema de reducción, mientras que la adición de altos contenidos de cromo, puede ayudar a disminuir el problema de oxidación.

CAPITULO 4.**TENDENCIAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION EN CAMBIADORES DE CALOR.****4.1 Aceros aluminizados.****4.1.1 Antecedentes.**

El aluminio en pequeñas cantidades se usó primero en los aceros Hadfield como desoxidante y para restringir el crecimiento del grano, mediante la formación de nitruros y óxidos dispersos. Aumenta la resistencia del acero, pero si es considerable el aluminio remanente, el acero se vuelve quebradizo.

El aluminizado de un material metálico es la formación de una capa delgada de aleación hierro-aluminio, mediante la difusión de este último a partir de un medio sólido o líquido. Esta capa cuyo espesor es del orden de 200 micras, presenta características mejoradas con respecto a la condición original del metal base. Sin embargo, cabe señalar que el acero aluminizado no es un acero de aleación, sino un acero generalmente en láminas con aluminio rociado o bañado en la superficie y a continuación sometido a tratamiento térmico para producir una superficie aleada.

El proceso se basa principalmente en la aplicación de dos tratamientos: inmersión en caliente (las piezas son sumergidas en aluminio fundido, formando una capa superficial rica en aluminio) y difusión (cuya finalidad es crear una verdadera aleación, homogeneizada y difundida para obtener una mayor profundidad). Sin embargo, existen otros métodos, los cuales basan sus procedimientos en función de las necesidades y/o aplicaciones que se requieran.

El acero aluminizado fue llamado originalmente "acero calorizado", ya que uno de los procesos consiste en revestir por inmersión y difundir el aluminio en el interior del acero a una temperatura de aproximadamente 871.11 °C para formar un revestimiento de aleación aluminio-acero.

El aluminizado se puede generalizar a materiales metálicos, indicando con ello que es factible tratar aleaciones diferentes y no solo aceros al carbono.

Estos aceros, basan su principal ventaja en poder obtener materiales cuyas características superficiales representen una notable mejoría debido a la naturaleza de la aleación Fe-Al formada durante este tratamiento. pero manteniendo prácticamente las mismas propiedades mecánicas y químicas del metal base. Es decir, el aluminizado no cambia las propiedades mecánicas del metal base.

Las propiedades que poseen los aceros aluminizados representan un gran beneficio para las industrias que requieren buena resistencia a la corrosión, apariencia de brillo metálico, excelentes acabados y buena conductividad eléctrica en los productos que diseñan y/o fabrican.

El comportamiento del compuesto intermetálico aluminio-hierro influye en gran medida en la resistencia a la oxidación, la formación de escamas, la abrasión y la alta dureza que puede presentar el material recubierto.

El aluminio le proporciona al acero excelente formabilidad, soldabilidad y maquinabilidad con lo cual se pueden obtener excelentes acabados superficiales.

La industria petrolera ha mostrado gran interés en los aceros recubiertos con aluminio o “aceros aluminizados” debido a su gran resistencia a la corrosión en ambientes ricos en azufre (H_2S) a temperaturas elevadas, así como su gran resistencia al escamamiento, a la carburización y a la penetración de hidrógeno.

La figura 13 muestra un ejemplo en el que se puede observar claramente la apariencia de un acero al carbono aluminizado y uno sin aluminizar después de exponerlos a altas temperaturas durante aproximadamente 20 días en una atmósfera altamente oxidante.

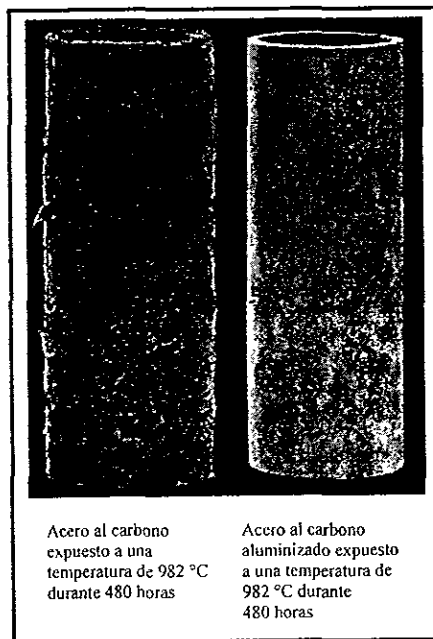


Figura 13.- Apariencia de un acero al carbono aluminizado después de exponerlo a altas temperaturas bajo una atmósfera altamente oxidante.

En la figura anterior se puede observar claramente que el acero aluminizado solo presentó ciertas manchas sobre su superficie las cuales no producen ningún efecto sobre la resistencia a la corrosión del material. Mientras que el acero sin aluminizar presentó un severo escamamiento el cual trae como consecuencia la falla del material.

Hace algunos años, se realizaron algunas investigaciones utilizando aleaciones comerciales y experimentales, las cuales demostraron que con la adición de 3 a 4 % de aluminio en aleaciones al cromo-molibdeno, se tiene una excelente resistencia al ataque por sulfuros. En estas investigaciones se utilizó la técnica de difusión para adicionar pequeñas cantidades de aluminio (3 a 4 %) en el metal base.

Se llevaron a cabo varias pruebas de corrosión con estos aceros en ambientes con hidrógeno (H_2) y ricos en azufre (H_2S) con el objeto de demostrar la confiabilidad que puede presentar una capa protectora de aluminio de 0.13 mm de espesor contra la corrosión bajo estos ambientes, así mismo, demostrar la estabilidad metalúrgica producida por el aluminio en estos aceros.

En estas pruebas se utilizó principalmente la aleación 9Cr-1Mo como metal base, empleando la técnica de difusión para formar el aluminizado 9Cr-1Mo. Esta aleación, la cual tenía una capa protectora de aluminio de aproximadamente 0.13 mm de espesor fue sometida a pruebas de laboratorio con 5 % de H_2S a 330 horas y con una presión de 36.207 kg/cm^2 (515 lb/pulg.^2).

Las velocidades de corrosión obtenidas durante la prueba fueron las siguientes:

Para la aleación 9Cr-1Mo a $371 \text{ }^\circ\text{C}$ ($700 \text{ }^\circ\text{F}$), la velocidad de desgaste fue de 103.1 mpy, mientras que para el aluminizado 9Cr-1Mo fue de 2.9 mpy; para la aleación 9Cr-1Mo a $482 \text{ }^\circ\text{C}$ ($900 \text{ }^\circ\text{F}$), la velocidad de desgaste fue de 335.8 mpy, mientras que para el aluminizado fue de 2.1 mpy. Con esto se comprobó que los aceros con pequeños contenidos de aluminio, mejoran la resistencia a la corrosión en ambientes ricos en azufre a elevadas temperaturas.

Después de examinar la superficie del aluminizado mediante un microscopio electrónico, se comprobó que no había ocurrido ataque en la superficie del acero.

Otras pruebas realizadas a los aceros inoxidable austeníticos con contenido de 3 a 5 % de aluminio, mostraron que estos aceros son bastante resistentes a la sulfuración en el rango de $593 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1100 \text{ }^\circ\text{F}$) a $648 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1200 \text{ }^\circ\text{F}$), pues su velocidad de desgaste osciló entre 6 y 7 mpy. Debido a que estos aceros presentan menos escamamiento y mejoran la resistencia a la carburización a elevadas temperaturas, se ha hecho más notable su utilización como material para tubería durante los últimos años.

También se realizaron algunas pruebas con aceros al carbono y aceros al cromo-molibdeno (2.25Cr-1Mo) con y sin contenido de aluminio. Estos aceros fueron expuestos en un reactor

desulfurizador con 0.8 % moléculas de H_2S , 10,752 horas, a $390\text{ }^\circ\text{C}$ ($735\text{ }^\circ\text{F}$) y con una presión de 112.5 kg/cm^2 (1600 lb/pulg^2). Los resultados fueron los siguientes:

Para los aceros al carbono y al cromo-molibdeno sin contenido de aluminio, el ataque fue muy severo, pues la velocidad de desgaste osciló entre 30 y 40 mpy. Mientras que los aluminizados mostraron muy poca pérdida de peso, es decir, sufrieron un desgaste mínimo.

4.1.2 Métodos de aluminizado.

Existen varios métodos de aluminizado, entre los cuales se encuentran la inmersión en caliente, la difusión, la utilización de una suspensión espesa de aluminio, el rociado térmico, el revestimiento, el vacío o deposición química de vapor, la electrodeposición y la electroforesis (movimiento de partículas suspendidas a través de un fluido o gel bajo la acción de una fuerza electromotriz aplicada a electrodos en contacto con la suspensión).

La elección del método adecuado está determinada por la aplicación que se le pretenda dar al acero, así como de varios factores como tamaño y forma del producto, volumen de producción y costo.

Para obtener un recubrimiento exitoso se deben tomar en cuenta dos factores muy importantes:

- 1) La preparación adecuada de la superficie del metal base.
- 2) Para el caso de procesos a altas temperaturas, controlar la formación y concentración del compuesto intermetálico aluminio-hierro que se forma en la interfase del recubrimiento y del metal base.

Existen varios métodos para preparar la superficie del metal a recubrir, sin embargo, el método seleccionado debe remover las escamas de óxido de hierro que se llegan a formar en la superficie del metal, ya sea mediante procesos químicos o mecánicos, así como también remover la humedad absorbida y el gas de la superficie.

Cuando se desea obtener un compuesto intermetálico, es posible controlar la cantidad de aluminio-hierro mediante la adición de silicio, berilio o cromo al baño de recubrimiento.

En algunas aplicaciones, una película delgada de fosfato permite la excelente unión del aluminio con el metal base, además de que controla el crecimiento de la capa intermetálica.

4.1.2.1 Aluminizado mediante inmersión en caliente.

El aluminizado mediante inmersión en caliente no limita la posibilidad de trabajar con piezas de dimensiones considerables, pues basta con seleccionar el equipo adecuado para satisfacer las necesidades que demande la pieza o elemento a recubrir. De esta manera, se pueden aluminizar placas, tubos, láminas o alambres de acero.

Este método se puede desarrollar mediante un gran número de procesos patentados, sin embargo, el más ampliamente utilizado para aluminizar lámina, es el método Sendzimir. Este consiste en oxidar la superficie del metal base, reduciendo posteriormente la superficie oxidada en una atmósfera reductora y sumergiéndola en aluminio fundido. Este procedimiento permite la excelente unión del recubrimiento de aluminio con el metal base.

Existen otros procesos que se basan en la utilización de una atmósfera reductora, pero sin oxidar previamente la superficie del metal base. En términos generales, una atmósfera reductora puede ser considerada como un flujo continuo de gases.

El equipo comúnmente utilizado para aluminizar láminas de acero de dimensiones comerciales mediante inmersión en caliente es el equipo de recocido en línea, el cual se utiliza también en el proceso de galvanizado. Este proceso consiste esencialmente de tres operaciones: preparación de la superficie, tratamiento térmico del metal base y recubrimiento con aluminio.

La preparación de la superficie es una operación de dos fases. Primero, se eliminan todas las impurezas de la superficie mediante oxidación a elevadas temperaturas o mediante limpieza química. Posteriormente, se reduce la superficie oxidada dejando con esto listo al elemento para el recubrimiento.

La formación del compuesto intermetálico aluminio-hierro le proporciona al metal base buena resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas. Sin embargo, la formación excesiva de este compuesto puede disminuir las propiedades mecánicas del metal base e inclusive llegar a fragilizarlo. El exceso de este compuesto se puede llegar a producir cuando el contacto entre el aluminio y el metal base es extremadamente rápido, por lo que se debe controlar el tiempo de inmersión y la temperatura del aluminio fundido.

Con la adición de pequeños porcentajes de silicio (alrededor del 10 %) al baño de recubrimiento, se logra disminuir considerablemente el espesor de la capa intermetálica aluminio-hierro.

En la figura 13 se puede observar que el espesor de la capa intermetálica disminuye rápidamente conforme se aumenta el contenido de silicio en un 2.5 % al baño de recubrimiento. Sin embargo, cabe señalar que si los incrementos son mayores a 2.5 %, la disminución de la capa intermetálica se hará más lenta, por lo que se necesitará mayor tiempo de inmersión, lo cual puede traer como consecuencia un aumento en el costo del proceso y por consiguiente en el costo del material.

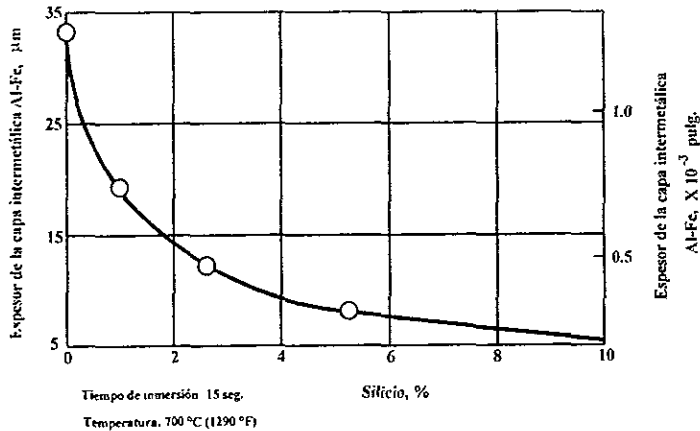


Figura 14.- Efecto del silicio sobre la formación de la capa intermetálica aluminio-hierro.

Las láminas de acero recubiertas con aleación aluminio-silicio, resisten perfectamente las operaciones de formado, estirado y centrifugado sin que exista desprendimiento del recubrimiento. Mientras que las placas de acero recubiertas con aluminio comercial puro resisten operaciones moderadas de rolado y pueden ser centrifugadas e inclusive darle un cierto relieve a su superficie, pero no son susceptibles al proceso de estirado. Sin embargo, las placas con ambos tipos de recubrimiento pueden ser dobladas aproximadamente a un diámetro igual a dos veces el espesor de la placa a una temperatura de 180 °C.

Se recomienda que las placas de acero recubiertas, sean fabricadas antes de que el recubrimiento sea difundido, ya que la difusión produce un exceso en la formación del compuesto intermetálico aluminio-hierro.

Otro factor que se debe cuidar durante el proceso, es la formación excesiva de hierro en el compuesto intermetálico ya que este se oxida rápidamente bajo la presencia de aire húmedo o agua formando una capa delgada de óxido de hierro en la superficie de la zona de difusión aluminio-hierro. Sin embargo, cabe señalar que esta superficie oxidada no produce ningún efecto sobre la resistencia a la corrosión del aluminizado. Ya que en base a algunas investigaciones realizadas sobre tubos fabricados de acero al carbono aluminizados tanto en su superficie interna como externa sometidos al medio ambiente durante 3 años bajo un ambiente sumamente húmedo con temperaturas extremas alrededor de los 40 °C, demostraron mediante pruebas metalográficas

realizadas sobre la sección transversal del tubo (figura 15 a) y sobre el diámetro externo de la zona de difusión aluminio –hierro (figura 15 b) que la superficie que había sido cubierta por una capa delgada de óxido se encontraba completamente intacta.



Figura 15.- (a) fotomicrografía a 25X de la sección transversal del tubo aluminizado. (b) fotomicrografía a 100X del diámetro externo de la zona de difusión aluminio-hierro.

Si el contenido de hierro en el recubrimiento es mayor al 2 %, se produce una superficie rugosa difícil de maquinarse, lo que trae como consecuencia un aumento en el costo de fabricación.

El contenido de hierro se puede controlar disminuyendo la temperatura del baño de recubrimiento, ya que a bajas temperaturas, el hierro no se llega a mezclar con el aluminio pues solo se concentra en las paredes y esquinas del recipiente donde se lleva a cabo el proceso y de esta manera se puede remover rápidamente.

Otro método para reducir el contenido de hierro es remover parte del baño y agregar aluminio libre de hierro.

El control de la temperatura del baño de recubrimiento es un factor muy importante, ya que como se indica en la figura 16, las altas temperaturas incrementan el espesor de la capa intermetálica y por consiguiente disminuyen el espesor del aluminio puro. Así mismo, con la adición de un 5 % de silicio, se puede manejar un rango más amplio de temperaturas sin que exista un exceso en la formación del compuesto intermetálico Al-Fe.

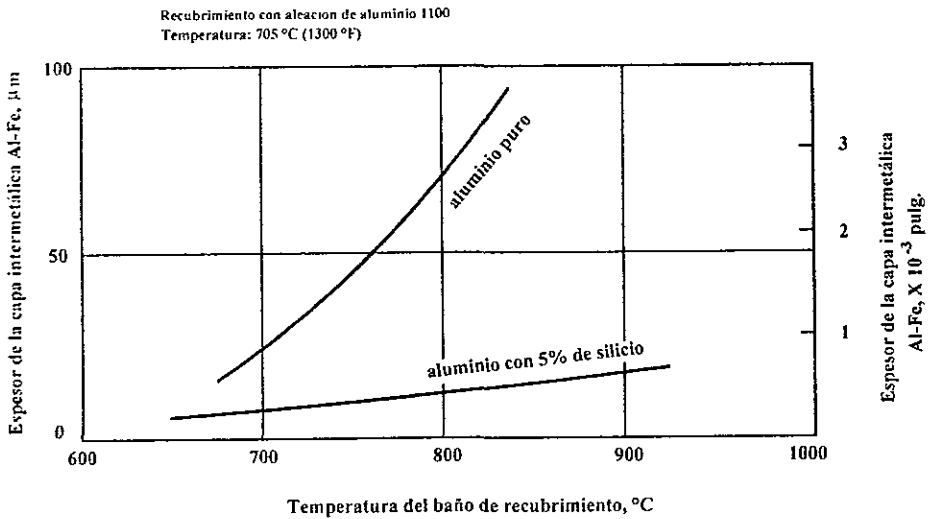


Figura 16.- Efecto de la temperatura y composición del baño de recubrimiento sobre el espesor de la capa intermetálica Al-Fe.

La figura 17 muestra el efecto que tiene el tiempo de inmersión y la composición del metal base sobre el espesor del compuesto intermetálico. Ya que cuando el tiempo de inmersión es elevado, se incrementa el espesor del compuesto Al-Fe. Por lo tanto, se debe mantener el tiempo de inmersión lo más bajo posible. Así mismo, los aceros y aleaciones con alto contenido de carbono, producen recubrimientos con espesores más delgados.

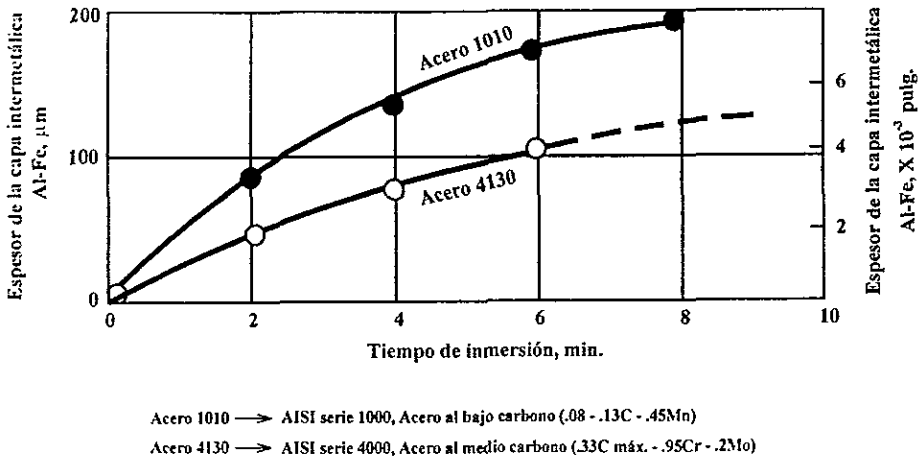


Figura 17.- Efecto del tiempo de inmersión y composición del metal base sobre el espesor de la capa intermetálica Al-Fe.

Otro factor muy importante es el efecto que tiene la adición de ciertos elementos al baño de recubrimiento sobre el espesor del compuesto intermetálico, ya que como se muestra en la figura 18, a través de algunas pruebas experimentales realizadas sobre aceros al carbono, se comprobó que el silicio y el berilio son los elementos que más ayudan a disminuir el exceso de este compuesto.

La resistencia de las partes recubiertas, especialmente de aquellas fabricadas de material trabajado en frío, se puede ver afectada por el proceso de recubrimiento. Por lo que en algunas ocasiones se tiene que recurrir a la utilización de materiales de alta resistencia para controlar este problema. Sin embargo, algunas pruebas realizadas a pernos fabricados de acero al medio carbono (AISI 4140 templado en aceite a 845°C y revenido a 595°C 0.43 C máx.- 0.95 Cr máx.- 0.2 Mo) recubiertos de aluminio, demostraron que se puede obtener una resistencia máxima a la tensión en el rango de 7749.84 kg/cm^2 a 8055.75 kg/cm^2 después del recubrimiento, lo cual hace innecesaria la utilización de materiales de alta aleación, pues el valor obtenido de las pruebas es lo suficientemente aceptable para efectos prácticos

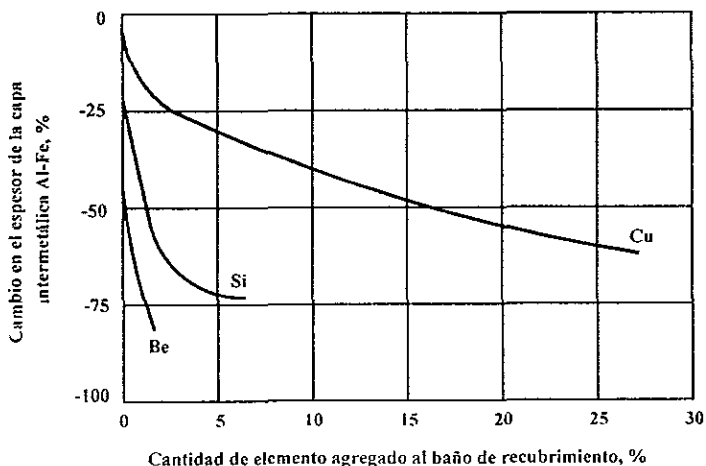
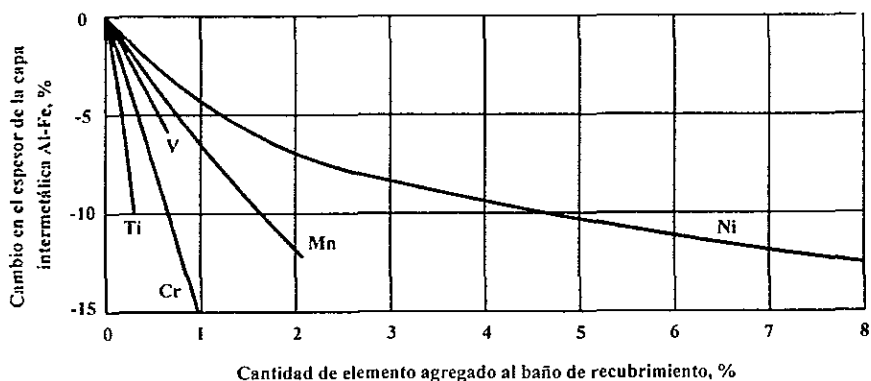


Figura 18.- Efecto que tiene la adición de ciertos elementos al baño de recubrimiento sobre el espesor del compuesto intermetálico Al-Fe en recubrimientos sobre aceros al carbono.

La dureza de algunos metales base se puede controlar mediante el recubrimiento con aluminio a través del método de inmersión en caliente bajo cierta temperatura y aleación de aluminio. Esta alternativa puede ser factible cuando los tratamientos térmicos utilizados para disminuir la dureza de ciertos materiales resulten más costosos que el recubrimiento con aluminio mediante este proceso.

La tabla 9 muestra el efecto que tiene el recubrimiento mediante inmersión en caliente utilizando aleación de aluminio 1100 a 700-720 °C (1300 a 1330 °F) sobre la dureza de algunos metales base, antes y después del recubrimiento.

Tabla 9.- Valores de dureza de algunos metales base antes y después del recubrimiento mediante inmersión en caliente.

Metal base	Tiempo de inmersión	Temperatura del baño de recubrimiento		Dureza Rockwell C	
		minutos	°C	°F	Antes del Recubrimiento	Después del Recubrimiento
	Acero AISI 4140	5	720	1330	32-36	29-32
Acero AISI 4340	5	720	1330	32-36	29-32
Acero inoxidable 410	4	715	1320	40-42	28-30

Se utilizó aleación de aluminio 1100 como recubrimiento; el promedio del espesor fue de 152 μm (6 x 10⁻³ pulg.), del cual el 50 % fue compuesto intermetálico.

Acero AISI 4140 ⇒ Acero al medio carbono (0.43 C máx.-0.95 Cr máx.-0.2 Mo máx)

Acero AISI 4340 ⇒ Acero al medio carbono (0.43 C máx.-0.8 Cr -1.83 Ni)

Acero inoxidable 410 ⇒ Acero inoxidable serie 400 (martensítico) resistente a elevadas temperaturas (0.15 C máx.-12.5 Cr-1 Mn máx.)

La composición del metal base no limita el proceso de recubrimiento de aluminio mediante inmersión en caliente, ya que su elección tan solo depende de los requerimientos de servicio.

Sin embargo, el recubrimiento con aluminio mediante este proceso es más costoso que el recubrimiento con otros materiales. Esto se debe a que la superficie del metal base requiere una limpieza mucho más meticulosa, se requieren temperaturas más elevadas para el recubrimiento (aproximadamente 700 °C) y debido a que para este proceso es necesario utilizar un recipiente cerámico, se necesita la electricidad como medio de calentamiento, lo cual incrementa el costo del proceso. Ya que por ejemplo, si fuera posible utilizar recipientes de hierro, se podría emplear como combustible el gas o el petróleo y de esta forma se minimizarían los costos.

4.1.2.2 Aluminizado mediante el proceso de difusión.

El proceso de difusión es metalúrgicamente y microestructuralmente muy similar al proceso de cementación por lo que puede ser referido como este último.

Este proceso produce una profundidad de difusión mucho más uniforme que el proceso de inmersión en caliente debido a la ausencia de los complejos efectos de transferencia de calor y gradientes térmicos que se generan mediante el otro proceso. Además, se puede obtener una profundidad de difusión mayor, particularmente en componentes que así lo requieran.

Las aleaciones que generalmente se recubren mediante este proceso son las de hierro, níquel, cobalto y cobre.

El recubrimiento mediante este proceso requiere de 3 factores:

- 1) Aluminio, ya sea en forma de polvo o una ferroaleación
- 2) Una fase cerámica que ayude a prevenir la aglomeración de los componentes metálicos
- 3) Un compuesto binario volátil que actúe como medio de transferencia química para el aluminio.

El contenido de aluminio utilizado para este proceso puede variar de 5 a 60 %.

En este proceso se presenta una fase llamada "calorización" la cual, por definición, es un término que está relacionado con todos los procesos de difusión utilizados para recubrir metales con aluminio. Además, es un término comercial que está relacionado con un proceso de difusión particular, el cual consiste de dos fases:

- 1) El metal es recubierto con una alta concentración de aluminio, la cual penetra a una profundidad de aproximadamente $150 \mu\text{m}$ (6×10^{-3} pulg.).
- 2) El aluminio se difunde dentro del metal a una profundidad de $1000 \mu\text{m}$ (40×10^{-3} pulg.) para formar una aleación con el metal base.

En este proceso, el metal a recubrir se somete a un baño de sales y polvo de aluminio en un contenedor perfectamente cerrado a una temperatura de 820 a 980 °C (1500 a 1800 °F) durante 6 a 24 horas. Posteriormente, se extrae el metal del contenedor y se calienta en aire para difundir el aluminio. La concentración del aluminio puro en la superficie del recubrimiento es de aproximadamente 50 a 60 % después del recubrimiento, y de aproximadamente 25 % después del ciclo de difusión, ya que la difusión disminuye el espesor del aluminio puro e incrementa el espesor del compuesto intermetálico Al-Fe.

Mediante este proceso se pueden recubrir tubos de 13 a 910 mm ($\frac{1}{2}$ a 36 pulg.) de diámetro exterior y 12 m (40 pies) de longitud.

El recubrimiento se puede llevar a cabo en contenedores (el recubrimiento se realiza en forma estática) o en destiladores rotatorios (existe un constante movimiento). Sin embargo, los equipos ampliamente utilizados son los destiladores rotatorios, ya que debido al movimiento y al calentamiento uniforme que se obtiene en estos equipos, el espesor del recubrimiento es mucho más uniforme.

El equipo que generalmente se necesita para llevar a cabo el recubrimiento mediante este proceso incluye equipos removedores de grasas y equipos de ataque abrasivo, los cuales sirven para limpiar y preparar la superficie a recubrir; equipos para la preparación del polvo de aluminio, entre los cuales se incluyen mezcladores e instrumentos de medición; hornos y equipos destiladores fabricados generalmente de Hastelloy X.

Mediante este proceso es posible obtener aproximadamente un 60 % de aluminio en la superficie del metal base. Sin embargo, el proceso es controlado para limitar la concentración de aluminio a un 25 % en aleaciones de hierro, y a un 12 % en aleaciones de níquel y cobalto.

Cabe mencionar que cuando se requiere aumentar la profundidad de difusión, es decir, aumentar la penetración del aluminio en el metal, y disminuir la concentración de aluminio en la superficie, se aplica un tratamiento de difusión subsecuente al proceso de cementación.

Mediante este proceso se pueden obtener recubrimientos de 25 a 1000 μm (1 a 40 $\times 10^{-3}$ pulg.) de espesor.

Se aplica un espesor mayor de recubrimiento cuando el metal base es acero o cobre. Mientras que para las aleaciones de níquel y cobalto, el espesor del recubrimiento aplicado es menor.

4.1.2.3 Aluminizado mediante la utilización de una suspensión espesa de aluminio.

Este método es ampliamente utilizado para recubrir partes metálicas de equipos que trabajan a elevadas temperaturas en industrias químicas y petroleras con el fin de aumentar su eficiencia y disminuir el problema de corrosión.

La configuración y tamaño de la pieza de trabajo no limita la aplicación de este proceso ya que generalmente el equipo utilizado es lo suficientemente grande para contener a la pieza de trabajo. No se recomienda recubrir partes cuya sección transversal sea menor a 0.25 mm (0.010 pulg.) mediante este proceso, ya que se pueden fragilizar y deformar debido a la dureza del recubrimiento y a la diferencia de expansión que existe entre el recubrimiento y el metal base.

Existen tres tipos de aluminizado mediante este método, los cuales difieren uno con respecto del otro del mecanismo a través del cual se transfiera el aluminio al metal base.

En el primer tipo, el aluminio (en suspensión) reacciona y se difunde dentro del metal base. El metal base puede ser cualquier acero inoxidable de la serie 300 cuyo espesor no sea menor a .025 mm (0.010 pulg.). Generalmente, el espesor del recubrimiento es de 50 a 100 μm ($2 \text{ a } 4 \times 10^{-3}$ pulg.).

En el segundo tipo, el aluminio se funde y circula sobre el metal base produciendo un recubrimiento completo durante un ciclo de calentamiento a baja temperatura. Después de eliminar el flujo de aluminio requerido para el proceso, se puede aplicar un segundo ciclo de calentamiento a alta temperatura para completar la difusión del recubrimiento. Cabe mencionar que algunas aplicaciones no requieren que el recubrimiento sea difundido completamente. El metal base puede ser una aleación de hierro, níquel o cobalto. El espesor del recubrimiento es de 25 a 75 μm ($1 \text{ a } 3 \times 10^{-3}$ pulg.) en aleaciones de cobalto y níquel.

En el tercer tipo, existe una combinación entre la reacción de la fase de vapor y la difusión en estado sólido, lo cual permite producir una capa delgada de bajo contenido de aluminio completamente difundido sobre la superficie del metal base. En este tipo de recubrimiento, se utiliza una aleación de aluminio en forma de suspensión o pasta, la cual es calentada a una temperatura por encima de 1040 °C (1900 °F). El metal base puede ser una aleación de níquel o cobalto. El espesor del recubrimiento es de 6.3 a 19 μm ($0.25 \text{ a } 0.75 \times 10^{-3}$ pulg.).

Los procesos del segundo y tercer tipo, son ampliamente utilizados para recubrir superaleaciones y aceros inoxidables austeníticos ya que para estos materiales, se requiere cierta precisión en el espesor del recubrimiento lo cual ayude a minimizar la reducción de las propiedades mecánicas del metal base debido a las altas temperaturas.

Por ejemplo, la figura 19 compara los valores de la resistencia máxima a la tensión del acero inoxidable 321, aleación de cobalto L-605 e Inconel 600 con y sin recubrimiento de aluminio después de que han sido expuestos a elevadas temperaturas durante periodos de tiempo prolongados.

En esta figura se puede observar que los materiales sin recubrimiento de aluminio sufrieron una considerable disminución en su resistencia máxima a la tensión como consecuencia de la alta temperatura y del aumento gradual en el tiempo de exposición.

En este método, la temperatura de difusión y composición del metal base, tienen gran influencia sobre el espesor del recubrimiento. Ya que por ejemplo, como se muestra en la figura 20, para los aceros inoxidables al cromo, el espesor del recubrimiento se incrementa conforme aumenta la temperatura de difusión.

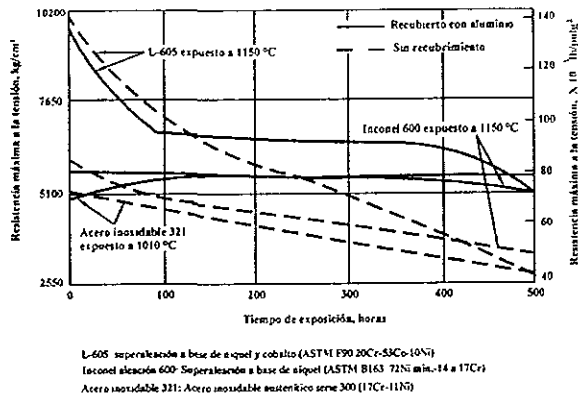


Figura 19.- Efecto del tiempo de exposición a elevadas temperaturas sobre la resistencia máxima a la tensión del acero inoxidable 321, aleación de cobalto L-605 e Inconel 600 con y sin recubrimiento de aluminio.

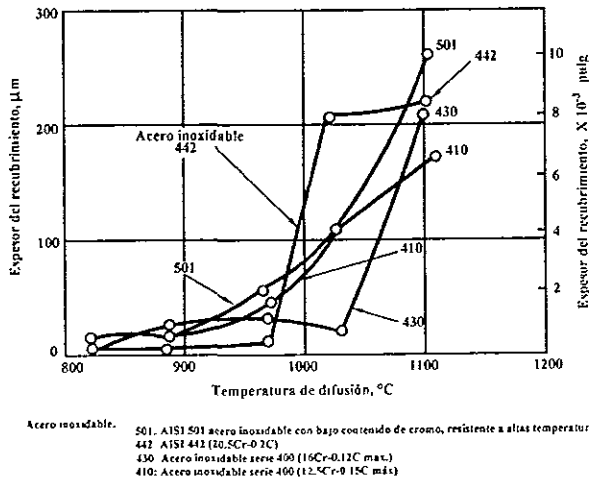
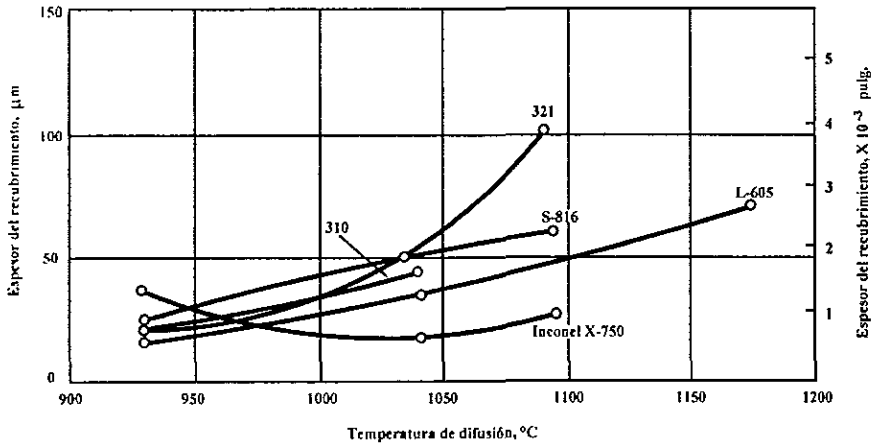


Figura 20.- Efecto de la temperatura de difusión sobre el espesor del recubrimiento en aceros inoxidables al cromo.

Las aleaciones de níquel y cobalto producen una disminución en el porcentaje de difusión durante el proceso de recubrimiento a través de este método debido a la estabilidad que presentan los compuestos intermetálicos NiAl, Ni₃Al, CoAl, Co₃Al, así como la baja solubilidad del aluminio sólido bajo la presencia de níquel y cobalto. Por lo que, como se muestra en la

figura 21, mientras mayor es el contenido de níquel y cobalto en la aleación, menor es el espesor del recubrimiento producido mediante este método.



321: Acero inoxidable austenítico serie 300 (18Cr-8Ni).

310: Acero inoxidable austenítico serie 300 (18Cr-8Ni).

S-816: Aleación de cobalto, resistente a la corrosión y oxidación a altas temperaturas.

L-605: Superalación a base de níquel y cobalto (ASTM F90 20Cr-53Co-10Ni).

Inconel X-750: Superalación a base de níquel (ASTM B637 70Ni mín.-14 a 17Cr).

Figura 21.- Efecto de la temperatura de difusión y composición del metal base sobre el espesor del recubrimiento.

El tiempo de difusión, a ciertas temperaturas, tiene un mínimo efecto sobre el espesor del recubrimiento. Sin embargo, como se muestra en la figura 22, este factor tiene un efecto mucho más pronunciado sobre el espesor del recubrimiento en aleaciones con alto contenido de níquel que en aceros inoxidables. Ya que por ejemplo, el espesor del recubrimiento para el inconel aleación X-750 a 1040 °C y con un tiempo de difusión de 3 horas es menor que para el acero inoxidable 321 a la misma temperatura y con el mismo tiempo de difusión debido a que el inconel X-750 tiene un porcentaje más alto de níquel que el acero inoxidable 321.

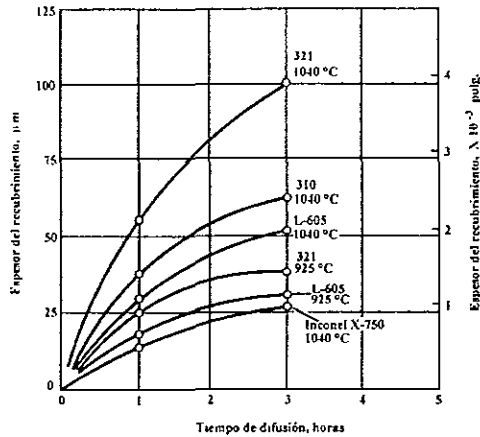


Figura 22.- Efecto del tiempo de difusión sobre el espesor del recubrimiento en aleaciones con alto contenido de níquel y aceros inoxidables.

4.1.2.4 Aluminizado mediante el proceso de rociado térmico.

Este proceso consiste en fundir un alambre o varilla de aluminio mediante la aplicación de altas temperaturas.

El material fundido se proyecta con aire a presión o cualquier otro gas comprimido sobre las superficies a recubrir mediante pistolas de proyección. El calor necesario para fundir los extremos de los alambres se obtiene mediante una flama de oxígeno y gas combustible o mediante arco eléctrico. Las partículas metálicas proyectadas forman un entramado de gotas, rodeadas por óxido, que se adhieren entre sí al chocar con la superficie del acero limpia y tratada con chorro.

Las capas excesivamente delgadas son porosas, mientras que las capas más gruesas tienen tendencias a desprenderse o resquebrajarse a causa de la deformación por dilatación térmica. Por lo tanto, es necesario controlar el espesor del recubrimiento.

Generalmente, el recubrimiento presenta una densidad de 85 a 90 % y un contenido de óxido de 0.5 a 3 %.

Mediante este método se tiene menor riesgo de proporcionar distorsión térmica al metal base, ya que las partículas son muy pequeñas, por lo que se imparte menor cantidad de calor al metal base.

como por ejemplo: hidrógeno, propano o gas natural, es necesario incrementar la presión del compresor

Los alambres más pequeños se utilizan cuando se requiere una textura fina en el recubrimiento. aunque la velocidad de rociado también es un factor determinante en la obtención de esta propiedad.

La distancia que debe existir entre la superficie a recubrir y la pistola de proyección depende del tamaño del alambre. Ya que por ejemplo, para un alambre de 4.8 mm (3/16 pulg.), el cual puede ser rociado a una velocidad dos veces mayor que el alambre de 3.2 mm (1/8 pulg.), la distancia recomendada es de aproximadamente 203 a 254 mm (8 a 10 pulg.)

El proceso de recubrimiento mediante arco eléctrico utiliza dos electrodos de alambre consumible los cuales se aíslan uno del otro. La alimentación de estos electrodos se realiza a velocidades controladas para después intersectarse en un punto en donde se genera un arco eléctrico debido al contacto entre los electrodos y gracias a la diferencia de potencial que se genera en los mismos. Este contacto produce altas temperaturas suficientes para provocar que el alambre de aluminio comience a fundirse.

Una corriente de aire comprimido en la zona en donde se lleva a cabo el contacto eléctrico produce que las partículas de material fundido sean proyectadas a altas velocidades sobre la superficie del metal a recubrir.

El tamaño de las partículas fundidas se puede controlar mediante la variación de los ángulos de contacto de los electrodos. Ya que por ejemplo, si el ángulo de contacto es demasiado grande, el tamaño de las partículas se incrementa produciendo un recubrimiento rugoso difícil de maquinarse. La elección entre estas dos técnicas se basa en las propiedades que adquiere el recubrimiento final así como el aspecto económico.

El proceso mediante arco eléctrico tiene una velocidad de impacto mucho mayor (240 – 305 m/s con una temperatura de 4000 °C) que la que posee el proceso mediante flama (180-240 m/s con una temperatura de 2760 °C). Esto ocasiona que el proceso mediante arco sea mucho más eficiente, pues produce recubrimientos con microestructuras y propiedades mucho más consistentes que los que produce el proceso mediante flama, ya que las altas temperaturas que alcanzan las partículas fundidas ocasionan que la unión del recubrimiento con el metal base sea casi metalúrgica, es decir, el recubrimiento posee mayor adherencia

Las altas temperaturas que alcanza el arco eléctrico produce que el porcentaje de material fundido sea de 3 a 5 veces mayor del que produce el proceso mediante flama. Esta ventaja también se ve reflejada en la reducción de costos y energía, pues la energía eléctrica que se requiere para el proceso es más barata que el combustible y oxígeno que se utilizan en el proceso

mediante flama. Además, la utilización de la energía eléctrica permite una eficiencia térmica considerablemente mayor (60 %) que la que permite el calentamiento mediante flama (15-20 %) lo cual también genera que el porcentaje de deposición aumente.

Otra ventaja que ofrece el proceso mediante arco es que la preparación de la superficie a recubrir es menos meticulosa que la que se necesita para el proceso mediante flama. Además de que los recubrimientos producidos son más densos y presentan menor contenido de óxido.

La mayor desventaja que posee el proceso mediante flama con respecto al proceso mediante arco es que los recubrimientos producidos presentan baja adherencia y gran porosidad.

En general, en el proceso de aluminizado mediante rociado térmico la resistencia de adhesión es el factor determinante de las buenas propiedades del recubrimiento, por lo que se debe tener mucho cuidado y control con ciertos factores relacionados con la resistencia de adhesión como son: el grado de deformación de las partículas fundidas, las cuales a su vez, dependen del grado de fundición y velocidad de impacto, la preparación de la superficie a recubrir, la capacidad que presente el metal base para unirse o experimentar una reacción química o proceso de difusión con el material depositado, así como la similitud de coeficientes de expansión térmica entre el metal base y el material depositado.

La preparación de la superficie es, como ya se mencionó, uno de los factores determinantes en la obtención de buenas propiedades del recubrimiento. Por lo tanto, la superficie debe estar perfectamente limpia y libre de impurezas. La preparación de esta tan sólo consiste en la eliminación de grasas e impurezas mediante la aplicación de chorros de arena a altas velocidades. Sin embargo, se tienen que tomar ciertas precauciones como las que se mencionan a continuación:

- El tamaño de grano de la arena debe ser de 20-40 mallas. La arena debe ser sílica o de un material similar. Debe estar limpia y libre de minerales que contaminen la superficie a recubrir.
- Una vez que se ha limpiado perfectamente la superficie, esta no debe tocarse con la mano y debe mantenerse limpia y seca hasta la aplicación del recubrimiento, el cual se debe llevar a cabo después de 4 horas de haberse realizado la limpieza de la superficie a recubrir.
- El aire comprimido que se utiliza para la limpieza de la superficie mediante chorro de arena debe estar libre de humedad y de impurezas
- La presión del compresor se debe mantener al menos a 6 kg/cm^2 (80 lb/pulg.^2).

- Cuando se trabaje con aceros inoxidable y aceros tratados térmicamente cuya dureza sea de 250 HB o mayor, se tendrá que utilizar una presión de aire más elevada y un tamaño de grano más grande en la limpieza de la superficie a recubrir.

El mayor defecto que presenta el proceso de rociado térmico en general, es que los recubrimientos que produce presentan un grado considerable de porosidad así como la formación de inclusiones de óxido debido a la oxidación que ocurre durante el rociado.

El exceso de estas inclusiones produce que la dureza del recubrimiento aumente, con lo cual se hace más difícil su maquinabilidad y soldabilidad.

La porosidad que presenta el recubrimiento debe ser eliminada mediante la utilización de selladores, de lo contrario, el material sufrirá corrosión y oxidación.

Los poros deben ser sellados inmediatamente después del rociado. El material de estos puede ser un copolímero de vinil, silicio u otro material similar.

Sin embargo, dependiendo de la composición del sellador, este le proporcionará al recubrimiento y por lo tanto al metal base excelente protección a elevadas temperaturas durante periodos prolongados de exposición. Ya que por ejemplo, los selladores a base de silicio, resisten temperaturas por encima de 650 °C. Se recomienda la utilización de estos selladores en aplicaciones cuya temperatura no exceda los 700 °C, ya que resultan más económicos que difundir el recubrimiento a temperaturas por encima de 730 °C.

Sin embargo, si se quiere obtener un recubrimiento más denso y con una unión casi metalúrgica con el metal base, este se debe someter a un proceso de difusión, subsecuente al proceso de rociado térmico, calentando el material recubierto a una temperatura de aproximadamente 730 °C. Ya que a esta temperatura, el recubrimiento se funde, se homogeniza y comienza a difundirse en el metal base para formar una capa de compuesto intermetálico Al-Fe la cual, como ya se explicó anteriormente, le proporciona al metal base gran resistencia a la corrosión y oxidación a elevadas temperaturas si se controla su formación. ya que un exceso de este compuesto, provoca que el recubrimiento se vuelva frágil y que el metal base sea susceptible a la corrosión y oxidación a elevadas temperaturas.

La tabla 10 muestra como varía el espesor y la dureza del compuesto intermetálico, con la variación del tiempo y temperatura de difusión, así como con la composición del recubrimiento.

Tabla 10.- Efectos que producen el tratamiento de difusión y la composición del alambre de aluminio sobre los recubrimientos producidos mediante el proceso de rociado térmico.

Composición del alambre de aluminio	Tiempo de difusión s	Temperatura de difusión		Capa intermetálica				Dureza R _C	
		°C	°F	Espesor total		Espesor interno		Externa	Interna
				μm	X10 ⁻³ pulg	μm	X10 ⁻³ pulg		
Sin silicio	15	790	1450	28	1.1	....	....	66	....
5% de silicio	15	790	1450	18	0.7	....	....	67	....
12% de silicio	15	790	1450	13	0.5	...	....	60	....
Sin silicio	30	980	1800	38	1.5	2.5	0.1	69	44
5% de silicio	30	980	1800	30	1.2	3.8	0.15	66	44
12% de silicio	30	980	1800	20	0.8	2.5	0.1	63	43
Sin silicio	45	1090	2000	46	1.8	20	.08	65	41
5% de silicio	45	1090	2000	41	1.6	18	0.7	64	39
12% de silicio	45	1090	2000	38	1.5	18	0.7	62	42

En la figura 24 se puede observar con mayor claridad los efectos que produce el tiempo y la temperatura de difusión sobre la microestructura, dureza y espesor de los recubrimientos de aluminio mediante rociado térmico en aceros al carbono.

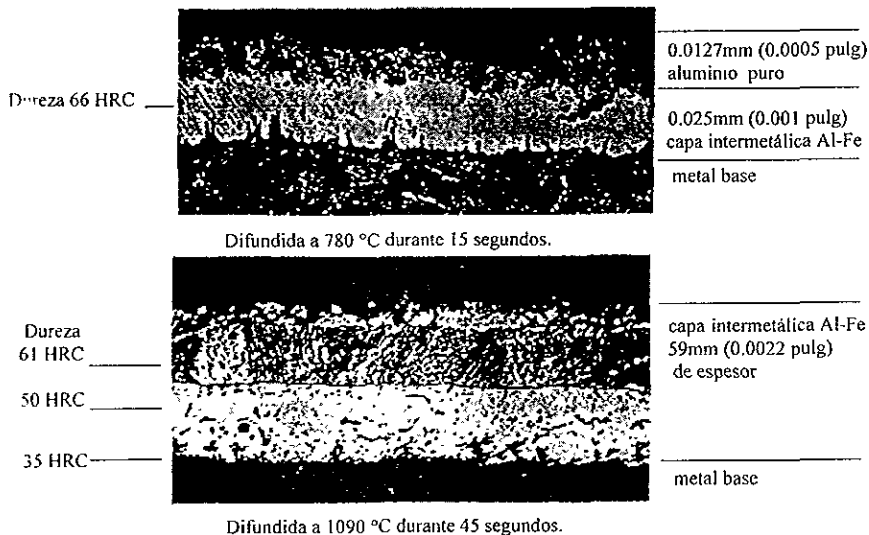


Figura 24.- Microestructura, espesor y dureza de los recubrimientos de aluminio mediante el proceso de rociado térmico en aceros al carbono.

Se puede observar que conforme aumenta el tiempo y temperatura de difusión, aumenta el espesor del recubrimiento y disminuye su dureza. Así mismo, se tiene mayor cantidad de compuesto intermetálico difundido en el metal base. Es decir, se forma casi una aleación entre el recubrimiento y el metal base.

Los espesores de los recubrimientos obtenidos mediante este proceso son de 75 a 380 μm (3 a 15×10^{-3} pulg.).

Para servicios a elevadas temperaturas, donde la resistencia a la oxidación es el principal requerimiento, se recomiendan recubrimientos con espesores de 130 a 200 μm (5 a 8×10^{-3} pulg.). Mientras que para servicios muy corrosivos como agua de mar y agua de enfriamiento, se recomiendan recubrimientos con espesores de 230 a 380 μm (9 a 15×10^{-3} pulg.).

4.1.3 Especificación de los aceros aluminizados.

Los aceros recubiertos con aluminio o "aluminizados" se encuentran bajo la designación A 463-88 según ASTM, la cual cubre principalmente láminas de acero disponibles en rollos y en longitudes de corte y como grados de recubrimiento Tipo1 (T1) y Tipo2 (T2). Ambos tipos están recubiertos mediante el proceso de inmersión en caliente.

Sin embargo, para aplicaciones en cambiadores de calor y recipientes a presión en general, los diferentes fabricantes de tubos aluminizados hacen referencia a esta designación para describir sus propiedades mecánicas, peso del recubrimiento, calidad disponible, así como el grado de recubrimiento.

El recubrimiento Tipo1 (T1) se realiza mediante el proceso de inmersión en caliente con una aleación de aluminio-silicio, cuyo contenido de silicio es de 5 a 11 %, el cual mejora la adherencia del recubrimiento con el metal base además de que controla el exceso de la formación del compuesto intermetálico Al-Fe. Este tipo de recubrimiento se utiliza en aplicaciones donde se requiere buena resistencia a la corrosión a altas temperaturas. A su vez, el recubrimiento Tipo1 se divide en dos; el T1 25 el cual es un recubrimiento ligero recomendable para procesos de estirado y para cuando el proceso de soldadura es un factor muy importante en la fabricación del producto. El T1 40, el cual es un recubrimiento regular o comercial cuyo espesor es de aproximadamente 1 milésima de pulgada sobre la superficie del material. Este tipo de recubrimiento se utiliza en aplicaciones que requieren excelente resistencia al calor.

El recubrimiento Tipo1 se divide en los siguientes grados de calidad:

- Calidad comercial (CQ)
- Calidad de estirado (DQ)
- Calidad especial de estirado (DQS)
- Calidad estructural (SQ)

El recubrimiento Tipo2 (T2) se realiza mediante inmersión en caliente con aluminio puro comercial. Este tipo de recubrimiento se utiliza principalmente en aplicaciones que requieren excelente resistencia a la corrosión. Este tipo de recubrimiento se divide únicamente en calidad comercial (CQ) y calidad estructural (SQ).

Los términos de grado de calidad se describen a continuación:

- Calidad comercial (CQ).- Este grado de calidad se utiliza cuando el material va a ser sometido a procesos de doblado, formado o estirado moderados.
- Calidad de estirado (DQ).- Se utiliza cuando el material va a ser sometido a procesos severos de estirado o formado.
- Calidad especial de estirado (DQS).- Se utiliza cuando el material va a ser sometido a procesos severos de estirado o formado o para cuando se requiere un periodo prolongado de vida en el material.
- Calidad estructural (SQ).- Se utiliza cuando se especifican o se requieren ciertas propiedades mecánicas del material. Tales propiedades incluyen la resistencia máxima a la tensión, la dureza, la ductilidad u otras propiedades comúnmente aceptadas mediante pruebas mecánicas.

4.1.3.1 Peso del recubrimiento.

Los recubrimientos de aluminio aplicados a los aceros están designados de acuerdo al peso total del recubrimiento. para el caso de láminas, sobre ambos lados y para tubo, sobre su diámetro interno y externo, en gramos por metro cuadrado (g/m^2) u onzas por pie cuadrado ($oz/pies^2$) de material tal y como se muestra en la tabla 11.

El peso del recubrimiento debe cumplir con los mínimos requerimientos de las pruebas de simple y triple punto.

- Prueba de triple punto.- Esta prueba se debe realizar de acuerdo a la especificación A 428 ASTM. El resultado de la prueba debe ser el promedio de tres muestras.
- Prueba de simple punto.- El resultado de esta prueba es la elección del recubrimiento más ligero arrojado por la prueba de triple punto.

Tabla 11.- Peso del recubrimiento de aluminio

Designación del recubrimiento	Peso mínimo del recubrimiento (b)			
	Prueba de triple punto		Prueba de simple punto	
	g/m ²	oz/pies ²	g/m ²	oz/pies ²
T1 25 (ligero)	80	0.25	60	0.20
T1 40 (regular)	120	0.40	90	0.30
T2 (regular)	230	0.75	200	0.65

(b) Para el caso de lámina, peso total sobre ambos lados de la lámina por unidad de área.

4.1.3.2 Metales base.

Los metales base que pueden ser aluminizados son: aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidable austeníticos y ferríticos y aceros al cromo-níquel de alta aleación ya sea forjados o de fundición. La elección del metal base depende generalmente de las propiedades mecánicas requeridas para cubrir las demandas de la aplicación particular.

Sin embargo, en la tabla 12 se muestran los requerimientos químicos con los que debe cumplir el metal base para los distintos grados de calidad comercial.

Tabla 12.- Requerimientos químicos del metal base.

Elemento	Composición (%)	
	Calidad comercial (CQ)	Calidad de estirado (DQ) y Calidad especial de estirado (DQS)
Carbono, máximo	0.15	0.10
Manganeso, máximo	0.60	0.50
Fósforo, máximo	0.035	0.025
Sulfuro, máximo	0.040	0.035

- Aceros al carbono y al cromo-molibdeno: Se debe utilizar alguno de los grados de estos aceros como metal base cuando API, ASME, o algunos otros códigos relevantes especifiquen buena resistencia mecánica a elevadas temperaturas en aplicaciones tales como cambiadores de calor, calentadores y hervidores. Así como cuando el aluminizado de estas aleaciones proporcione un bajo costo para mejorar la resistencia a la corrosión.

En la figura 25 se muestra la fotomicrografía de un acero al carbono aluminizado en la cual se puede observar que la aleación aluminio-hierro formada en la zona de difusión es una estructura homogénea de una sola fase.

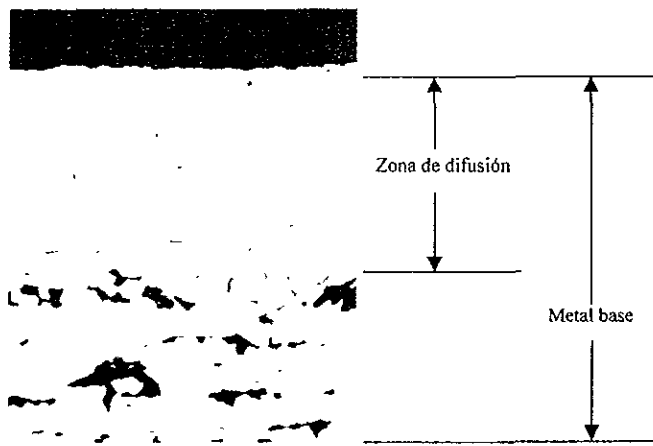


Figura 25.- Fotomicrografía de la estructura de un acero al carbono aluminizado a un aumento de 100x.

- Aceros inoxidables y aleaciones de alto contenido de níquel: Los aceros inoxidables generalmente se utilizan donde los códigos de recipientes a presión requieren buenas propiedades mecánicas a elevadas temperaturas, entre los cuales se incluyen los grados ferríticos y austeníticos así como las aleaciones con alto contenido de níquel y las superaleaciones. A pesar de que los aceros inoxidables y las aleaciones con alto contenido de níquel pueden resistir temperaturas de operación mayores a las que pueden resistir los aceros al carbono o de baja aleación, no están exentos de sufrir corrosión bajo ciertas condiciones. Por lo que el aluminizado de estos materiales es una buena opción para eliminar los problemas de escamamiento y corrosión por ensuciamiento, así como para minimizar la contaminación del proceso, protegerlo contra la carburización e incrementar la eficiencia térmica de la superficie de transferencia de calor.

La figura 26 muestra la fotomicrografía de un acero inoxidable 304 aluminizado en la cual se pueden apreciar dos zonas de difusión diferentes. La capa externa presenta un contenido de aluminio ligeramente mayor.

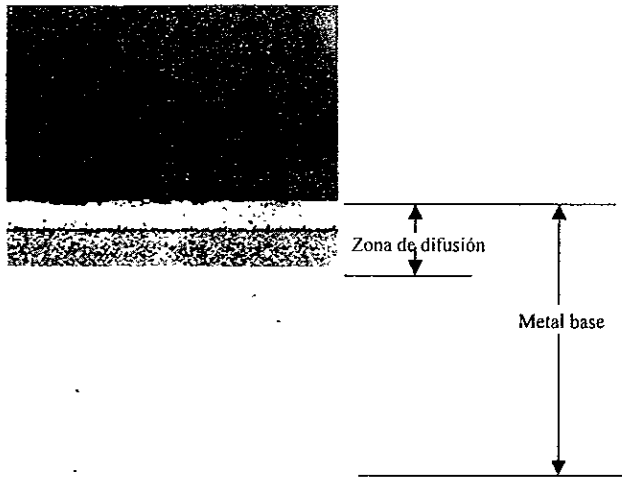


Figura 26.- Fotomicrografía de la estructura de un acero inoxidable 304 aluminizado a un aumento de 100x.

4.1.4 Fabricación.

- El tratamiento térmico post soldadura (si aplica) y la inspección de la tubería y accesorios debe ser conforme a la especificación ANSI B31.3, excepto cuando esta especificación determine lo contrario
- Todos los procesos posibles de soldadura, doblado, forjado, así como otros procesos, se deben llevar a cabo antes del proceso de recubrimiento.
- Todos los filos sobre las superficies que van a ser recubiertas deben ser redondeados a un radio mínimo de 3 mm (1/8 pulg.).
- El fabricante debe remover todos los residuos de soldadura antes de que se lleve a cabo el proceso de recubrimiento.
- Los procedimientos de soldadura para uniones soldadas de tubería y accesorios recubiertos deberán ser aquellos que proporcionen soldaduras de penetración completa mediante la utilización del proceso de soldadura con arco de tungsteno y gas (GTAW) para la pasada de raíz y la utilización del proceso de soldadura de arco sumergido (SMAW) para las pasadas subsecuentes. El electrodo utilizado para la pasada de raíz debe ser conforme a AWS (American Welding Society) Sociedad Americana de Soldadura A5.15 Clase ERNiCr-3 (Inconel 82). Este electrodo puede ser utilizado para las pasadas subsecuentes si se emplea el método de soldadura con arco de tungsteno y gas. Si se utiliza el proceso de soldadura de

arco sumergido, las pasadas subsecuentes se deben realizar con un electrodo AWS A5.11, ERNiCrFe (Inconel 182).

4.1.4.1 Prueba de doblado.

Todas las calidades de acero recubierto deben tener la suficiente capacidad para ser doblados a 180 °C aproximadamente a un diámetro igual a dos veces el espesor de la lámina en cualquier dirección y sin que ocurra desprendimiento del recubrimiento.

Para la realización de esta prueba se recomienda utilizar tornillos de banco con mordazas suaves operadas manualmente. Si se utiliza algún otro método, este no debe involucrar fuerzas de impacto.

4.1.5 Pruebas e inspección.

- Toda la tubería y accesorios aluminizados deben estar sujetos a pruebas de dureza. El metal base (incluyendo el material de soldadura y la zona afectada por calentamiento) deben tener una dureza no mayor a 225 BHN.
- Las características del recubrimiento deben ser determinadas mediante pruebas metalográficas.
- Las superficies recubiertas que se sospeche tengan imperfecciones deben ser examinadas mediante la utilización de una prueba de sulfato de cobre. La composición de la solución debe ser de 60 gramos de CuSO_4 , 480 mililitros de agua, y de 2 a 4 mililitros de H_2SO_4 .
- El recubrimiento defectuoso debe ser removido mediante chorro de arena. Las reparaciones se deben hacer mediante la utilización de una técnica aprobada tanto por el fabricante como por el cliente.

4.1.6 Disponibilidad.

El acero aluminizado se encuentra disponible en lámina, alambre para cerca y tubo, en todas las calidades comerciales. Sin embargo, para aplicaciones de cambiadores de calor únicamente nos interesa hacer referencia a lámina y tubo.

4.1.6.1 Lámina.

La lámina de acero aluminizada se encuentra disponible básicamente en tres tipos:

- a) Lámina de acero aluminizada Tipo1 (T1)
- b) Lámina de acero aluminizada Tipo2 (T2)
- c) Lámina de acero inoxidable 409 aluminizada

- Lámina de acero aluminizada Tipo1 (T1)

Es producida en dos tipos de recubrimiento, el T1 25 y el T1 40. El promedio del espesor del recubrimiento es de 0.0006 a 0.0008 de pulgada sobre cada lado de la lámina.

Se encuentra disponible en varios grados de metales base rolados en frío cuyas propiedades mecánicas dependen del grado de calidad seleccionado.

Este tipo conserva su apariencia original a temperaturas por encima de 500 °C (900 °F). Por encima de estas temperaturas, el recubrimiento comienza a formar una aleación con el metal base. El acero se convierte en un material refractario con excelente resistencia al calor aproximadamente a 677 °C (1250 °F).

Algunas de sus ventajas son: bajo costo, buena resistencia a la corrosión y al calor, además, en la mayoría de sus aplicaciones no requiere pintura. Los espesores de las láminas disponibles son de 0.012 a 0.118 pulg.

- Lámina de acero aluminizada Tipo2 (T2)

El peso del recubrimiento es de 200 a 307 g/m². El espesor del recubrimiento es de aproximadamente 0.0013 a 0.0019 pulg. sobre cada lado de la lámina.

Se encuentra disponible en varios grados de materiales base rolados en frío cuyas propiedades mecánicas dependen del grado de calidad seleccionado.

Este tipo también conserva su apariencia original a temperaturas por encima de los 500 °C. A 427 °C (800 °C), por ejemplo, este tipo tiene una resistencia aproximadamente diez veces mayor que la del aluminio puro a la misma temperatura.

Proporciona mejor resistencia a la corrosión atmosférica que cualquier otro material no recubierto dentro del mismo rango de precio.

- Lámina de acero inoxidable 409 aluminizada

Es producida mediante el proceso de inmersión en caliente utilizando una aleación de aluminio-silicio como baño de recubrimiento y acero inoxidable como metal base. Es producida en un solo tipo de recubrimiento, T1 25 (80 g/m²). Ofrece buena resistencia a la corrosión por picadura en ambientes salinos. Proporciona buena protección contra la formación de óxido y posee buena reflectividad de calor a 500 °C, así mismo, es resistente a la oxidación por encima de 870 °C.

Este material ofrece buena formabilidad en componentes que requieren buena resistencia a la corrosión y resiste la formación de óxido en pruebas con chorro de sal (ASTM B-117) durante aproximadamente 500 horas.

Este tipo de acero aluminizado proporciona una significativa alternativa de bajo costo en relación con los aceros inoxidables al alto cromo o al cromo-níquel.

Puede ser doblado a un diámetro de aproximadamente 2 veces el espesor de la lámina a una temperatura de 180 °C sin que ocurra desprendimiento del recubrimiento durante el proceso. Generalmente es producido en espesores de 0.018 a 0.080 pulg. y en tamaños por encima de 48 pulg. de ancho, dependiendo del espesor.

4.1.6.2 Tubo.

El tubo de acero aluminizado se encuentra disponible ya sea, soldado de pared delgada o sin costura. Sin embargo, en nuevos diseños de cambiadores de calor donde se ha aplicado este material con éxito, los diseñadores han preferido la utilización del tubo soldado en lugar del tubo sin costura debido a los grandes beneficios que proporciona el primer producto. Tales beneficios se ven reflejados en costos más bajos, peso más ligero, alta resistencia, espesores de pared mucho más uniformes, mejor concentricidad, microestructuras más limpias y más eficiencia en la transferencia de calor.

Dependiendo de los requerimientos de formabilidad y doblado en el diseño, el tubo de acero aluminizado puede ser fabricado en los siguientes grados:

- CS.- Acero comercial, formalmente llamado “calidad comercial (CQ)”
- FS.- Acero formado, formalmente llamado “calidad de estirado (DQ)”
- DDS.- Acero de estirado profundo, formalmente llamado “calidad de estirado especial (DQS)”
- EDDS.- Acero de estirado extraprofundo. Esta es una nueva clasificación en la cual se utiliza acero ultra bajo contenido de carbono como metal base.

Si la temperatura de servicio es demasiado alta o el ambiente de servicio es muy corrosivo, el tubo aluminizado puede ser fabricado con grado de recubrimiento T1-40 el cual proporciona mejor protección que el grado de recubrimiento T1-25.

4.1.7 Requerimientos de temperatura para el aluminizado.

Los compuestos intermetálicos que se forman mediante el proceso de aluminizado son generalmente estables a temperaturas que exceden la temperatura límite de diseño del metal base. Normalmente las alúminas de hierro y níquel que se forman durante el proceso permanecen estables aproximadamente a 980 °C (1800 °F) en varias atmósferas. Sin embargo, se debe tener mucho cuidado con las temperaturas límite del metal base durante el proceso ya que si estas no están dentro del rango permisible bajo el cual los compuestos intermetálicos se comportan como estables, el recubrimiento podría fallar dejando al metal base susceptible a la corrosión

La tabla 13 muestra los límites de temperatura de los diferentes tipos de aceros que pueden ser aluminizados sin alterar la estabilidad de los compuestos intermetálicos

Tabla 13.- Límites de temperatura de diferentes tipos de aceros utilizados como metales base en el aluminizado de tubos.

Material	Tipo o grado	Temperatura de diseño del metal base		Temperatura crítica más baja	
		°C	°F	°C	°F
Acero al carbono	B	540	1000	720	1325
Carbono-1.5Mo	T1 o P1	595	1100	720	1325
1.25Cr-1.5Mo	T11 o P11	595	1100	775	1430
2.25Cr-1Mo	T22 o P22	650	1200	805	1480
3Cr-1Mo	T21 o P21	650	1200	815	1500
5Cr-1.5Mo	T5 o P5	650	1200	820	1510
5Cr-1.5Mo-Si	T5b o P5b	705	1300	845	1550
7Cr-1.5Mo	T7 o P7	705	1300	825	1515
9Cr-1Mo	T9 o P9	705	1300	825	1515
18Cr-8Ni	304 o 304H	815	1500	-	-
16Cr-12Ni-2Mo	316 o 316H	815	1500	-	-
18Cr-10Ni-Ti	321 o 321H	815	1500	-	-
18Cr-10Ni-Cb	347 o 347H	815	1500	-	-

Nota: La temperatura de diseño es el valor más alto que puede soportar un material antes de que pierda sus propiedades iniciales. La temperatura crítica es el valor más alto que puede soportar un material sin cambiar de estructura metalográfica.

4.1.8 Propiedades mecánicas a temperatura ambiente.

La tabla 14 muestra las propiedades mecánicas a temperatura ambiente de algunos aceros aluminizados comúnmente utilizados en recipientes a presión. Estos datos fueron obtenidos en base a pruebas de tensión de acuerdo a ASTM E8-94

Tabla 14.- Propiedades mecánicas a temperatura ambiente de los aceros aluminizados más comunes .

Material	Resistencia máxima a la tensión (S _T)		Punto de fluencia (S _y)		Elongación en 50 mm o 2 pulg.
	Kg/cm ²	lb/pulg. ²	kg/cm ²	lb/pulg. ²	%
Acero al carbono A178 grado A	3,234	46,000	2,784	39,600	39
Acero al carbono A192	3,958	56,300	2,911	41,400	55
Acero inoxidable 304	5,800	82,500	2,714	38,600	60
Acero inoxidable 310	7,242	103,000	3,621	51,500	38
Acero inoxidable 316	5,828	82,900	2,454	34,900	49
Aleación 600	6,714	95,500	2,777	39,500	49
Aleación 800	7,171	102,000	3,621	51,500	26

4.1.8.1 Propiedades mecánicas a altas temperaturas.

Los ingenieros de diseño seleccionan aleaciones resistentes a altas temperaturas como materiales de construcción en servicios a altas temperaturas en ambientes químicos, petroquímicos y otros procesos. A pesar de que varias de estas aleaciones tienen excelentes propiedades físicas a elevadas temperaturas, en muchos de los casos los elementos que proporcionan estas ventajas pueden ser dañados por dichos procesos. Por ejemplo, el hierro y el níquel son catalíticamente reactivos con varios hidrocarburos a elevadas temperaturas y aceleran la formación de coque en los tubos de cambiadores de calor. Por lo que resulta bastante benéfico el aluminizado de estos tubos ya que proporciona una superficie rica en alúminas las cuales reducen la actividad catalítica, se reduce la formación de coque en los tubos y se reduce la carburización.

La tabla 15 muestra las propiedades mecánicas a altas temperaturas de los aceros aluminizados comúnmente utilizados para la fabricación de tubos de transferencia y tubería.

Tabla 15.- Propiedades mecánicas a altas temperaturas de los aceros aluminizados comúnmente utilizados en la fabricación de tubos y tubería.

Resistencia máxima a la tensión (S_T) kg/cm ²											
Temperatura °C											
Material	21	93	204	316	427	538	649	760	871	982	1093
1015 C.S.	4,218	4,640	4,851	4,640	3,726	2,250	1,195	633	-	-	-
2.25Cr-1Mo	4,289	3,937	3,796	4,007	4,218	3,164	1,898	-	-	-	-
SS 304	5,976	5,414	5,062	4,781	4,500	3,937	3,093	2,039	1,125	-	-
Inco 800	5,343	4,921	4,640	4,570	4,570	4,429	3,726	2,109	1,125	633	-
Resistencia máxima a la tensión (S_T) lb/pulg. ²											
Temperatura °F											
Material	70	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
1015 C.S.	60000	66000	69000	66000	53000	32000	17000	9000	-	-	-
2.25Cr-1Mo	61000	56000	54000	57000	60000	45000	27000	-	-	-	-
SS 304	85000	77000	72000	68000	64000	56000	44000	29000	16000	-	-
Inco 800	76000	70000	66000	65000	65000	63000	53000	30000	16000	9000	-

Punto de fluencia (S_V) kg/cm ²											
Temperatura °C											
Material	21	93	204	316	427	538	649	760	871	982	1093
1015 C.S.	3,023	2,812	2,461	1,968	1,617	1,265	844	351	-	-	-
2.25Cr-1Mo	2,109	2,039	1,968	1,898	1,828	1,687	984	-	-	-	-
SS 304	2,601	2,180	1,617	1,406	1,195	984	914	773	-	-	-
Inco 800	1,898	1,758	1,617	1,406	1,336	1,266	1,266	1,125	984	492	-
Resistencia máxima a la tensión (S_T) lb/pulg. ²											
Temperatura °F											
Material	70	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
1015 C.S.	43000	40000	35000	28000	23000	18000	12000	5000	-	-	-
2.25Cr-1Mo	30000	29000	28000	27000	26000	24000	14000	-	-	-	-
SS 304	37000	31000	23000	20000	17000	14000	13000	11000	-	-	-
Inco 800	27000	25000	23000	20000	19000	18000	18000	16000	14000	7000	-

La figura 27 muestra los valores de dureza Rockwell aproximados para diferentes aceros aluminizados.

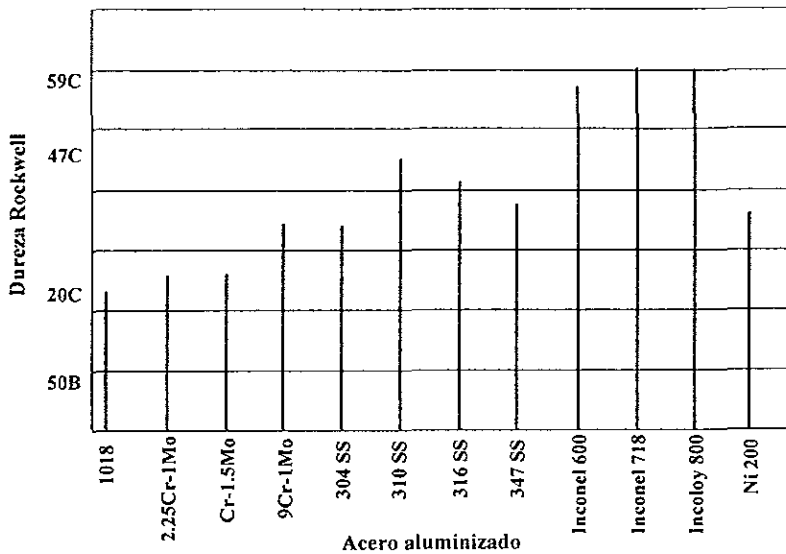


Figura 27.- Dureza Rockwell para diferentes aceros aluminizados.

4.1.9 Soldabilidad.

El tubo de acero aluminizado posee buena soldabilidad, es decir, puede ser fácilmente soldado debido a que el recubrimiento y el metal depositado por la soldadura se fusionan perfectamente uno con el otro para proporcionar excelentes condiciones de unión, Además, puede ser perfectamente soldado sin producir desprendimiento del recubrimiento.

Básicamente se utilizan dos métodos para soldar tubos de transferencia, tubería y accesorios fabricados de acero aluminizado.

En el primero se utiliza la llamada soldadura pasada de raíz mediante la utilización del método FIG, la cual consiste en aplicar las primeras capas de soldadura o capas de raíz mediante la utilización de electrodos consumibles de material resistente a la corrosión, aplicando las últimas capas de soldadura o capas superficiales con electrodos de material compatible al metal base.

El segundo método se basa en la utilización de anillos de respaldo permanentes, lo cual hace a este método un poco más recomendable que el primero (para el caso de tubería), debido a que se obtiene casi el 100% de integridad en la superficie interna de la zona de difusión en las uniones de tuberías.

Los anillos se instalan mediante soldadura en uno de los extremos de la tubería o accesorio antes de que sea recubierto con aluminio. Se les pueden instalar soportes a los anillos si las características del flujo en la tubería son muy críticas.

Cuando se utilizan anillos de respaldo, el electrodo debe ser de un material compatible únicamente con el metal base.

Se pueden utilizar diferentes tipos de soldadura en los aceros aluminizados. Sin embargo, para tubería y tubos de transferencia, los mejores resultados se obtienen mediante la aplicación de las primeras capas de soldadura o capas de raíz con electrodos de acero inoxidable ferrítico con alto contenido de cromo.

En el proceso de soldadura de los aceros aluminizados se utilizan varios tipos de juntas soldadas. A continuación se describen las más importantes

- **Tipo BR.-** En este proceso se solda un anillo de respaldo en uno de los extremos de la junta soldada, formando una soldadura sólida completa sobre el lado opuesto de la junta, eliminando la posibilidad de separar el anillo y la posibilidad de desprendimiento. Las superficies internas de las tuberías y accesorios que cuentan con anillos de respaldo, son aluminizadas completamente. Mientras que la superficie externa del anillo de respaldo únicamente es aluminizada una distancia muy corta
- **Tipo BR-R.-** Los extremos soldados se ranuran en direcciones contrarias para que el anillo de respaldo se aloje dentro de la pared produciendo una superficie interior recta concéntrica sin protuberancias.
- **Tipo SR.-** La pasada de raíz se realiza mediante la utilización de un electrodo de acero inoxidable resistente a la corrosión. Las pasadas subsecuentes se realizan mediante la utilización de un electrodo de material compatible con el material de la tubería. La elección del grado de acero inoxidable para la pasada de raíz se hace en base a las condiciones de operación.
- **Tipo SS.-** Este tipo de soldadura se emplea normalmente cuando toda la superficie es aluminizada. La soldadura se realiza en su totalidad empleando un electrodo de acero inoxidable apropiado a las condiciones de operación. Los depósitos de soldadura se mezclan con las áreas aluminizadas para formar una superficie resistente a la corrosión.
- **Tipo CR.-** Este tipo de soldadura se utiliza en aplicaciones donde el aluminizado es utilizado únicamente para reducir el escamamiento. La soldadura se utiliza mediante la utilización de un electrodo de material compatible con el metal base.

La figura 28 muestra esquemáticamente las características de los tipos de soldadura previamente mencionados.

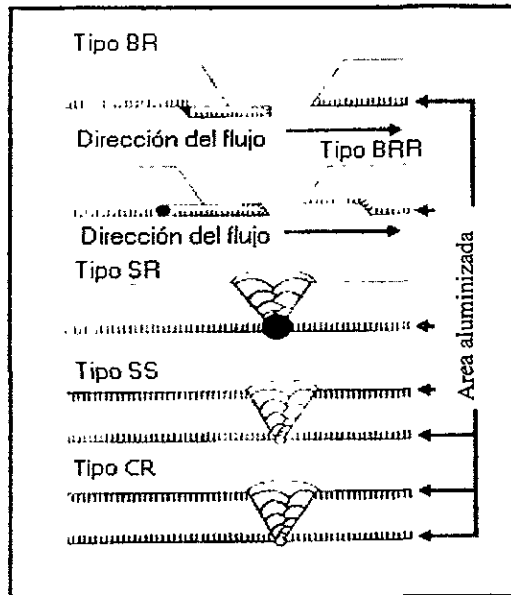


Figura 28.- Tipos de juntas soldadas utilizadas en los aceros aluminizados.

4.1.10 Expansionado o rolado.

Los tubos pueden ser aluminizados en su superficie interna, externa o en ambas.

Cuando los tubos de transferencia de los cambiadores de calor van a ser aluminizados en su superficie exterior, la única parte que debe quedar sin aluminizar es aquella que va a tener contacto con el espejo para facilitar el expansionado del tubo. Por lo que esta pequeña parte sin aluminizar dependerá del espesor del espejo.

Cuando el tubo de transferencia va a ser aluminizado únicamente en su superficie interior, este deberá ser aluminizado en toda su longitud.

El rolado o expansionado de dichas áreas del tubo tiene como finalidad la de sellar la unión tubo-espejo así como proporcionar resistencia en toda la longitud del tubo.

Para este proceso se debe utilizar un aparato capaz de controlar el torque aplicado para evitar el sobrerolado del tubo. El torque aplicado estará limitado por el espesor del espejo conforme a las recomendaciones dadas por la norma TEMA.

Los agujeros del espejo deben ser barrenados con ciertas tolerancias especificadas por la norma TEMA para poder alojar los tubos de transferencia ya que estos sufren un incremento en su diámetro durante el proceso de aluminizado.

La figura 29 muestra la unión tubo-espejo de un cambiador de calor en la cual se puede observar el extremo del tubo de transferencia sin aluminizar.

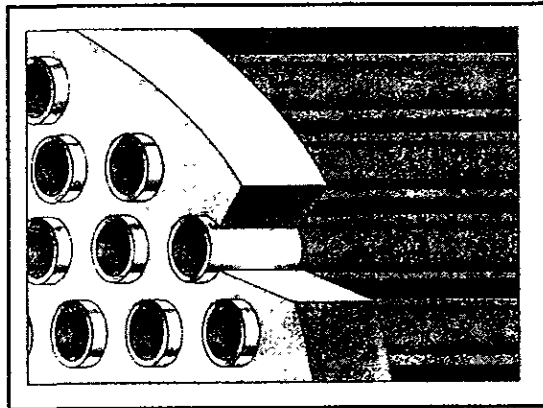


Figura 29.- Unión tubo-espejo de un cambiador de calor.

4.1.11 Medidas disponibles.

En la tabla 16 se muestran las medidas disponibles de los tubos de acero aluminizado en base al diámetro exterior y al espesor de pared.

Tabla 16.- Medidas disponibles para tubo de acero aluminizado.

Diámetro exterior		Espesor de pared	
(pulg.)	(mm)	(pulg.)	(mm)
9/16	14.28	0.025 – 0.040	0.635 – 1.016
3/4	19.05	0.025 – 0.050	0.635 – 1.27
7/8	22.22	0.030 – 0.050	0.762 – 1.27
1	25.4	0.030 – 0.060	0.762 – 1.524
1 1/4	31.75	0.032 – 0.060	0.8128 – 1.524
1 1/2	38.1	0.032 – 0.065	0.8128 – 1.651
1 3/4	44.45	0.032 – 0.065	0.8128 – 1.651
2	50.8	0.032 – 0.083	0.8128 – 2.1082
2 1/4	57.15	0.032 – 0.083	0.8128 – 2.1082
2 1/2	63.5	0.048 – 0.083	1.2192 – 2.1082
2 3/4	69.85	0.054 – 0.095	1.3716 – 2.413
3	76.2	0.054 – 0.095	1.3716 – 2.413
Mayor a 3	Mayor a 76.2	0.065 – 0.125	1.651 – 3.175

Cabe señalar que estos tubos se encuentran disponibles en longitudes de corte de 24 a 240 pulg. (609.6 a 6096 mm) en varias tolerancias.

4.1.12 Costo.

El costo del tubo aluminizado puede variar ampliamente dependiendo del tamaño, espesor de pared, del distribuidor o fabricante y en algunas ocasiones de la aplicación. Sin embargo, la tabla 17 muestra una estimación del costo de este producto en el mercado, basandose en el diámetro exterior del tubo y en el espesor de pared.

Tabla 17.- Costo estimado del tubo aluminizado.

Diámetro exterior		Espesor de pared		Costo estimado (a) \$
(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	
3/4	19.05	0.032	0.8128	0.20/pie
1	25.4	0.032	0.8128	0.23/pie
1 1/2	38.1	0.030	0.762	0.47/pie
1 1/2	38.1	0.045	1.143	0.50/pie
1 3/4	44.45	0.032	0.8128	0.52/pie
1 3/4	44.45	0.047	1.1938	0.55/pie
2	50.8	0.047	1.1938	0.60/pie
2 1/8	53.975	0.037	0.9398	0.65/pie

Nota: (a) en dólares.

4.1.13 Resistencia a la corrosión.

El acero aluminizado posee buena resistencia a la corrosión en ambientes que contienen vapor de azufre o ácido sulfúrico bajo condiciones de altas temperaturas. Es muy resistente a la oxidación a altas temperaturas y a la carburización producida por gases de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos, entre otros. Sin embargo, cabe señalar que la temperatura mínima a la cual pueden ser utilizados estos aceros para prevenir los problemas de carburización, oxidación y sulfuración es de 230 °C (450 °F), ya que en aplicaciones por debajo de esta temperatura, se pueden presentar problemas de celdas locales, reacciones anódicas o catódicas o algún otro problema de corrosión que generalmente ocurre en ambientes de fase líquida.

La figura 30 muestra las condiciones de un espejo fabricado de acero 2.25Cr-1Mo y de uno fabricado de 2.25Cr-1Mo aluminizado después de haber sido sometidos durante

aproximadamente 2.5 años en un cambiador de calor combinado, colocado justo en la salida del reactor de una unidad hidrodesulfuradora

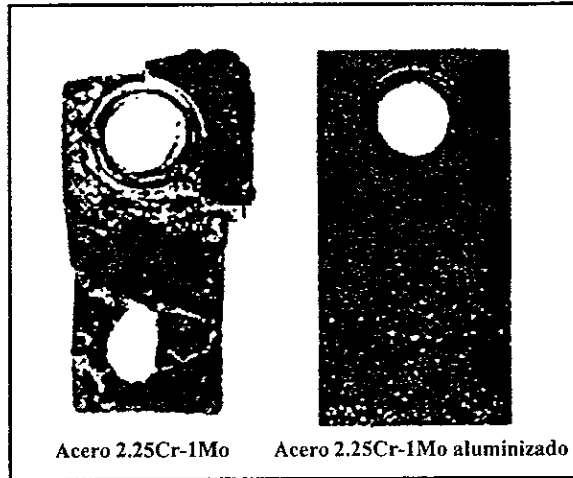


Figura 30.- Resultados de una prueba realizada sobre un acero 2.25Cr-1Mo aluminizado expuesto a H₂S en un cambiador de calor combinado.

El cambiador de calor operó a 399 °C (750 °F) aproximadamente a 150.5 kg/cm² (2140 lb/pulg²), manejando una mezcla de hidrógeno e hidrocarburos conteniendo de 5 a 10 % en volumen de H₂S.

Después de la prueba, el acero 2.25Cr-1Mo presentó severa corrosión tal y como se muestra en la figura 30 la cual tuvo como consecuencia la pérdida de peso y forma del componente. Mientras que el acero aluminizado permaneció totalmente intacto, con el recubrimiento en excelentes condiciones y sin problemas de escamamiento

Los aceros al carbono y de baja aleación recubiertos con aluminio o “aluminizados” no sufren agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos en comparación con los aceros inoxidables austeníticos los cuales si están propensos a este tipo de ataque en ambientes ricos de azufre a elevadas temperaturas.

Por tal motivo, se recomienda utilizar aceros al carbono y de baja aleación aluminizados en ambientes ricos de azufre a elevadas temperaturas y en condiciones en donde la formación de ácido poliónico cause agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos.

4.1.14 Resistencia a la oxidación.

Los aceros aluminizados presentan el mismo comportamiento que los aceros inoxidables bajo condiciones de altas temperaturas. Los aceros inoxidables deben su resistencia a las altas temperaturas a la formación de una capa delgada de óxido rica en cromo la cual le proporciona buena protección a altas temperaturas.

Una acción similar ocurre con los aceros aluminizados los cuales forman una capa de óxido rica en aluminio la cual es mucho más estable que la capa que forman los aceros inoxidables lo cual le transfiere una protección mucho más eficiente al metal base. El aluminizado permanece intacto a temperaturas superiores a las del punto de fusión del metal base.

Por ejemplo, el acero inoxidable 304 sufre escamamiento excesivo a temperaturas del orden de 870 °C (1600 °F) y mayores en ambientes sumamente oxidantes. Los aceros al carbono aluminizados solo muestran una ligera descolorización de su superficie bajo las mismas condiciones tal y como se muestra en la figura 31, además de que su costo es considerablemente más bajo. También los aceros de alta resistencia y las aleaciones al cromo níquel aluminizados mejoran la resistencia a la oxidación en aplicaciones a temperaturas elevadas

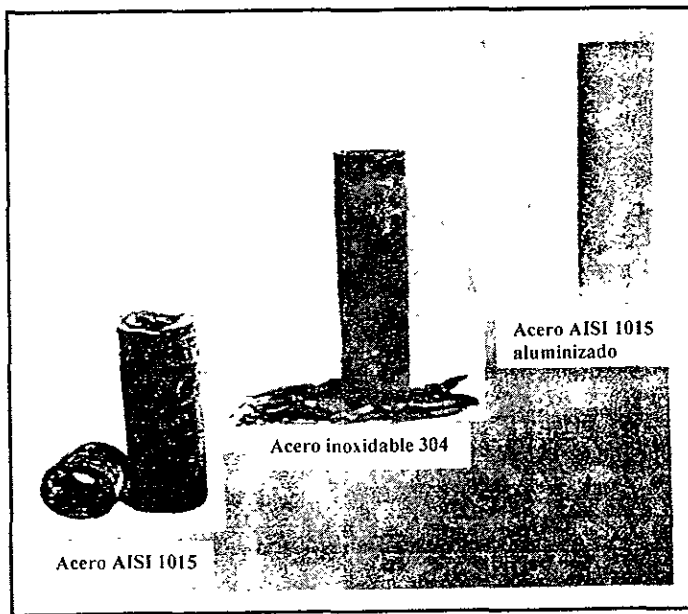


Figura 31.- Apariencia de tres tipos diferentes de aceros después de haber sido expuestos a una atmósfera altamente oxidante.

Los materiales de la figura anterior fueron sometidos a una prueba de oxidación incrementando la temperatura de 870 °C (1600 °F) a 982 °C (1800 °F) y enfriandolos en aire a 38 °C (100 °F) cada 24 horas. Después de 200 horas, el acero aluminizado solo mostró una leve descolorización de su superficie; el acero inoxidable sufrió severo escamamiento y el acero AISI 1015 resultó completamente oxidado.

4.1.15 Resistencia a la carburización.

Otra ventaja que proporciona el aluminizado es la resistencia a la carburización.

Cuando los aceros inoxidables y los aceros de aleación son expuestos a atmósferas ricas en carbono a elevadas temperaturas, ambos materiales sufren carburización, volviéndose frágiles y perdiendo su resistencia a la corrosión.

Sin embargo, los aceros aluminizados no sufren carburización en ambientes ricos en carbono a elevadas temperaturas, sino por el contrario, presentan una larga vida de servicio bajo estos ambientes.

4.2 Aceros microaleados.

4.2.1 Antecedentes.

Aparecieron en la década de 1960, como respuesta a la necesidad de mejorar las propiedades de los aceros de bajo carbono. Se caracterizan principalmente por la adición de muy pequeñas cantidades (menor al 0.10 % en peso) de vanadio, niobio, titanio ya sea por separado o en conjunto. Estos elementos en combinación con el carbono y/o nitrógeno forman finas partículas de precipitados que se dispersan en el acero lo que influye profundamente en algunas propiedades como: la dureza, tenacidad, formabilidad en frío y soldabilidad sin incrementar la temperatura de transición de dúctil a frágil. Esto se logra al hacer una meticulosa selección de los elementos de microaleación en función de la aplicación y un riguroso control del proceso termomecánico.

Los parámetros estructurales que se pueden controlar por estos medios son:

1. El tamaño y la configuración de los precipitados
2. El tamaño y la forma de los granos
3. Las transformaciones de fases
4. La cantidad de dislocación
5. Inclusiones no metálicas

Los aceros microaleados se clasifican dentro de los aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA High Strength Low Alloy steels) los cuales poseen mejores propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión que los aceros al carbono convencionales. No se consideran como aceros aleados, aunque sus propiedades mejoradas se logren por la adición de pequeñas cantidades de varios elementos. Por lo que los aceros HSLA se clasifican aparte, como otra categoría de aceros.

En los aceros microaleados, se puede reducir el contenido de carbono para mejorar tanto la soldabilidad como la dureza, esto se debe a que el niobio y vanadio compensan esta reducción en la resistencia.

Cada elemento proporciona diferentes características, en la tabla 18 se muestran los efectos que tienen cada elemento en las propiedades de los aceros microaleados.

Tabla 18.- Efectos de varios elementos en las propiedades de los aceros microaleados.

Elemento	Resistencia debida a la precipitación	Refinamiento de grano de ferrita	Fijación del nitrógeno	Modificación de la estructura
Vanadio	Buena	Débil	Buena	Moderada
Niobio	Moderada	Buena	Débil	Ninguna
Molibdeno	Débil	Ninguna	Ninguna	Buena
Titanio	Ninguna (< 0.02 % Ti)	Buena	Buena	Ninguna
	Buena (> 0.05 % Ti)			

El vanadio, contribuye con una buena resistencia en porcentajes de peso que van de 0.03 a 0.10 %, también incrementa la rigidez al estabilizar el nitrógeno disuelto, el cual en aceros obtenidos en hornos eléctricos, puede tener un porcentaje en peso de 0.012 %.

El niobio proporciona una buena resistencia debida a la precipitación. Sin embargo su principal contribución es la de formar precipitados por arriba de la temperatura de transformación retardando así la recristalización de la austenita, con lo que se consigue un tamaño de grano más fino aumentando la resistencia y rigidez. La concentración de niobio fluctúa en el rango de 0.020 a 0.10 % en peso.

Se incluye al molibdeno en la tabla 18 por el uso que se le da en los aceros microaleados de la segunda generación. Este elemento, hace más fácil el control de los procesos que se llevan a cabo durante el forjado.

El titanio se comporta como ambos, proporciona resistencia por precipitación y disminuye el tamaño de grano, dependiendo del contenido (tabla 18). En composiciones mayores a 0.05 %, se empieza a observar los efectos de la resistencia por precipitación que ejercen los carburos de titanio. Sin embargo, actualmente, se utiliza al titanio para retardar el crecimiento de la austenita y así mejorar la tenacidad.

Sin importar la forma del producto (placa, barra o forja), los aceros microaleados son el ejemplo clásico de una innovación metalúrgica exitosa en la que se han conjuntado, la adición de elementos de microaleación y los procesos termomecánicos para obtener excelentes propiedades a través del control de la microestructura de estos aceros. En la práctica, estos aceros, no representan un costo muy elevado ya que para la formación de carbonitruros, sólo son necesarias cantidades muy pequeñas de vanadio, niobio o titanio.

En cuanto a los procesos termomecánicos, estos son una variación del trabajo en caliente final que se aplica a estos aceros. Aunque el endurecimiento por precipitación de los carbonitruros y los cambios microestructurales debidos al rolado en caliente de mezclas de granos ferríticos y austeníticos contribuyen con la resistencia de estos aceros, al final los granos ferríticos son los que proporcionan un balance favorable entre la resistencia y la tenacidad.

4.2.2 Generaciones de aceros microaleados.

Primera generación. Durante esta etapa, los aceros microaleados no tenían una resistencia al impacto adecuada por lo que posteriormente se tuvo que mejorar significativamente para desarrollar completamente el potencial del acero.

No fue sino hasta 1986 que en Alemania Occidental se introdujo la segunda generación de estos aceros, con la siguiente clasificación y composición nominal: 26MnSiVS7 (0.26C-0.70Si-1.5Mn-0.04S-0.10V-0.02Ti). Esta generación se caracteriza por la reducción en el contenido de carbono en el rango de 0.10 a 0.30 %, también se le adicionó una pequeña cantidad de molibdeno, que como se mencionó anteriormente, mejora la formabilidad.

En la tabla 19 se muestra la clasificación de dos aceros microaleados de la segunda generación comúnmente usados en los Estados Unidos.

Tabla 19.- Composiciones típicas de aceros microaleados de la segunda generación usados en E. U.

Grado	Composición, %							
	C	Mn	P	S	Si	Mo	V	N
1524 MoV	0.22	1.54	0.014	0.036	0.35	0.11	0.11	0.011
1524 V	0.22	1.44	0.013	0.018	0.46	0.022	0.10	0.010

Una desventaja de los aceros 1524 V y 1524 MoV es que para incrementar su resistencia y tenacidad es necesaria una velocidad de enfriamiento elevada lo cual requiere la utilización de equipos especiales y costosos para maximizar dichas propiedades. Esto tiene un mayor significado en piezas forjadas

Actualmente en países como E. U., Alemania y Japón, se fabrican aceros microaleados forjados de segunda generación a los cuales se les adiciona titanio. La resistencia al aumento en el tamaño de grano que proporciona la precipitación de nitruros de titanio, aumenta la rigidez en estos aceros

La resistencia máxima a la tensión de los aceros de la primera y segunda generación, es adecuada para una gran cantidad de aplicaciones en ingeniería, pero no alcanzan la tenacidad de los aceros convencionales templados bajo condiciones normales de forja.

La tercera generación fue desarrollada en 1989 en los Estados Unidos, se diferencia de sus predecesoras en que el acero se enfría directamente desde la temperatura de forjado para producir microestructuras de martensita con una distribución uniforme de carburos (figura 32).



Figura 32.- Microestructura de un acero microaleado forjado de la tercera generación.

Sin ser necesario el subsecuente tratamiento térmico, estos materiales pueden desarrollar incluso una tenacidad comparable a la de los aceros templados.

La nueva generación de aceros microaleados, tiene un valor de tenacidad a una temperatura de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-20\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 5 a 6 veces más elevado y el doble de resistencia que los aceros de la segunda generación.

4.2.3 Procesos que se aplican a los aceros microaleados.

El roloado en caliente es un método que se usa con frecuencia en la producción de estos aceros, pero en la actualidad se ha hecho necesario controlar las temperaturas con mayor cuidado durante este proceso. Por lo tanto, se han desarrollado algunos procesos que mejoran las propiedades de estos aceros, los cuales se describen a continuación.

1) Rolado controlado.

Este proceso consiste en controlar las temperaturas durante el rolado, controlando con precisión la cantidad de reducción del espesor y la temperatura final. Este proceso es empleado en la actualidad para obtener excelentes propiedades mecánicas.

Se basa en la deformación y aplanamiento de los granos de austenita con lo que se producen una gran cantidad de espacios, en los bordes de grano, donde se forma ferrita muy fina durante el enfriamiento.

El niobio es el elemento de aleación más efectivo para el refinamiento de grano durante el rolado controlado, produciendo granos de ferrita con un tamaño de 5 a 10 μm . El contenido óptimo de niobio puede ser tan bajo como 0.02 %.

2) Rolado de recristalización controlada.

Aunque el rolado controlado es efectivo, para reducir el tamaño de grano de ferrita. La baja temperatura de acabado de este proceso (750 a 900 °C, ó 1400 a 1650 °F) provoca que para placas pesadas y tubos rolados de paredes gruesas de sean necesarias cargas elevadas. Para espesores menores, el rolado de recristalización controlada se usa para disminuir el tamaño de grano de austenita, este proceso produce granos de ferrita del orden de 8 a 10 μm (0.3 a 0.4 $\times 10^{-3}$ lb/pulg²).

Este proceso involucra la recristalización de la austenita a temperaturas por arriba de 900 °C (1650 °F) y para que se logren los resultados deseados es importante el contenido de vanadio, ya que el carburo de vanadio se encuentra disuelto durante el rolado lo que retrasa la recristalización de la austenita.

3) Rolado controlado de recristalización dinámica.

Se usa cuando no hay suficiente tiempo para la recristalización durante el rolado. En este proceso se inicia la recristalización durante la deformación de los granos de austenita y puede producir granos de ferrita de 10 μm (4.0 $\times 10^{-3}$ pulg).

Si se tiene una baja temperatura de acabado, este proceso puede reducir los granos de ferrita entre 3 y 6 μm (0.12 y 0.24 $\times 10^{-3}$ pulg).

4.2.4 Tipos de aceros microaleados.

Ya que los aceros microaleados cuentan con varios elementos de aleación, es lógico pensar que se pueden adicionar por separado o en conjunto, por tal motivo, existen varios tipos que se indican a continuación.

4.2.4.1 Aceros microaleados al vanadio.

Su contenido de vanadio es de hasta 0.10 % en peso, para su fabricación se usan procesos de rolado en caliente, rolado controlado, normalizado, templado y revenido. Como se dijo anteriormente, el vanadio aumenta la resistencia al precipitarse en pequeñas partículas (5 a 100 nm de diámetro) de carbonitruros de vanadio o V(CN) durante el enfriamiento posterior al rolado. Estos precipitados permanecen disueltos durante el rolado en caliente por lo que su formación depende de la velocidad de enfriamiento.

El aumento en la resistencia que proporciona el vanadio se encuentra en promedio entre 51 y 153 kg/cm² por cada 0.01 % V en peso, esto también depende de la velocidad de enfriamiento y el espesor del material.

La velocidad de enfriamiento se determina en función de la temperatura del rolado y el espesor de la placa, en la figura 33 se aprecia como afecta la velocidad de enfriamiento a la resistencia en un acero con 0.15 % V.

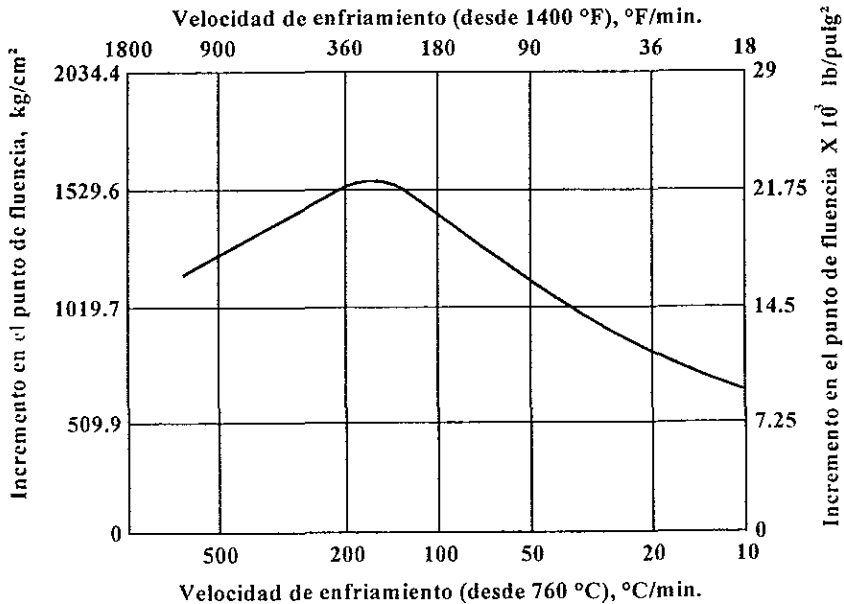


Figura 33.- Efecto de la velocidad de enfriamiento en el aumento del Punto de Fluencia en el acero al vanadio con 0.15 % V.

Se puede observar que la velocidad óptima de enfriamiento es de 170 °C/min (306 °F/min). A velocidades mayores, se engruesan los V(CN) dando como resultado una menor resistencia.

A velocidades menores, no alcanzan a formarse completamente los precipitados de V(CN) quedando gran parte de estos en solución reduciendo así su resistencia.

El tamaño de grano de ferrita y el contenido de manganeso, también afectan al aumento en la resistencia en los aceros microaleados al vanadio. La tabla 20 muestra el efecto que tiene en la resistencia, el contenido de manganeso.

Tabla 20.- Efectos del contenido de manganeso en la resistencia de un acero microaleado al vanadio con una composición base de 0.08 % C y 0.30 % Si.

Contenido de vanadio %	Punto de fluencia (S _V)		Cambio en el punto de fluencia (S _V)	
	kg/cm ²	lb/pulg ² X 10 ³	kg/cm ²	lb/pulg ² X 10 ³
0.3 % Mn				
0.00	3028.56	43	0	0
0.08	3589.4	51	560.84	8
0.14	3874.92	55	846.36	12
1.2 % Mn				
0.00	3375.26	48	0	0
0.08	4711.1	67	1335.82	19
0.14	5628.83	80	1233.85	32

Como se pudo observar, un aumento de 0.9 % Mn mejoró considerablemente la resistencia, esto se debe a que el manganeso reduce la temperatura de transformación de la austenita en ferrita lográndose una mejor dispersión de los precipitados.

Otro factor que influye en la resistencia es el tamaño de grano de la ferrita, la cual se produce durante el enfriamiento a partir de la temperatura de austenitización. Un grano fino no sólo proporciona resistencia, sino también mejora la rigidez y la ductilidad. Para conseguir esto se debe reducir la temperatura de transformación de austenita en ferrita lo cual se logra adicionando otros elementos a la aleación y/o al aumentar la velocidad de enfriamiento. También se mejora la resistencia al reducir el tamaño de grano de la austenita antes de la transformación.

Existe una relación directa entre el aumento en la resistencia y el contenido de vanadio, también la temperatura de transición aumenta con el contenido de vanadio, como se observa en la figura 34.

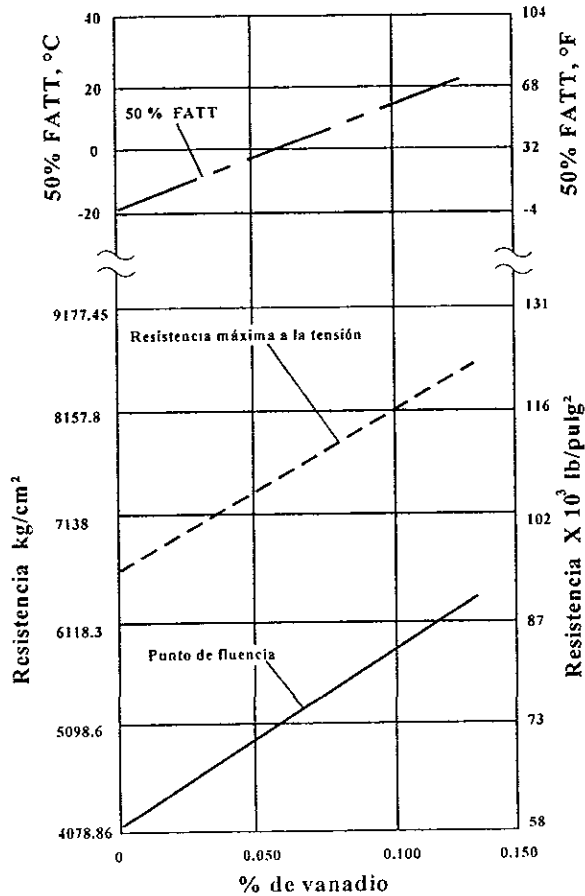


Figura 34. Efectos del contenido de vanadio en la resistencia y en la temperatura de transición FATT (fracture appearance transition temperature) temperatura de transición en la que aparece la fractura.

4.2.4.2 Aceros microaleados al niobio.

Como en los aceros al vanadio, el contenido de niobio aumenta la resistencia debido al endurecimiento por precipitación; el aumento en la resistencia depende del tamaño y contenido de niobio (figura 35). En comparación con el vanadio, el niobio es más efectivo en la reducción

del tamaño de grano y aunado al endurecimiento por precipitación, se logra una mayor resistencia. El contenido usual de niobio es de entre 0.02 a 0.04 % aproximadamente, una tercera parte del contenido óptimo de vanadio.

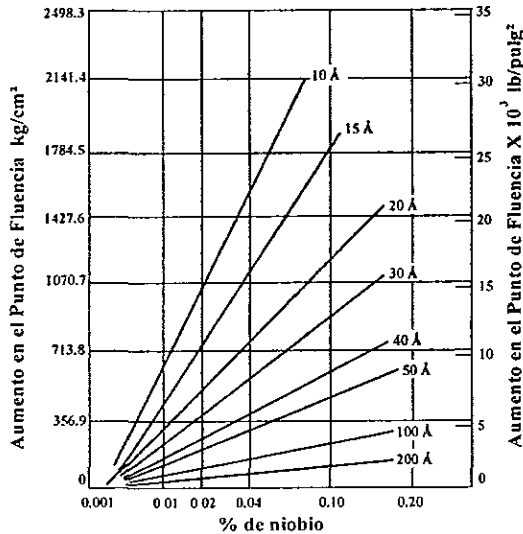


Figura 35.- Efecto sobre el punto de fluencia del carburo de niobio en varios tamaños.

En promedio, el aumento en la resistencia es de 357 a 408 kg/cm² (5 a 6 X 10³ lb/pulg²) por cada 0.01 % Nb que se adicione.

Estos aceros se producen por rolado controlado, rolado con recristalización controlada y templados directamente. El proceso de rolado con recristalización controlada no requiere de titanio, en comparación el acero al vanadio que si requiere de titanio para la aplicación de dicho proceso.

4.2.4.3 Aceros microaleados al niobio-vanadio.

La combinación de los dos elementos, proporciona un punto de fluencia más elevado que si se adicionan por separado. Este aumento en la resistencia, se logra por la precipitación de carburos por lo que cuentan con una temperatura de transición (de dúctil a frágil) más elevada. esto ocurre en condiciones de rolado normales. Pero si se procesa mediante rolado controlado.

aumenta el punto de fluencia y disminuye la temperatura de transición al reducirse el tamaño de grano.

Estos aceros, tienen un contenido de carbono relativamente bajo ($<0.10\text{ C}$). Además, cuentan con una buena tenacidad, ductilidad y soldabilidad, también se les conoce como aceros de perlita reducida.

4.2.4.4 Aceros microaleados al niobio-molibdeno.

La adición de molibdeno en los aceros microaleados al niobio, contribuye con un aumento en el punto de fluencia que va de 204 a 306 kg/cm^2 (3000 a 4500 lb/pulg^2) por cada incremento del 0.01 % en el contenido de molibdeno hasta llegar a 0.27 %.

El efecto del molibdeno es cambiar la forma de la perlita, introduciendo bainita en su lugar. Sin embargo, esto no es lo que mejora las propiedades del acero, sino la combinación de ambos elementos que facilita la precipitación de Nb(CN) en ferrita.

4.2.4.5 Aceros microaleados al titanio.

Al agregar titanio a un acero al bajo carbono, este forma varios compuestos que producen un aumento en la resistencia por precipitación, refinamiento de grano y controlan muy bien la formación de sulfuros. Pero se debe considerar que el titanio forma principalmente óxidos por lo tanto, para obtener otros compuestos, se deben usar aceros pasivados (con aluminio).

Actualmente se producen, por medio de rolado controlado, placas de hasta 9.5 mm (0.375 pulg), con un punto de fluencia en el rango de 3518 a 5608 kg/cm^2 (50 a 80 $\times 10^3$ lb/pulg^2). Un contenido de titanio $\leq 0.025\%$ ayuda a disminuir el tamaño de grano, pues retarda el crecimiento de la austenita. También retarda el crecimiento de grano de la austenita recristalizada durante el rolado de recristalización controlada. Sin embargo, el titanio no es tan efectivo para el rolado en caliente convencional y el refinamiento de grano; como el niobio pero es mejor que el vanadio.

Se han hecho experimentos en donde se demostró que la resistencia por la precipitación de TiC ha alcanzado valores de hasta 4487 kg/cm^2 (64 $\times 10^3$ lb/pulg^2), este valor es más alto que el alcanzado por la adición de niobio o vanadio. Sin embargo, el tamaño de estos carburos disminuye la tenacidad del acero. Otra consideración que se debe tomar en cuenta es que el titanio forma también sulfuros, lo que hace necesario controlar la cantidad de titanio para que se formen tanto TiC como TiS y de esta forma, conseguir mejores propiedades en el acero.

4.2.4.6 Aceros microaleados al niobio - titanio.

Los aceros al niobio, aunque tienen una buena resistencia, no tienen buena tenacidad por lo que para mejorar esta propiedad, se adiciona titanio en pequeñas cantidades. El titanio mejora la eficiencia del niobio al combinarse con el nitrógeno y formar nitruros de titanio, esto previene la formación de nitruros de niobio en la austenita precipitándose en la ferrita, lo que mejora las propiedades de este tipo de acero.

4.2.5. Composición y especificaciones de los aceros microaleados.

Las composiciones químicas que se usan con más frecuencia se muestran en la tabla 21.

Tabla 21.- Composiciones químicas que se usan frecuentemente en los aceros microaleados.

Acero	C	Mn	P	S	Si	V	Otros
1	0.09	0.35	0.010	0.012	0.01	<0.01	0.05 Al; 0.005 N; 0.015 Nb
2	0.09	1.25	0.010	0.012	0.30	0.09	0.05 Al; 0.005 N; 0.09 Nb
3	0.14	1.25	0.03	0.03	0.30	0.02	0.01 Nb
4	0.16	1.40	0.03	0.03	0.30	0.02	0.01 Nb
5	0.18	1.50	0.03	0.03	0.30	0.02	0.01 Nb
6	0.18	1.60	0.03	0.03	0.60	0.05	.....
7	0.06	0.45	0.01	0.02	0.10	.....	0.02 Nb
8	0.06	0.75	0.01	0.02	0.10	.....	0.04 Nb
9	0.06	0.95	0.01	0.02	0.10	.....	0.10 Nb
10	0.10	0.40	.....	.....	.....	.....	0.05 Ti; 0.01 Al
11	0.10	0.40	.....	.....	.....	.....	0.05 Ti; 0.01 Al
12	0.10	0.40	.....	.....	.....	.....	0.05 Ti; 0.01 Al

Comercialmente, este tipo de aceros no se considera como aceros aleados, esto es una ventaja metalúrgica ya que se puede modificar las cantidades de los componentes de la aleación, al no estar sujetos a las tolerancias y requerimientos de los aceros aleados.

La ASTM y la SAE (Society of Automotive Engineers) Sociedad de Ingenieros Automotrices, en su especificación SAE J410c da una clasificación de aceros microaleados. la diferencia entre estas especificaciones es, que la ASTM, proporciona la cantidad de los elementos de microaleación mientras que la SAE J410c deja a criterio del fabricante la cantidad de estos elementos como se observa en las tablas 22 y 23 respectivamente.

Tabla 22.- Composición química de los aceros microaleados según ASTM.

Espec. ASTM	Tipo o Grado	C	Mn	P	S	Si	V	Otros
A 225	Gr. A	0.18	1.45	0.035	0.04	0.15- 0.30	0.09- 0.14	
	Gr. B	0.20	1.45	0.035	0.04	0.15- 0.30	0.09- 0.14	
A 572	Gr.52	0.21	1.35 (a)	0.04	0.05	0.30 (a)		(c)
	Gr.45	0.22	1.35 (a)	0.04	0.05	0.30 (a)		(c)
	Gr.50	0.23	1.35 (a)	0.04	0.05	0.30 (a)		(c)
	Gr.55	0.25	1.35 (a)	0.04	0.05	0.30		(c)
	Gr.60	0.26	1.35 (a)	0.04	0.05	0.30		(c)
	Gr.65	0.23 (a)	1.65 (a)	0.04	0.05	0.30		(c)
A 607	Gr.45	0.22	1.35	0.04	0.05			(c)
	Gr.50	0.23	1.35	0.04	0.05			(c)
	Gr.55	0.25	1.35	0.04	0.05			(c)
	Gr.60	0.26	1.50	0.04	0.05			(c)
	Gr.65	0.26	1.50	0.04	0.05			(c)
	Gr.70	0.26	1.65	0.04	0.05			(c)
A 633	Gr. A	0.18	1.00 - 1.35	0.04	0.05	0.15 - 0.30		
	Gr. B	0.18	1.00 - 1.35	0.04	0.05	0.15 - 0.50	0.10	
	Gr. C	0.20	1.15 - 1.50	0.04	0.05	0.15 - 0.50		0.01 - 0.05 Nb
	Gr. E	0.22	1.15 - 1.50	0.04	0.05	0.15 - 0.50	0.04 - 0.11	0.01-0.05Nb(b), 0.01 - 0.03N
A 699	Tipo 1	0.06	1.20 - 2.20	0.04	0.025			0.25 - 0.35Mo, 0.03 - 0.09Nb
	Tipo 2	0.06	1.20 - 2.20	0.04	0.025	0.40		0.25 - 0.35Mo; 0.03 - 0.09Nb
	Tipo 3	0.06	1.20 - 2.20	0.04	0.025	0.40		0.25 - 0.35Mo; 0.03 - 0.09Nb
	Tipo 4	0.06	1.20 - 2.20	0.04	0.025	0.40		0.25 - 0.35Mo; 0.03 - 0.09Nb
A 656	Gr.1	0.18	1.60	0.04	0.05	0.60	0.05 - 0.15	0.02 min Al, 0.005 0.030 N
	Gr.2	0.15	0.90	0.04	0.05	0.10		0.05 - 0.50 Ti; 0.01 min Al
A 715	Tipo 1	0.15	1.65	0.025	0.035	0.10		0.05 min Ti
	Tipo 2	0.15	1.65	0.025	0.035	0.60 (d)		0.005 min N (d)
	Tipo 3	0.15	1.65	0.025	0.035	0.60 (d)	0.08 (d)	0.005 min Nb, 0.020 N (d)
	Tipo 4	0.15	1.65	0.025	0.035	0.90		0.005 - 0.06Nb(e); 0.10Ti (d)
	Tipo 5 (f)	0.15	1.65	0.025	0.035	0.30		0.05 min Zr, 0.0025 B (d)
	Tipo 6	0.15	1.65	0.025	0.035	0.90		0.20 min Mo; 0.03 min Nb
	Tipo 7	0.15	1.65	0.025	0.035		0.005 (g)	0.005 - 0.10 Nb 0.020 N

(a) Estos valores pueden variar dependiendo del tamaño del producto y la forma

(b) Opcional o cuando se especifique

(c) Se debe pedir como tipo 1 (0.005 - 0.05 Nb), tipo 2 (0.01 - 0.15 V), tipo 3 (0.05 máx. Nb, 0.02 - 0.15 V), tipo 4 (0.015 máx. N, V \geq 4N)

(d) No se añade a los grados 50 y 60

(e) Se puede añadir al grado 50

(f) Disponible únicamente en grado 80

(g) Se puede agregar 0.005Nb min en vez de V

Tabla 23.- Composición de los aceros microaleados según SAE.

Grado	C, máx	Mn, máx.	P máx.	Otros elementos
942 X	0.21	1.35	0.04	Nb, V
945 A	0.15	1.00	0.04	.....
945 C	0.23	1.40	0.04	.....
945 X	0.22	1.35	0.04	Nb, V
950 A	0.15	1.30	0.04	.....
950 B	0.22	1.30	0.04	.....
950 C	0.25	1.60	0.04	.....
950 D	0.15	1.00	0.15	.....
950 X	0.23	1.35	0.04	Nb, V
955 X	0.25	1.35	0.04	Nb, V, N
960 X	0.26	1.45	0.04	Nb, V, N
965 X	0.26	1.45	0.04	Nb, V, N
970 X	0.26	1.65	0.04	Nb, V, N
980 X	0.26	1.65	0.04	Nb, V, N

4.2.6 Propiedades mecánicas.

La resistencia máxima a la tensión y el punto de fluencia son las propiedades mecánicas más importantes para obtener el esfuerzo máximo permisible utilizado en el diseño de los elementos constitutivos de los cambiadores de calor. El punto de fluencia es un criterio que se toma sólo cuando la relación entre este y la resistencia máxima a la tensión es de 0.5. Las propiedades mecánicas están influenciadas por varios factores entre los que destacan: la composición química, el proceso de fabricación y el espesor.

Tabla 24.- Propiedades mecánicas de los aceros microaleados según ASTM.

Especificación ASTM	Tipo o Grado	Resistencia max. a la tensión (S_T)		Punto mín. de fluencia (S_V)		Deformación mínima %	
		kg/cm ²	lb/pulg ² X 10 ³	kg/cm ²	lb/pulg ² X 10 ³	En 200 mm ó 8 pulg.	En 50 mm ó 2 pulg.
A 225	Gr. A	4945 – 6322	70 – 90	2804	40	17	21
	Gr. B	5251 – 6679	75 – 95	3008	43	16	20
A 572	Gr. 42	4232	60	2957	42	20	24
	Gr. 45	4232	60	3161	45	19	22
	Gr. 50	4589	65	3518	50	18	21
	Gr. 55	4946	70	3875	55	17	20
	Gr. 60	5303	75	4232	60	16	18
	Gr. 65	5608	80	4589	65	15	17
A 607	Gr. 45	4181	60	3161	45	.....	22 – 25
	Gr. 50	4589	65	3518	50	...	20 – 22
	Gr. 55	4895	70	3875	55	.....	18 – 20
	Gr. 60	5303	75	4232	60	....	16 – 18
	Gr. 65	5608	80	4589	65	...	15 – 16
	Gr. 70	6016	85	4946	70	....	14
A 633	Gr. A	4385 – 5812	63 – 83	2957	42	18	23
	Gr. B	4385 – 5812	63 – 83	2957	42	18	23
	Gr. C	4589 – 6322	65 – 90	3212 – 3518	46 – 50	18	23
	Gr. E	5303 – 7036	75 – 100	3875 – 4232	55 – 60	18	23
A 699	Tipo 1	7036	100	4946	70	.....	18
	Tipo 2	7036	100	5252	74.5	.....	18
	Tipo 3	6680	95	4946	70	....	18
	Tipo 4	6680	95	5252	74.5	...	18
A 656	Gr. 1	6679 – 8086	65 – 90	5629	80	12	....
	Gr. 2	6679 – 8086	65 – 90	5629	80	12	.....
A 715	Gr. 50	4232	60	3518	50	....	22 – 24
	Gr. 60	4946	70	4232	60	.....	20 – 22
	Gr. 70	5608	80	4946	70	...	18 – 20
	Gr. 80	6322	90	5608	80	.....	16 – 18

Tabla 25.- Propiedades mecánicas de los aceros microaleados según SAE.

Grado	Resistencia max. a la tensión (S_T)		Punto mín de fluencia (S_V)		Deformación mínima %	
	kg/cm ²	lb/pulg ² X 10 ³	kg/cm ²	lb/pulg ² X 10 ³	En 200 mm ó 8 pulg.	En 50 mm ó 2 pulg.
942 X	4232	60	2957	42	20	24
945 A	4232 – 4589	60 – 65	2804 – 3161	40 – 45	18 – 19	22 – 24
945 C	4232 – 4589	60 – 65	2804 – 3161	40 – 45	18 – 19	22 – 24
945 X	4232	60	3161	45	19	22 – 25
950 A	4385 – 4925	290 – 345	2957 – 3518	42 – 50	18 – 19	22 – 24
950 B	4385 – 4925	290 – 345	2957 – 3518	42 – 50	18 – 19	22 – 24
950 C	4385 – 4925	290 – 345	2957 – 3518	42 – 50	18 – 19	22 – 24
950 D	4385 – 4925	290 – 345	2957 – 3518	42 – 50	18 – 19	22 – 24
950 X	4589	65	3518	50	18	22
955 X	4925	70	3875	55	17	20
960 X	5303	75	4232	60	16	18
965 X	5608	80	4589	65	15	16
970 X	6016	85	4946	70	14	14
980 X	6679	95	5608	80	10	12

Vale la pena mencionar que los valores de la resistencia a la tensión y el punto de fluencia de los aceros especificados por ASTM, dependen del proceso de fabricación y del espesor, mientras que los valores especificados por SAE, dependen también de la composición química

La tenacidad de estos aceros se mide con la prueba de impacto Charpy. En general, en este tipo de aceros, esta propiedad tiene un valor superior que la de los aceros al carbono convencionales; además de tener una temperatura de transición más baja. En la figura 36, se observan los resultados obtenidos al comparar la tenacidad de un acero al carbono (ASTM A 7) y un acero microaleado.

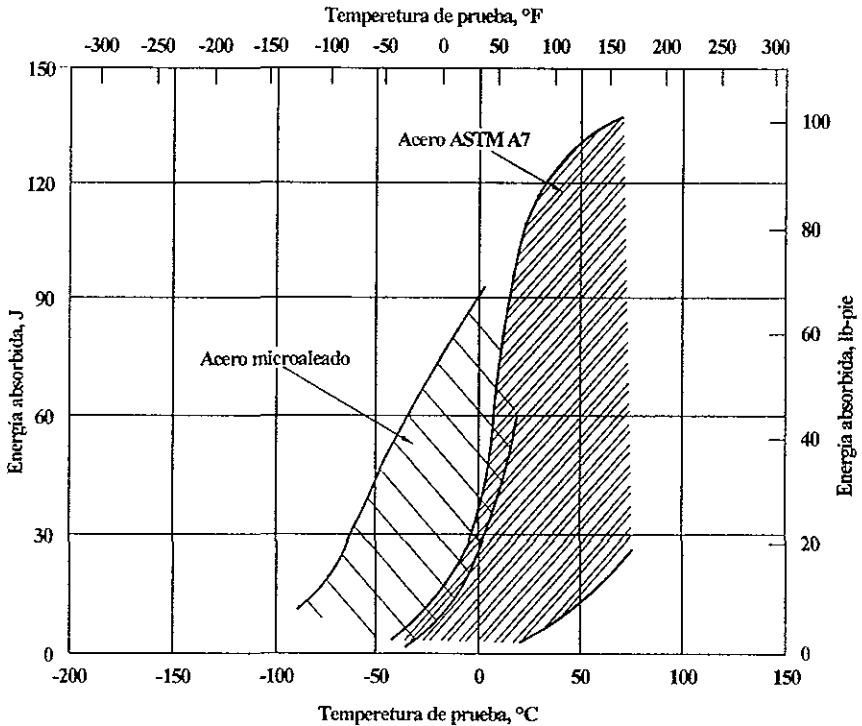


Figura 36.- Comparación de la tenacidad entre un acero ASTM A7 y un acero microaleado.

De los resultados obtenidos podemos decir, que a temperaturas de transición más bajas se reduce el riesgo de fractura por fragilización.

Las temperaturas de transición en aceros rolados o normalizados dependen principalmente de la composición química y del tamaño de grano de ferrita, mientras que para aceros templados y revenidos, la temperatura de transición depende únicamente de su microestructura.

Se debe tener especial cuidado en las uniones soldadas, ya que estas contienen esfuerzos residuales que pueden alcanzar hasta el 80 % del punto de fluencia, por lo que sólo con un esfuerzo aplicado que sea del otro 20 %, se puede iniciar una fractura por fragilización. Por lo que la suma de los esfuerzos aplicados y los esfuerzos residuales no debe ser mayor que el punto de fluencia. En general, entre más por debajo de la temperatura de transición se esté, no es necesario que se forme una grieta muy grande para que pueda presentarse una fractura.

En la tabla 26 se muestra la temperatura de transición en función de sus propiedades mecánicas.

Tabla 26.- Valores de la temperatura de transición para aceros microaleados en función del punto de fluencia mínimo.

Punto de fluencia mínimo X 10 ³ lb/pulg ²		Temperatura de transición	
		°C	°F
50,	Completamente pasivado	-70 a -30	-90 a -25
50 a 80,	Completamente pasivado y con control de las inclusiones	-70 a -30	-90 a -25
45,	Completamente pasivado	-50 a -18	-60 a 0
45,	Pasivado con silicio	-40 a -7	-40 a -20
42 a 65,	Semipasivado	-25 a +10	-10 a +50

El uso del vanadio y el niobio junto con el rolado controlado mejora el punto de fluencia y la soldabilidad. Esto se debe en gran parte a la reducción del tamaño de grano de ferrita con el consecuente aumento en la resistencia, por lo que cualquier disminución en la tenacidad se puede despreciar.

Las propiedades restantes, se miden en dirección longitudinal al rolado. En dirección transversal al rolado, la formabilidad y tenacidad disminuyen considerablemente. Este efecto se debe a la presencia de inclusiones no metálicas de bajo punto de fusión que se deforman durante el rolado en caliente.

En el caso de los aceros microaleados, la presencia de inclusiones de azufre es la causa de la direccionalidad de propiedades, el efecto que tienen estas inclusiones en la tenacidad se muestran en la figura 37, en la que se observa, que en pruebas hechas en dirección longitudinal al rolado el valor de la tenacidad llega a 55 kg-m (40 lb-pie) mientras que en dirección transversal sólo se obtuvo un valor máximo de 20 kg-m (15 lb-pie). Para mejorar la tenacidad de estos aceros, se les adicionó pequeñas cantidades de titanio o zirconio, ya que estos elementos forman sulfuros de alto punto de fusión, los cuales no se deforman durante el proceso de rolado proporcionando una mejor tenacidad en dirección transversal.

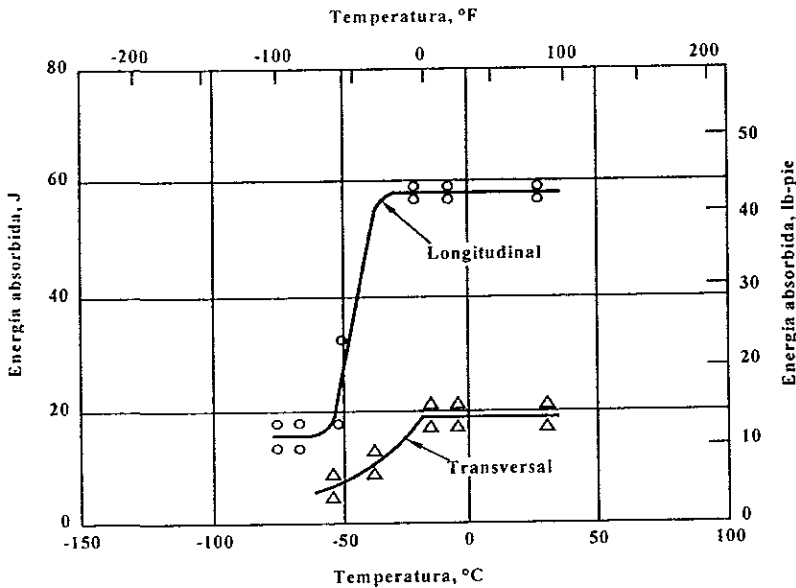


Figura 37.- Efecto de la direccionalidad de propiedades en la temperatura de transición.

4.2.6 Formabilidad.

Los aceros microaleados por su alta resistencia y menor ductilidad, comparados con los aceros al carbono convencionales, son más difíciles de trabajar. Sin embargo, cuentan con una buena formabilidad y se pueden obtener piezas complejas, también se pueden estampar, forjar y por su puesto rolar. Usualmente se trabajan a temperatura ambiente (nunca por debajo de -10°C), y a elevadas presiones.

El grado de formabilidad depende también de la direccionalidad de las propiedades. La adición de titanio mejora las propiedades en dirección transversal y por lo tanto, se mejora la formabilidad. Esto se observa en las tablas 27 y 28, en la que se indican los radios mínimos que se pueden obtener en varios aceros microaleados según SAE J410c (tabla 27) y en el A-715 (tabla 28) el cual debido a su contenido de Ti se puede formar en radios más pequeños.

Tabla 27.- Radios mínimos recomendados por SAE J410c.

Grado	Radio mínimo recomendado para espesores de:		
	< 4.6 mm (<0.180 pulg)	4.6 a 6.4 mm (0.180 a 0.25 pulg)	6.4 a 12.7 mm (0.25 a 0.5 pulg)
942 X	.....	t	2 t
945 A, 945 C	t	2 t	2.5 t
945 X	t	t	2 t
950 A, 950 B, 950 C, 950 D	t	2 t	3 t
950 X	1.5 t	2.5 t	2.5 t
955 X	2 t	3 t	3 t
960 X	2.5 t	3.5 t	3.5 t
965 X	3 t	4 t	4 t
970 X	3.5 t	4.5 t	4.5 t
980 X (a)	3.5 t	4.5 t	4.5 t

(a) Disponible únicamente en espesores de hasta 9.5 mm (0.375 pulg.)

Tabla 28.- Radios especificados para el acero ASTM A-715.

Grado	Radios de doblado en:	
	Dirección transversal (a)	Dirección longitudinal (a)
50	0.5 t	0
60	0.5 t	0
70	0.75 t	0.5 t
80	0.75 t	0.5 t

(a) Para láminas con espesores mayores a 5.84 mm (0.2299 pulg.)

También se pueden trabajar en caliente, pero este proceso puede modificar sus propiedades mecánicas por lo que se recomienda trabajar algunos grados de estos aceros a temperaturas de entre 815 y 900 °C (1500 y 1600 °F) sin que se aprecie un endurecimiento posterior al

enfriamiento. La mayoría de los fabricantes no recomiendan trabajar estos aceros a temperaturas menores a 650 °C (1200 °F).

4.2.7 Soldabilidad.

Los aceros microaleados se pueden soldar mediante los mismos métodos que los aceros al carbono, sin ser necesario un tratamiento térmico previo o posterior a la soldadura. Esto se debe a que el contenido de carbono permanece bajo.

Igual que un acero al carbono, las zonas aledañas a la soldadura se ven afectadas, pero en los aceros microaleados no se presentan daños tan severos comparados con los que sufriría un acero con la cantidad suficiente de carbono para igualar la resistencia de un microaleado.

El proceso más utilizado para soldar este tipo de acero, es el de arco sumergido. Mediante este método, se pueden obtener altas producciones pero tiene el inconveniente de que la tenacidad del metal de soldadura presenta una reducción. Las causas de esta desventaja son, entre otras cosas, la composición del metal base y del metal de soldadura, y la velocidad con la que se lleva a cabo la soldadura.

Se recomienda el uso de electrodos con bajo contenido de hidrógeno, así como un precalentamiento del metal base cuando este tenga un espesor mayor a 25.4 mm (1 pulg.). La temperatura de precalentamiento depende del grado del material, del espesor y proceso de soldadura y se encuentra en el rango de 40 a 200 °C (100 a 400 °F), dependiendo de los requerimientos de resistencia en las uniones soldadas.

En general, los aceros microaleados cuentan con buenas soldabilidad y formabilidad. Esto se debe en parte a su bajo contenido de carbono, sin embargo, su tenacidad disminuye por la acción de ciertos procesos de fabricación y de soldadura. En la tabla 29, se observan la soldabilidad y formabilidad en aceros microaleados tomados de la especificación SAE J410c en orden ascendente partiendo del grado con menor tenacidad.

Tabla 29.- Formabilidad y soldabilidad de los aceros microaleados.

Tenacidad	Formabilidad	Soldabilidad
945 A	945 A	945 A
950 A	950 A	950 A
950 B	945 C, 945 X	950 D
950 D	950 B, 950 X, 942 X	945 X
945 X, 950 X	950 D	950 B, 950 X
945 C, 950 C, 942 X	950 C	945 C
955 X	955 X	955 X, 950 C, 942 X
960 X	960 X	960 X
965 X	965 X	965 X
970 X	970 X	970 X
980 X	980 X	980 X

4.2.8 Disponibilidad.

Existen varios fabricantes que producen este tipo de aceros en sus diferentes grados, uno de ellos es USITEN. En la tabla 30 se muestran las equivalencias entre los grados USITEN y ASTM.

Tabla 30.- Equivalencia entre los grados USITEN y ASTM.

Grados USITEN	Grados ASTM		
	A 299	A 572	A 633
USITEN 355	A 299 (*)	Gr. 50 (*)	Gr. C (*) Gr. D (*)
USITEN 355-I	A 299 (*)	Gr. 50 (*) Tipo 1.	Gr. C
USITEN 375-I	A 299 (*)	Gr. 60 Tipo 2. (**)	.....
USITEN 460-I	.....	Gr. 65 Tipo 3	Gr. E (*)
USITEN 460-II	.....	Gr. 65 Tipo 3 (*)	Gr. E (*)

(*) Equivalencia únicamente en sus propiedades mecánicas

(**) Equivalencia sólo con el esfuerzo máximo a la tensión.

En la tabla 31 se muestra la composición química de los grados que contiene la tabla 30.

Tabla 31.- Composición química de los grados fabricados por USITEN.

Grado	Porcentaje en peso (%)									
	C Máx.	Mn	Si Máx.	P Máx.	S Máx.	Nb		V		Mo
						t≤35 mm	t>35mm	t≤35 mm	t>35mm	
USITEN 355	0.20	1.00/1.60	0.50	0.035	0.030	.....	0.010/ 0.040	.....	.....	0.10
USITEN 355-I	0.18	"	"	"	"	0.025 - 0.055		.....	.....	"
USITEN 375-I	0.20	"	"	"	"	0.020 - 0.050		.....	.....	"
USITEN 460-I	0.20	1.00/1.70	"	"	"	0.015/ 0.045		0.075/ 0.135		"
USITEN 460-II	0.18	"	0.40	"	"	0.015 - 0.045		0.090/ 0.150	0.105/ 0.165	"

A continuación se nombran las propiedades mecánicas de estos aceros a temperatura ambiente (tablas 32 y 33).

Tabla 32.- Punto de fluencia a temperatura ambiente

Grados	Punto de fluencia (S _y) kg/cm ²				
	4.76 ≤ t ≤ 16 mm	16 < t ≤ 35	35 < t ≤ 50	50 < t ≤ 80	80 < t ≤ 150
USITEN 355	3620 (3416)	3620 (3416)	3518 (3314)	3416 (3212)	3314 (3110)
USITEN 355-I	3620 (3416)	3620 (3416)	3518 (3314)	3416 (3212)	3314 (3110)
USITEN 375-I	3824 (3620)	3824 (3620)	3620 (3416)	3518 (3314)	.....
USITEN 460-I	4690 (4487)	.....	.....	.....	.....
USITEN 460-II	.....	4589 (4385)	4487 (4283)	4283 (4079)	.....

Tabla 33.- Esfuerzo máximo a la tensión y deformación mínima a temperatura ambiente.

Grados	Esfuerzo máx. a la tensión kg/cm ²			Deformación %	
	4.76 ≤ t ≤ 35 mm	35 < t ≤ 80	80 < t ≤ 150	En 50 mm	En 200 mm
USITEN 355	5200 - 6220	5200 - 6220	5200 - 6220	22	18
USITEN 355-I	5200 - 6220	4997 - 6016	4997 - 6016	22	18
USITEN 375-I	5405 - 6424	5100 - 6120	.....	21	17
USITEN 460-I	6016 - 7138	.....	.....	20	16
USITEN 460-II	6016 - 7138	5812 - 7138	.....	20	16

En la siguiente tabla se muestran los puntos de fluencia a temperaturas elevadas

Tabla 34.- Punto de fluencia (S_y) a temperaturas elevadas.

Grados		100 °C (210 °F)		150 °C (300 °F)		200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C
		$t \leq 35$	$35 \leq t \leq 70$	$t \leq 35$	$35 \leq t \leq 70$	390 °C	480 °F	570 °F	660 °F	750 °F
USITEN 355	kg/cm ²	3100	2998	2896	2804	2600	2400	2200	2100	1800
	kpsi	44.1	42.6	41.2	39.9	37.0	34.1	31.3	29.9	25.7
USITEN 355 - I	kg/cm ²	3100	2998	2896	2804	2600	2400	2200	2100	1800
	kpsi	44.1	42.6	41.2	39.9	37.0	34.1	31.3	29.9	25.7
USITEN 375 - I	kg/cm ²	3200	3100	2998	2896	2700	2500	2345	2150	2845
	kpsi	45.5	44.1	42.6	41.2	38.4	35.5	33.3	30.6	26.2
USITEN 460 - I	kg/cm ²	4100		3800		3400	3200	2998	2700	2400
	kpsi	58.3		54.1		48.3	45.5	42.6	38.4	34.1
USITEN 460 - II	kg/cm ²	4100		3800		3400	3200	2998	2700	2400
	kpsi	58.3		54.1		48.3	45.5	42.6	38.4	34.1

4.3 Aceros inoxidables dúplex.

4.3.1 Introducción.

Los aceros inoxidables dúplex, también llamados ferrítico-austeníticos, se caracterizan por la presencia de ambas fases. En la mayoría de los casos, ambas fases se encuentran en cantidades iguales, esto depende de su composición y tratamiento térmico.

Los principales elementos de aleación son: cromo y níquel, pero también se les añade nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno con el objeto de proporcionarle mejor resistencia a la corrosión y controlar su microestructura.

La resistencia a la corrosión de estos aceros es comparable a la de los aceros inoxidables austeníticos con composición similar, pero poseen un punto de fluencia y una resistencia máxima a la tensión mucho más elevadas. Su tenacidad se encuentra entre la del acero inoxidable austenítico y el ferrítico.

Solidifican con 100% de ferrita. A una temperatura de 1000 °C (1832 °F) empieza a formarse austenita en los bordes de grano. Los elementos como el C, Ni y Cu, empiezan a difundirse y concentrarse en la austenita y el Cr, Mo, y W se concentran en la ferrita.

El balance óptimo de fases es tener partes iguales de ferrita y austenita. Todas las composiciones posibles se deben ajustar para obtener este equilibrio de fases a una temperatura de 1040 °C (1904 °F) después de aplicársele un recocido o un trabajo en caliente. De los elementos de

aleación, el carbono es el más indeseable, por lo que debe mantenerse tan bajo como sea posible, esto se debe a la precipitación de carburos de cromo ($Cr_{23}C_6$) los cuales reducen la resistencia a la corrosión del acero. El nitrógeno es el elemento más importante para lograr el equilibrio de fases.

Las figuras 35 y 36, muestran la microestructura de un acero dúplex. En ambas, se puede apreciar una matriz de ferrita con islas de austenita en varias formas, pero la microestructura obtenida de fundición (fig. 35), es más fina y la austenita presenta una morfología distinta a la observada en una placa (fig. 36).

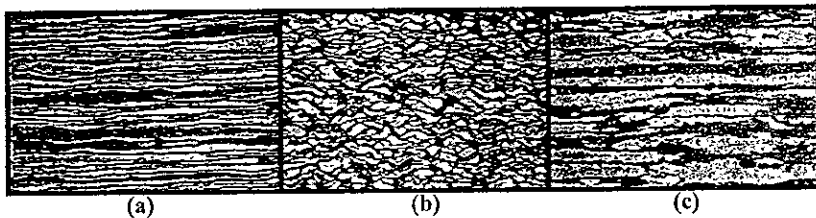


Figura 35.- Microestructura de un acero dúplex Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N (placa).
 (a) Paralelo a la dirección del rolado, (b) Transversal,
 (c) Amplificación 100X.



Figura 36.- Microestructura de un acero dúplex Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N.
 Amplificación 25X.

La primera generación de estos aceros, se caracteriza por su elevado contenido de carbono (hasta 0.2%), lo que origina la disminución de su resistencia a la corrosión en la soldadura por lo que es necesario un tratamiento térmico post soldadura para obtener buenas propiedades mecánicas. Un ejemplo de esta generación es el acero tipo 329 (25Cr-5Ni-1.5Mo). También contaban con buena resistencia a la corrosión localizada, esto, debido a su alto contenido de cromo y molibdeno.

La segunda generación surge por la necesidad de mejorar la soldabilidad y resistencia a la corrosión de los aceros de la primera generación, presentando mejores características que varias

familias de aceros inoxidable. Se caracterizan por su bajo contenido de carbono, asegurándose una buena resistencia a la corrosión intergranular. También se les adiciona nitrógeno en cantidades mayores a 0.10% con el objeto de mejorar la resistencia a la corrosión por picaduras y hendiduras. Aún más importante es el hecho de que la soldadura tiene la misma resistencia a la corrosión que el metal base recocido.

Esta generación combina la casi inmunidad a la corrosión bajo esfuerzos producida por los compuestos de cloro de los aceros inoxidable ferríticos con la tenacidad y formabilidad de los austeníticos.

Una tercera generación se desarrolló recientemente en Suecia, se diferencia de la segunda generación en que esta no contiene Mo. Con un contenido de 0.4% Ni, el cual es más bajo que el de los aceros de la segunda generación, también contiene 0.2% Cu. Su composición tiene el objeto de reducir los costos de fabricación, con un precio menor que el del acero tipo 316L.

4.3.2 Composición y especificación.

El desarrollo de los aceros inoxidable dúplex fue particularmente acelerado durante las décadas de 1970 y 1980, aunque han estado disponibles en una gran variedad de composiciones desde décadas anteriores. Los grados recientes contienen aproximadamente 0.18% Cr. de 4 a 6% Ni, hasta 4.5% Mo y 0.7% Cu y W, también se las adiciona nitrógeno en cantidades que van de 0.08 a 0.35%.

Los grados comerciales que se manejan actualmente, se dividen en 4 tipos. A continuación se listan en orden ascendente partiendo de su resistencia a la corrosión.

- Fe - 23Cr - 4Ni - 0.1N
- Fe - 22Cr - 5.5Ni - 3Mo - 0.15N
- Fe - 25Cr - 5Ni - 2.5Mo - 0.17N - Cu
- Fe - 25Cr - 7Ni - 3.5 Mo - 0.25N - W - Cu

Al igual que en los aceros inoxidable austeníticos 18-8, en estos también se utilizan al cromo y níquel como elementos principales para la identificación de los aceros inoxidable dúplex. Las aleaciones listadas anteriormente reciben su nombre de acuerdo a su composición: 2304, 2205, 2505 y 2507 respectivamente. En la tabla 38 se lista la composición de la primera y segunda generación. También se adicionan las composiciones de algunos aceros inoxidable austeníticos para su comparación.

La evolución de los aceros inoxidable dúplex de la segunda generación, ha hecho necesaria la aparición de la especificación ASTM y ASME. Todos estos aceros están incluidos en las especificaciones ASTM para placa, lámina, tubos rolados y soldados. De hecho, se incluyen en la Sección VIII, División I del código ASME.

Tabla 38.- Composición química de los aceros inoxidable dúplex más utilizados.

ASTM	Nombre Comercial	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Otros
Primera generación de aceros inoxidable dúplex							
A789, A790	3RE60	18.5	4.7	2.7			1.7 Si
A240, A268	Tipo 329	26	4.5	1.5			
A743, A744	CD-4MCu	25	5	2	3		
Segunda generación de aceros inoxidable dúplex							
A182, A240, A789, A790	44LN	25	6	1.7		0.15	
A789, A790	DP-3	25	7	3	0.5	0.15	0.3W
A182, A240, A276, A789, A790	Aleación 2205	22	5	3		0.15	
A240, A479, A789, A790	Ferrallium 255	25	6	3	2	0.20	
A240	7-Mo PLUS	26.5	4.8	1.5		0.20	
A743	Atlas 958	25	1	4.5		0.25	
Aceros inoxidable austeníticos							
A182, A 213, A240, A312	Tipo 304	18	8				
A182, A 213, A240, A312	Tipo 304L	18	8				
A182, A 213, A240, A312	Tipo 316	17	10	2			
A182, A 213, A240, A312	Tipo 316L	16	11	2			
B472, B473, B474, B475, B725	20Cb-3	20	34	2	3.5		
B625, B673, B674, B677	Aleación 904L	20	25	4.5	1		

4.3.3 Propiedades mecánicas.

Los aceros inoxidable dúplex tienen mejores propiedades mecánicas que los aceros inoxidable austeníticos (ver tabla 39). Esto tiene varias ventajas, una de ellas es la económica ya que se requieren menores espesores y su proceso de fabricación se facilita, otra ventaja es que se pueden soportar presiones más elevadas que los aceros inoxidable austeníticos.

El punto de fluencia de un acero 2205 es de 4589 kg/cm^2 ($65 \times 10^3 \text{ lb/pulg}^2$), el cual es el doble que el de un acero inoxidable austenítico y significativamente mayor que el de un ferrítico. La

dureza varía, dependiendo del proceso de fabricación y del trabajo en frío. Pero generalmente se encuentra en el rango de 260 HV (25 HRC), para un acero 2205.

Tabla 39.- Propiedades mecánicas de los aceros inoxidable dúplex más utilizados.

ASTM	Nombre Comercial	Punto de fluencia 0.02%		Resistencia máx. a la tensión		Def. en 2 pulg. ó 50 mm
		kg/cm ²	X10 ³ lb /pulg ²	kg/cm ²	X10 ³ lb /pulg ²	
Primera generación de aceros inoxidable dúplex						
A789, A790	3RE60	4487	65	6320	90	30
A240, A268	Tipo 329	4945	70	6320	90	15
A743, A744	CD-4MCu	4945	70	7036	100	16
Segunda generación de aceros inoxidable dúplex						
A182, A240, A789, A790	44LN	4590	65	7036	100	25
A789, A790	DP-3	4590	65	6320	90	30
A182, A240, A276, A789, A790	Aleación 2205	4590	65	6320	90	25
A240, A479, A789, A790	Ferralium 255	5600	80	7750	110	15
A240	7-Mo PLUS	4945	70	6320	90	15
A743	Atlas 958	5251	75	7036	100	18
Aceros inoxidables austeníticos						
A182, A 213, A240, A312	Tipo 304	2090	30	5251	75	40
A182, A 213, A240, A312	Tipo 304L	1733	25	4945	70	40
A182, A 213, A240, A312	Tipo 316	2090	30	5251	75	40
A182, A 213, A240, A312	Tipo 316L	1733	25	4945	70	40
B472, B473, B474, B475, B725	20Cb-3	2450	35	5600	80	30
B625, B673, B674, B677	Aleación 904L	2090	30	4945	70	35

Debido a la microestructura (austenita-ferrita), sus propiedades físicas se encuentran entre estas dos familias de aceros inoxidables. La conductividad térmica es la mitad que la de un acero al carbono pero 25% mayor que de un acero inoxidable austenítico. el coeficiente de conductividad térmica es similar al del acero al carbono y 40% menor que del acero inoxidable austenítico. Estas propiedades son benéficas para la transferencia de calor. La tabla 40 muestra los valores de las principales propiedades físicas de los aceros inoxidables dúplex y la de los austeníticos para su comparación.

Tabla 40.- Propiedades físicas de los aceros inoxidable dúplex más utilizados.

ASTM	Nombre comercial	Conductividad térmica	Coef. De expansión térmica	Módulo de elasticidad a tensión
		Btu-pie/(h)(pie ²)(°F) a 68 °F	10 ⁻⁶ pulg/pulg/°F a 68 °F	X 10 ³ lb/pulg ²
Primera generación de aceros inoxidable dúplex				
A789, A790	3RE60	11.5	6.8	28
A240, A268	Tipo 329	8.8	5.6	29
A743, A744	CD-4MCu	8.8	6.3	29
Segunda generación de aceros inoxidable dúplex				
A182, A240, A789, A790	44LN	11.5	7.8	29
A789, A790	DP-3	12	8.3	28
A182, A240, A276, A789, A790	Aleación 2205	11	7.5	27.5
A240, A479, A789, A790	Ferrallium 255	7.8	6.1	31
A240	7-Mo PLUS	8.6	6.4	29
Aceros inoxidable austeníticos				
A516.	Acero al carbono	30	6.6	28
A182, A 213, A240, A312	Tipo 304L	9	9.6	29
A182, A 213, A240, A312	Tipo 316L	9	8.8	28
B472, B473, B474, B475, B725	20Cb-3	7	8.2	28
B625, B673, B674, B677	Aleación 904L	7.8	8.4	28

El módulo de elasticidad es casi igual al de los austeníticos (ver tabla 40). Los aceros inoxidable dúplex son magnéticos debido al contenido de ferrita y tienen excelente tenacidad la cual se complementa con su elevada resistencia máxima a la tensión y punto de fluencia.

En comparación con los aceros inoxidable ferríticos, los dúplex tiene una temperatura de transición (de dúctil a frágil) más baja y las fallas se presentan gradualmente. La temperatura de transición de un acero dúplex sin soldar, es de -100 °C (-150 °F) lo cual es benéfico, sin embargo, en las zonas aledañas a la soldadura se ve afectada su tenacidad lo cual limita las aplicaciones de estos aceros.

4.3.4 Resistencia a la corrosión.

Como en los aceros inoxidable austeníticos, en los dúplex, la microestructura juega un papel muy importante en la resistencia a la corrosión. El tipo de corrosión que afecta con mayor severidad a este tipo de aceros es la corrosión por picaduras. Por lo que para determinar la

resistencia a este tipo de corrosión, se usa comúnmente un valor obtenido directamente de la composición del acero y se le conoce como PRE (Pitting Resistance equivalent), equivalente de la resistencia a la corrosión por picadura. Este concepto se propuso en la década de 1970 con el objeto de comparar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable dúplex en soluciones que contiene altas concentraciones de cloruros. El PRE se calcula al añadir los porcentajes en peso de los elementos que son afectados por esta clase de sustancias principalmente cromo, molibdeno, y nitrógeno. Luego normalizándolos con el efecto que tiene 1% Cr.

Existen muchas fórmulas para calcular el PRE, en las cuales se varía el porcentaje de nitrógeno. También la fórmula puede incluir valores negativos que pertenecen a los elementos como el azufre y el fósforo.

La fórmula comúnmente utilizada es:

$$\text{PRE} = \% \text{ Cr} + 3.3(\% \text{ Mo}) + 16(\% \text{ N})$$

Se puede incluso hacer una clasificación de los aceros inoxidable en función de este valor. Por ejemplo, el valor del PRE para un acero dúplex Fe-23Cr-4Ni-0.1N (2304) es de 24 y para un Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-Cu-W (2507 "super dúplex"), el valor del PRE es de 40. La tabla 41 muestra los valores del PRE que tiene ciertos aceros inoxidable dúplex.

Tabla 41.- Valor del PRE (equivalente de la resistencia a la corrosión por picadura) en aceros inoxidable dúplex.

ASTM	Nombre comercial	PRE (a)
A789, A790	3RE60	27.1 – 30.5
A240, A268	Tipo 329	23.3 – 34.6
A182, A240, A789, A790	44LN	30.2 – 35.8
A789, A790	DP-3	33.9 – 42.4
A182, A240, A276, A789, A790	Aleación 2205	30.5 – 37.8
A240, A479, A789, A790	Ferralium 255	35.2 – 43.9

(a) $\text{PRE} = \% \text{ Cr} + 3.3(\% \text{ Mo}) + 16(\% \text{ N})$

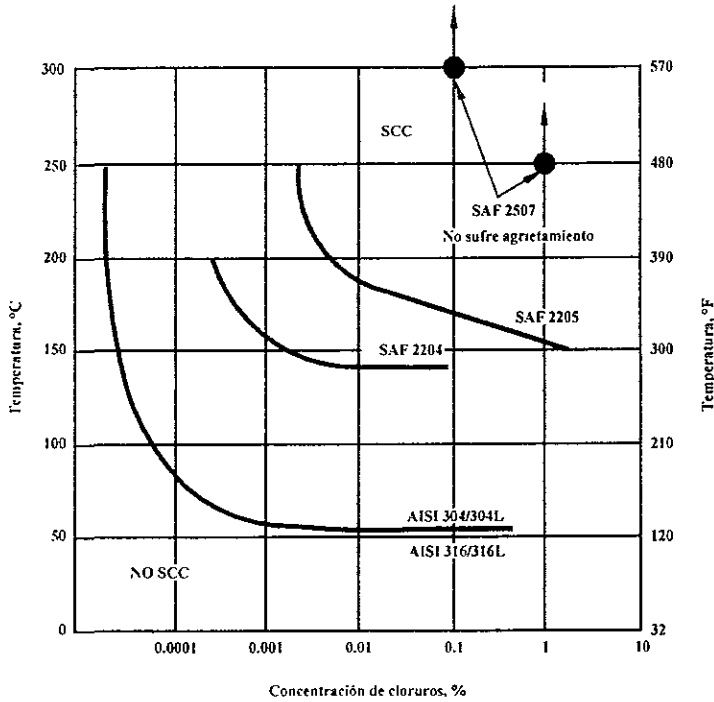
El alto contenido de cromo de estos aceros los provee de una buena resistencia a la corrosión por picadura y por hendiduras, principalmente en ambientes ricos en cloruros. También el elevado contenido de molibdeno y cromo son especialmente benéficos en ambientes oxidantes. En la tabla 42 se muestran algunas comparaciones en las velocidades de corrosión de dos aceros inoxidable dúplex y un acero inoxidable austenítico de bajo contenido de carbono en este tipo de ambientes.

Tabla 42.- Comparación de la velocidad de corrosión de los aceros inoxidable dúplex más utilizados y un acero inoxidable austenítico.

Solución y temperatura	Velocidad de corrosión mpy		
	Aleación 2205	Ferrallium 255	Tipo 317L
1% Acido clorhídrico, hirviendo	0.1	0.1	0.1
10% Acido sulfúrico, 66 °C (150°F)	1.2	0.2	8.9
10% Acido sulfúrico, hirviendo	.....	40.0	490.0
30% Acido fosfórico, hirviendo	1.6	0.2	6.7
55% Acido fosfórico, hirviendo	.....	0.1	1.2
85% Acido fosfórico, 66 °C (150°F)	0.4	0.1	0.2
65% Acido nítrico, hirviendo	20.6	5.0	20.8
10% Acido acético, hirviendo	0.1	0.2	0.2
20% Acido fórmico, hirviendo	1.3	0.4	8.5
4% Acido fórmico, hirviendo	.....	0.4	1.7
3% Cloruro de sodio, hirviendo	0.1	0.4	1.0
0.8% Cloruro de sodio + 0.5% Acido nítrico, hirviendo	.....	1.2	31.0
5% Cloruro de sodio + 0.1% Acido nítrico, hirviendo	.....	1.0	148.0
50% Hidróxido de sodio, hirviendo	.....	1.8	29.0

En ambientes reductores como el ácido sulfúrico, las adiciones de níquel al acero inoxidable reducen las velocidades de corrosión. Sin embargo, los aceros inoxidable dúplex contienen un porcentaje menor de níquel que los austeníticos esto es con el objeto de conseguir el balance de microestructura que se requiere. Esta aparente pérdida de resistencia a la corrosión se compensa con el elevado contenido de cromo y molibdeno de los dúplex. También el contenido de cobre reduce el ataque de la corrosión en ambientes ácidos, por lo que muchos aceros dúplex contienen cobre.

Otra ventaja de estos aceros es la buena resistencia a la corrosión bajo esfuerzos en soluciones que contienen cloruros. Esta característica tiene relevancia cuando se utiliza agua de enfriamiento o cuando se trabaja con ácidos en solución a temperaturas de entre -60 a 300 °C (-75 a 570 °F). La figura 37 muestra la resistencia a este tipo de corrosión y la compara con la resistencia de un acero inoxidable austenítico.



SAF 2304 Fe-23Cr-4Ni-0.1N
 SAF 2205 Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.1N
 SAF 2507 Fe-25Cr-7Ni-4Mo-0.3N

Figura 37.- Sensibilidad a la corrosión bajo esfuerzos (SCC) de varios aceros inoxidables dúplex y austeníticos en función de la temperatura y la concentración de cloruros.

De la figura 37. se puede deducir que entre más elevado sea el contenido de cromo, níquel, molibdeno y nitrógeno, es mejor su resistencia a la corrosión bajo esfuerzos (SCC). Estos datos no hacen referencia a los efectos que tiene cada elemento en particular en la resistencia a la corrosión.

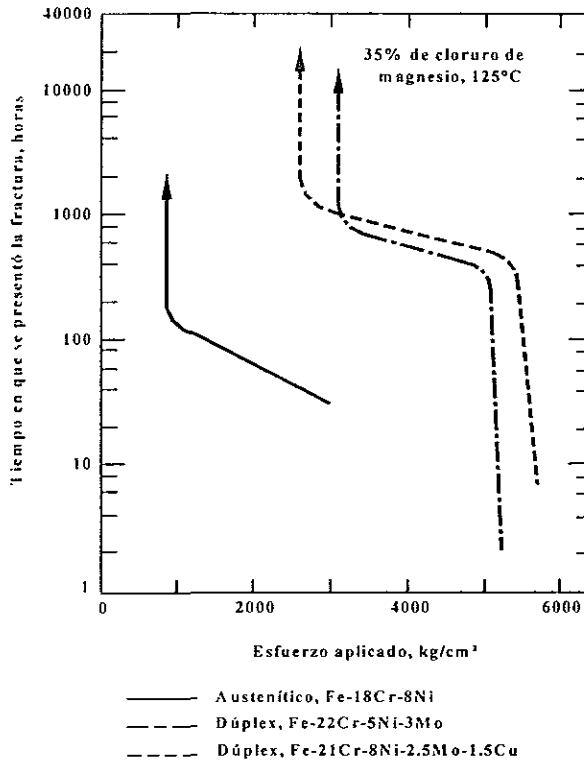


Figura 38.- Efecto de un esfuerzo aplicado en el tiempo de falla de varios aceros inoxidables en ambientes ricos en cloruro de magnesio.

Los dúplex cuentan con mejor resistencia a la corrosión que los aceros austeníticos A 314 y A 316. Bajo condiciones severas, como en cloruro de magnesio hirviendo, los aceros dúplex han demostrado tener excelente resistencia a la corrosión bajo esfuerzos (SCC) y a diferencia de la aleación 20Cb-3, la cual se usa con frecuencia en este tipo de ambientes, los aceros dúplex tienen mejor resistencia al uso de agua de enfriamiento y a los vapores con contenido de cloruros. Una prueba de esto se muestra en la figura 38.

En cuanto a la microestructura, esta tiene una gran importancia en la resistencia a la corrosión, ya que debido a que los aceros inoxidables dúplex presentan una combinación de fases, éstos no cuentan con la misma resistencia y por lo tanto hay que ser muy cuidadosos en el control del porcentaje de cada una.

Como se muestra la figura 39, el porcentaje de ferrita afecta a la resistencia a la corrosión en cloruro de magnesio con una concentración del 42% y bajo la acción de un esfuerzo aplicado de 2400 kg/cm^2 ($35 \times 10^3 \text{ lb/pulg}^2$).

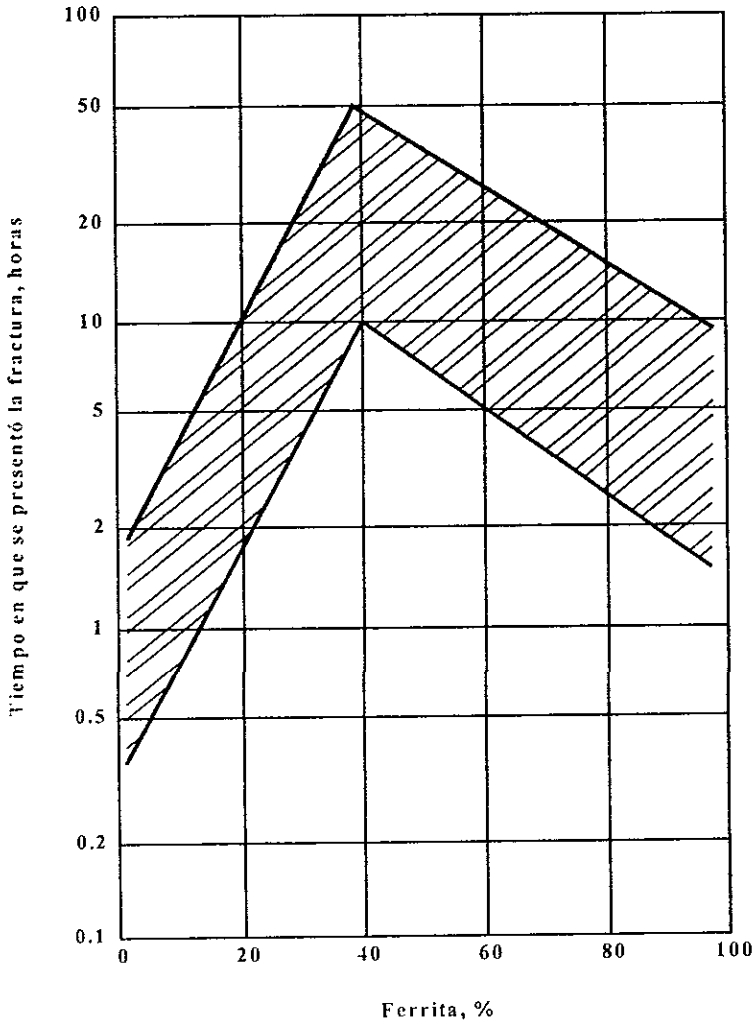


Figura 39.- Efecto del contenido de ferrita en el tiempo de falla en aceros inoxidables dúplex en servicio con cloruro de magnesio al 42%, hirviendo. Con un esfuerzo aplicado de 2400 kg/cm^2 .

4.3.5 Formabilidad.

Aunque el valor del punto de fluencia de los aceros inoxidable dúplex es casi el doble que el de los austeníticos, su formabilidad se encuentra entre la de los austeníticos y ferríticos.

Se pueden trabajar en frío pero a diferencia de los austeníticos, estos necesitan de mayores cargas y debido a su resistencia, deben fabricarse con radios mayores, también se les tiene que aplicar un templado y revenido si se requieren porcentajes de deformación mayores a 15 %, esto es con el objeto de prevenir la corrosión bajo esfuerzos.

El trabajo en caliente se realiza en un rango de temperatura de entre 980 y 1260 °C (1800 y 2300°F), pero la temperatura ideal está dada por la composición de la aleación. Al igual que con el trabajo en frío, las piezas obtenidas mediante el trabajo en caliente se les debe hacer un recocido a temperaturas que oscilan entre 950 y 1120 °C (1740 y 2050 °F).

El equipo para el forjado y rolado de estos aceros debe tener la suficiente capacidad para reducir el material mientras este se encuentra en el rango de temperatura para un formado óptimo. El acabado superficial de las piezas forjadas o roladas, se puede mejorar controlando el equilibrio de fases, la composición química del acero y la temperatura de forjado o rolado.

4.3.6 Soldabilidad.

El desempeño de los aceros dúplex se puede ver afectado significativamente por la soldadura, esto se manifiesta al tratar de evitar la formación de fases indeseables en el acero. Por lo que, el material de aporte a especificarse así como el proceso de soldadura deben ser cuidadosamente seleccionados y vigilados.

La soldabilidad de estos aceros se encuentra entre la de los aceros inoxidable austeníticos y la de los ferríticos. Los grados actuales de aceros dúplex tienen un contenido muy bajo de carbono (<0.03% en peso), por lo tanto, se puede decir que se elimina el riesgo de corrosión intergranular debida a la precipitación de carburos. También se deben usar materiales de aporte con bajo contenido de azufre y fósforo (<0.03% en peso) que junto con la solidificación de la ferrita, previene el agrietamiento en caliente. También cuentan con buena resistencia al agrietamiento por hidrógeno (agrietamiento en frío), este se presenta cuando el hidrógeno se disuelve en la austenita. Sin embargo, cualquiera de estas dos formas de agrietamiento se pueden presentar en los aceros dúplex por lo que se deben tomar las precauciones adecuadas.

Aunque el precalentamiento no se recomienda, algunas veces se especifica para aceros inoxidable dúplex con bajo contenido de nitrógeno. Sin embargo para los dúplex altamente aleados, el precalentamiento puede afectar las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión.

El tratamiento térmico post soldadura no es comúnmente utilizado en este tipo de aceros excepto cuando se usa soldadura autógena o cuando se utiliza un material de aporte con la misma composición química que el material base. Aunque no siempre es necesario, sobre todo cuando se utiliza un material de aporte con alto contenido de níquel. También se les aplica a los tubos con costura con el propósito de restaurar el correcto equilibrio entre fases y para que se vuelvan a disolver los precipitados que no se deseen.

Los procesos de soldadura que se utilizan en los aceros inoxidable dúplex, son los mismos que se utilizan en los austeníticos. Estos son:

Arco eléctrico. Este proceso, tiene la ventaja de que se puede aplicar en el lugar donde se encuentre el equipo, además de ser resistente al viento. También se utiliza con frecuencia en las reparaciones con soldadura, esto se debe a la flexibilidad del proceso.

Soldadura a base de tungsteno con gas inerte (TIG). Se utiliza en las pasadas de raíz y para soldar espesores delgados, también presenta la ventaja de dejar depósitos de soldadura de muy alta calidad.

Soldadura con arco sumergido (SAW). Este método se usa principalmente en láminas con espesores delgados y en la fabricación de tubos soldados.

Soldadura a base de metal con gas inerte (MIG). Este proceso se usa cuando se requiere una alta productividad.

Desde el punto de vista de la corrosión, las uniones soldadas son la parte más débil en un equipo fabricado de acero inoxidable, por lo que en la práctica, el soldador es el encargado de proporcionar una buena resistencia a la corrosión. A continuación se listan algunas recomendaciones que pueden ayudar a obtener una mejor resistencia a la corrosión.

- 1.- De ser posible, se deben fabricar por separado las partes hechas de acero al carbono y acero inoxidable dúplex.
- 2.- Tratar de evitar durante la fabricación, la contaminación del acero inoxidable con acero al carbono y otras impurezas. Por ejemplo, usar cuerdas de nylon en lugar de cadenas de acero para levantar al equipo, tener cuidado en el uso de montacargas, etc.
- 3.- No se deben usar las mismas herramientas en la fabricación de piezas de acero inoxidable y acero al carbono.
- 4.- Se deben seguir las instrucciones que proporciona el proveedor del material de soldadura, estas son: elegir el material de aporte adecuado, aplicar la cantidad de calor necesaria, controlar la temperatura, etc.

4.4 Aceros con carbono controlado.

4.4.1 Antecedentes.

Las especificaciones técnicas para la selección de materiales de construcción y la fabricación de cambiadores de calor en servicios de alto riesgo para plantas de refinación, establecen requerimientos muy estrictos principalmente en la utilización de materiales de acero al carbono. En el caso de servicios ácidos, tales como los encontrados en los procesos de alquilación, algunas especificaciones de ingeniería establecen contenidos máximos de elementos, así como tratamientos térmicos específicos, lo cual incrementa el costo de estos materiales, siendo evidente desde el punto de vista económico que se prefieran dichos materiales en comparación con los aceros de alta aleación o materiales no ferrosos como el monel.

La industria petrolera utiliza el ácido fluorhídrico (HF) en un proceso llamado alquilación el cual es muy importante en la producción de gasolina de alta calidad. Este ácido es sumamente peligroso y corrosivo y genera altos contenidos de hidrógeno lo que produce que los aceros que son expuestos a este tipo de ácido sean susceptibles a daños severos producidos por hidrógeno tales como: ampollamiento por hidrógeno, agrietamiento inducido debido a esfuerzos orientados por hidrógeno (SOHIC) y agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC).

Las fallas asociadas con el agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) generalmente ocurren en la zona afectada por calentamiento (HAZ) de las partes que van a ser soldadas principalmente en aceros aleados y aceros al carbono. Este tipo de falla se deriva de la formación de productos de transformación a baja temperatura tales como martensita y bainita, así como de los altos niveles de hidrógeno presentes en la soldadura.

Generalmente, este tipo de falla ocurre durante el servicio debido a la presencia de hidrógeno. Sin embargo, en algunas ocasiones ocurre después del proceso de soldadura y a pesar de que la falla (grieta) es grande, en algunas ocasiones es difícil de detectar.

La susceptibilidad a este tipo de falla se controla mediante el valor del carbono equivalente (CE) principalmente en aceros al carbono, ya que el carbono es el elemento fundamental en la aplicación de esta fórmula. El valor del carbono equivalente se calcula mediante la siguiente fórmula:

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

El valor del carbono equivalente en las unidades de alquilación es de suma importancia y debe ser limitado a un máximo de 0.40 % en peso para placas de acero. Ya que los aceros que poseen un valor de carbono equivalente muy alto, incrementan su resistencia máxima a la tensión, su

templabilidad y forman una microestructura martensítica debido al alto contenido de carbono lo cual trae como consecuencia la disminución de su ductilidad y el riesgo de agrietamiento principalmente en la zona afectada por calentamiento (HAZ). Además, su soldabilidad disminuye, es decir, se hacen difíciles de soldar.

4.4.2 Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) en aceros al carbono.

El agrietamiento inducido por hidrógeno es un término que se utiliza para hacer referencia del agrietamiento detectado en líneas de tubería y recipientes a presión como resultado de la cantidad de hidrógeno presente en el servicio o en el proceso de soldadura.

Los cambiadores de calor que operan en plantas de alquilación son susceptibles a este tipo de falla debido a la gran cantidad de hidrógeno producido por el ácido fluorhídrico (HF) que se maneja en este proceso.

La mayoría de las fallas asociadas con agrietamiento inducido por hidrógeno ocurren en la zona afectada por calentamiento debido principalmente a tres factores: la concentración de hidrógeno, el tipo de microestructura producida en el acero y la temperatura alcanzada durante el proceso de soldadura.

La cantidad de hidrógeno absorbido por una soldadura depende de varios factores tales como: el porcentaje de enfriamiento, el tamaño del cordón de soldadura y la concentración inicial de hidrógeno en el proceso de soldadura. Generalmente, el riesgo de agrietamiento aumenta con el incremento de la concentración de hidrógeno. Otros factores son: el hidrógeno remanente en el acero debido al proceso original de fundición, los servicios a altas temperaturas y las presiones parciales de hidrógeno elevadas, así como los procesos de corrosión particularmente debido a ambientes ricos en azufre (H_2S).

La microestructura es otro factor muy importante para determinar la susceptibilidad de un acero al agrietamiento inducido por hidrógeno. Ya que cualquier microestructura que tenga baja ductilidad y contenga esfuerzos internos es susceptible a este tipo de agrietamiento.

Los aceros con alto contenido de carbono producen una microestructura rica en martensita, la cual es muy dura y frágil, tiene poca o ninguna ductilidad y resulta tan dura que puede cortarse únicamente con herramientas especiales. Este tipo de microestructura generalmente conduce al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC). El alto contenido de carbono no solo produce más martensita, sino además, incrementa la susceptibilidad de esta al agrietamiento

Conforme se incrementa el contenido de carbono, se incrementa la templabilidad y la dureza principalmente de los aceros al carbono. La templabilidad o capacidad para el templeado de un acero, se refiere a la facilidad con que se forma la martensita. Los aceros con bajo contenido de

carbono tienen baja templabilidad; solo muy altas velocidades de enfriamiento permiten que toda la austenita se transforme en martensita. Por ejemplo, los aceros aleados tienen alta templabilidad. Un acero de bajo carbono y alta aleación puede formar martensita fácilmente, pero debido al bajo contenido de carbono la martensita no es dura.

En general, la soldabilidad de los aceros disminuye conforme su templabilidad aumenta.

Como una regla general, para aceros al carbono y aceros aleados, la alta dureza de su microestructura incrementa el riesgo de agrietamiento. Las microestructuras de baja dureza pueden soportar mayores concentraciones de hidrógeno que las microestructuras de alta dureza; reduciendo de esta manera la susceptibilidad al agrietamiento del acero.

Además del control del contenido de carbono en los aceros para disminuir su templabilidad y obtener microestructuras de baja dureza que ayuden a reducir la susceptibilidad del acero al agrietamiento inducido por hidrógeno. También se debe controlar el contenido de los elementos de aleación tales como: manganeso, silicio, cromo, molibdeno, vanadio, níquel y cobre principalmente en los aceros al carbono. El control del contenido de estos elementos de aleación así como del carbono se puede llevar a cabo mediante la aplicación de la fórmula del carbono equivalente (CE).

El control de la temperatura de la soldadura es otro factor que hay que tomar en consideración para eliminar el problema de agrietamiento por hidrógeno inducido. Este es un factor totalmente ajeno al daño ocasionado por los altos niveles de hidrógeno presentes en el proceso de alquilación, sin embargo, debe tomarse en cuenta pues podría afectar la integridad de las partes que van a ser soldadas sobre todo de los cambiadores de calor que operan en servicios con altas concentraciones de hidrógeno como los de alquilación.

Como se mencionó anteriormente, las microestructuras con mayor susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno son aquellas cuya dureza es muy alta. Sin embargo, es posible eliminar este tipo de falla manteniendo la microestructura a una temperatura suficientemente alta mediante un tratamiento de post calentamiento hasta eliminar la suficiente cantidad de hidrógeno.

Reduciendo el porcentaje de enfriamiento de la soldadura también se reduce la concentración de hidrógeno.

El precalentamiento disminuye la velocidad de enfriamiento y no solo reduce la dureza de la microestructura sino que también ayuda a eliminar las altas concentraciones de hidrógeno.

La temperatura de precalentamiento es conocida también como temperatura de interfase entre los cordones de soldadura. Si la temperatura de interfase llega a ser bastante baja, se puede presentar el agrietamiento inducido por hidrógeno en el material. Por tal motivo se debe mantener esta

temperatura lo suficientemente alta. Sin embargo, si llega a ser demasiado alta, se puede presentar el crecimiento excesivo del tamaño de grano dando como resultado la disminución de las propiedades mecánicas del material.

4.4.3 Carbono equivalente (CE).

El carbono equivalente (CE) es un método comúnmente utilizado para correlacionar la templeabilidad de los aceros al carbono con su composición química y así mostrar los efectos que tienen los cambios de composición sobre el comportamiento del material. Es decir, el carbono equivalente muestra como cambia la templeabilidad del acero en base a su composición.

Se han desarrollado varias fórmulas del carbono equivalente (todas ellas empíricas) para evaluar tanto la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno como la soldabilidad de los aceros al carbono. Estas formulas reducen la composición química del material a un solo número conocido como carbono equivalente (CE). Como se mencionó anteriormente existen varias formulas, sin embargo, la más comúnmente utilizada para evaluar los aceros al carbono que más se utilizan en la construcción de cambiadores de calor que operan en servicios de alquilación es:

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

Donde el símbolo de cada elemento representa el porcentaje en peso determinado mediante análisis o estimación.

La tabla 43 Muestra una comparación de los aceros al carbono que requieren tratamiento de precalentamiento y/o post calentamiento según el valor del carbono equivalente (CE) para reducir la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC).

Tabla 43.- Aplicación de tratamiento de precalentamiento y/o post calentamiento a los aceros al carbono según el valor del carbono equivalente (CE).

Aceros al carbono	Carbono equivalente (CE) %	Precalentamiento	Post calentamiento
	0.35	No requiere	No requiere
	0.35 - 0.55	Requiere	No requiere
	> 0.55	Requiere	Requiere

En general, los aceros al carbono con un valor de carbono equivalente bajo poseen excelente soldabilidad y no necesitan tratamientos térmicos especiales para eliminar el problema de agrietamiento inducido por hidrógeno.

Debido a que el carbono equivalente es calculado únicamente en base a la composición química del acero y no se toma en consideración ninguna otra variable, este es sólo un valor aproximado de su soldabilidad y la susceptibilidad al agrietamiento. Por lo que se tienen que tomar muy en cuenta otros factores tales como las concentraciones de hidrógeno tanto en el servicio como en el proceso de soldadura, la velocidad de enfriamiento de la soldadura y el espesor de las placas.

La figura 40 muestra el efecto que tiene el contenido de carbono y el espesor de la placa sobre la soldabilidad y la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno de los aceros al carbono expresado en términos de la necesidad de tratamiento de precalentamiento y relevado de esfuerzos post soldadura.

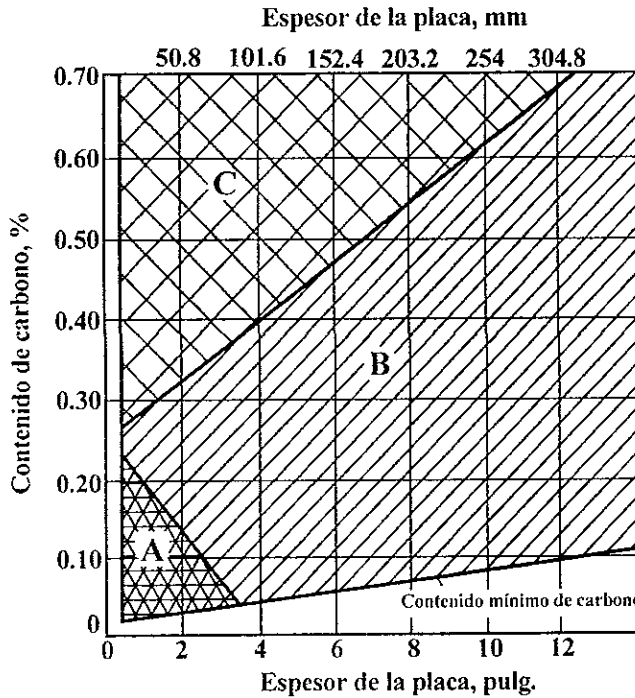


Figura 40.- Efecto del contenido de carbono y espesor de la placa sobre la soldabilidad y susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno en aceros al carbono.

La relación entre el contenido de carbono y el espesor de la placa en el área A de la figura 40 indica que el acero es fácil de soldar y presenta una mínima susceptibilidad al agrietamiento por lo que no se necesita ni precalentamiento ni relevado de esfuerzos post soldadura. El área B indica que requiere precalentamiento y el área C indica que requieren ambos, precalentamiento y relevado de esfuerzos post soldadura.

Existe otra fórmula del carbono equivalente (CE) la cual también es ampliamente utilizada. Esta fórmula fue desarrollada por Ito y Bessyo. En comparación con la fórmula previamente descrita, en esta se adiciona al boro como elemento de aleación para estimar el valor del carbono equivalente:

$$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cu + Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5(B)$$

Al igual que en la otra fórmula, el símbolo de cada elemento representa el porcentaje en peso determinado mediante análisis o estimación.

Esta fórmula se relaciona con todos los parámetros que proporcionan un índice de la concentración de hidrógeno presente en el acero principalmente en la zona afectada por calentamiento.

4.4.4 Control del carbono equivalente (CE).

El control del carbono equivalente es de suma importancia en los aceros al carbono ASTM A-516 según la especificación Phillips para servicios con HF que generalmente se utilizan en la construcción de cambiadores de calor que operan en servicios de alquilación, debido a que el alto contenido de carbono en estos materiales incrementa el valor del carbono equivalente (CE) y por consiguiente la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC), además de que disminuye su soldabilidad.

Los niveles máximos de carbono equivalente que se pueden permitir en un acero al carbono varían en función del grado, el espesor de la placa y el tratamiento térmico post soldadura.

La figura 41 muestra el efecto que tiene el carbono y los elementos de aleación que conforman la fórmula del carbono equivalente comúnmente utilizada para la construcción de recipientes a presión sobre la resistencia máxima a la tensión del acero al carbono A-516.

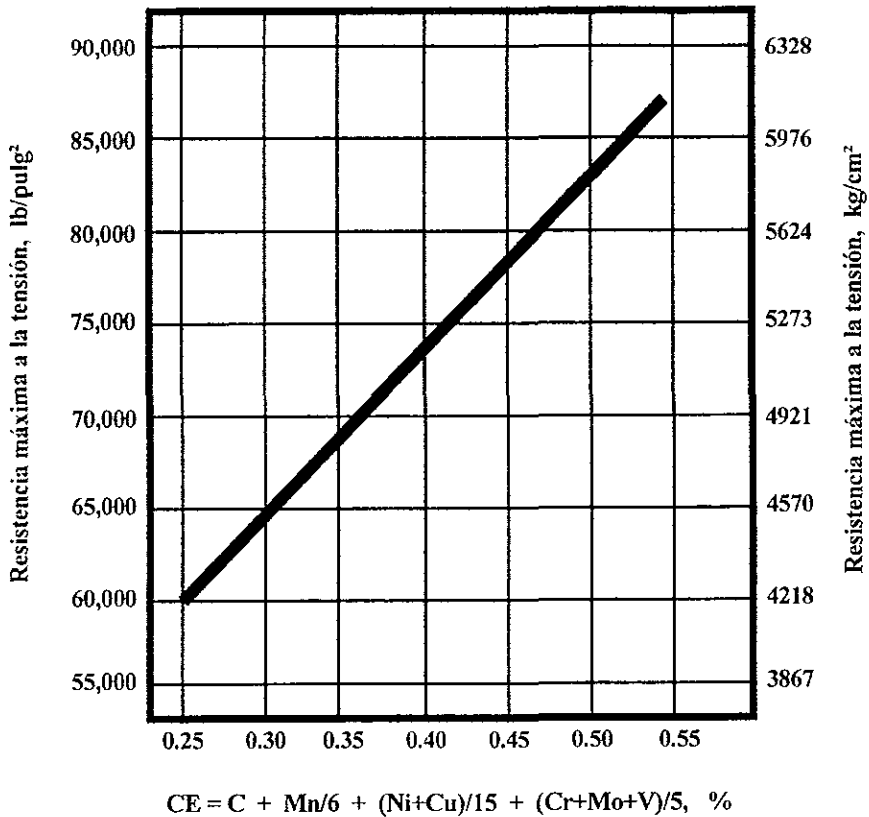


Figura 41.-Efecto que produce el valor del carbono equivalente sobre la resistencia máxima a la tensión del acero al carbono A-516 normalizado en espesores de 38.1 a 76.2 mm (1.5 a 3 pulg).

Como se puede observar en la figura, conforme aumenta el valor del carbono equivalente aumenta la resistencia máxima a la tensión del material. Desde el punto de vista del diseño mecánico de cambiadores de calor esta podría ser una excelente alternativa para la disminución de espesores lo cual se vería reflejado en menos costo pues se necesitaría menor cantidad de material. Sin embargo, el principal problema en el incremento del valor del carbono equivalente es que aumenta el contenido de carbono lo cual produce la formación de una microestructura poco dúctil, difícil de soldar y susceptible al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC). Además, de acuerdo a pruebas metalúrgicas realizadas a diversas muestras, se ha observado que con contenidos menores a 0.20 % de carbono se logra obtener la resistencia mínima establecida por el código ASME Sección VIII, División II para este material.

La figura 42 muestra los niveles máximos de carbono equivalente que se pueden obtener en función del espesor de la placa para los diferentes grados de acero al carbono A-516 manteniendo los requerimientos mínimos de resistencia.

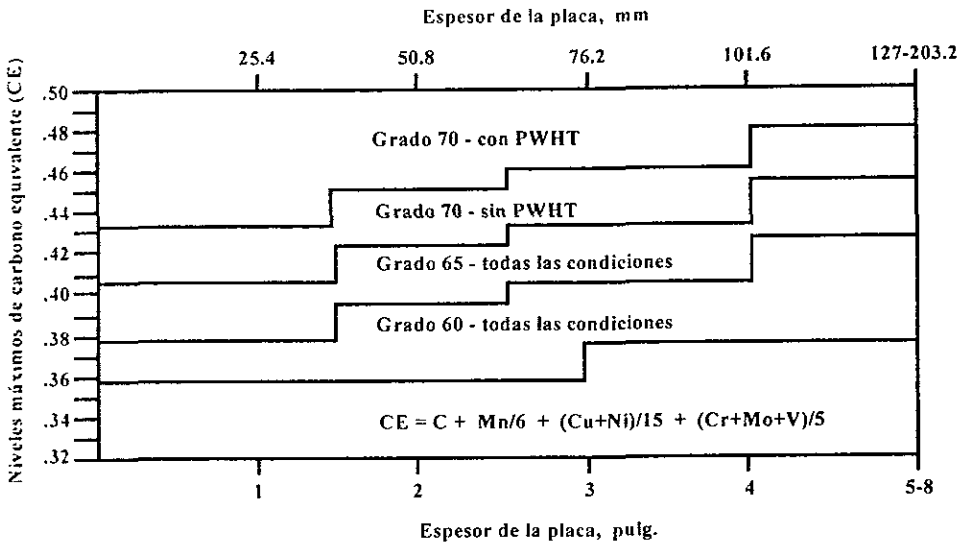


Figura 42.- Niveles máximos de carbono equivalente para los diferentes grados de acero al carbono A-516 manteniendo los requerimientos mínimos de resistencia.

En esta figura se puede observar que manteniendo el carbono equivalente a un valor de aproximadamente 0.37 % para espesores de placa de hasta 203.2 mm (8 pulg) se obtiene el valor mínimo de resistencia requerido sin la necesidad de aplicar tratamiento térmico post soldadura. Incrementando el valor del carbono equivalente para los diferentes grados de este material se incrementa la necesidad de un tratamiento térmico post soldadura para mantener los requerimientos mínimos de resistencia lo cual incrementa el costo del material y si este es muy severo, podría afectar la ductilidad del material.

El valor del carbono equivalente puede ser también controlado mediante la aplicación de procesos especiales de fundición.

La figura 43 muestra los excelentes resultados que puede proporcionar un proceso especial de fundición, ya que en función del espesor de la placa, ayuda a disminuir el contenido de carbono y por consiguiente el valor del carbono equivalente con lo cual se mantiene la resistencia requerida, se disminuye la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) y se

mejora la soldabilidad del material. Sin embargo, este tipo de proceso genera un costo adicional en el material por lo que se recomienda evitar su utilización mediante la aplicación de la fórmula del carbono equivalente para controlar la composición química del material así como el contenido de carbono.

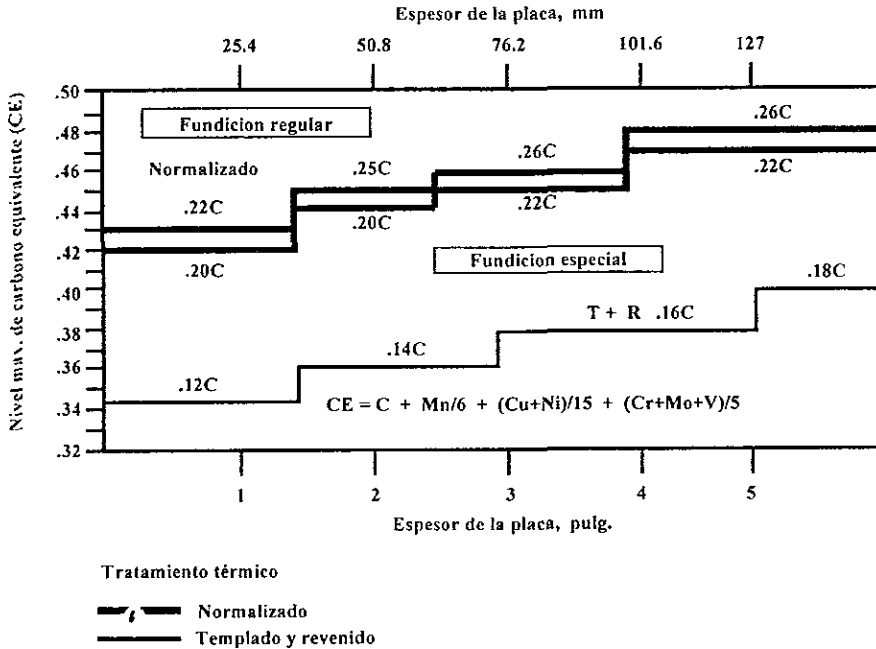


Figura 43.- Niveles máximos de carbono y carbono equivalente (CE) obtenidos mediante procesos especiales de fundición y/o tratamientos térmicos (normalizado, templado y revenido) para un acero al carbono A-516 grado 70.

4.4.5 Soldabilidad.

Para aceros al carbono, el contenido de carbono y manganeso determina la templabilidad del acero bajo ciertas condiciones de calentamiento y enfriamiento durante el proceso de soldadura, ya que los aceros con alto contenido de carbono y manganeso necesitan tratamiento de precalentamiento y/o post calentamiento para poder ser soldados satisfactoriamente. Por lo que en algunas ocasiones se llega a utilizar otra fórmula del carbono equivalente la cual únicamente considera al carbono, manganeso y silicio para controlar, y en la mayoría de los casos mejorar la

soldabilidad del acero:

$$CE = C + \frac{Mn}{4} + \frac{Si}{4}$$

Sin embargo, no solo el valor del carbono equivalente determina la soldabilidad del material, el espesor de la sección que va a ser soldada también juega un papel importante dentro de los factores a considerar para determinar las características de esta propiedad debido a la relación que tiene con la velocidad de enfriamiento y calentamiento durante el proceso de soldadura.

La figura 44 muestra el efecto que tiene el espesor de la sección que va a ser soldada y el valor del carbono equivalente (calculado mediante esta última fórmula) sobre la soldabilidad de los aceros al carbono en términos de los resultados de una prueba de doblado.

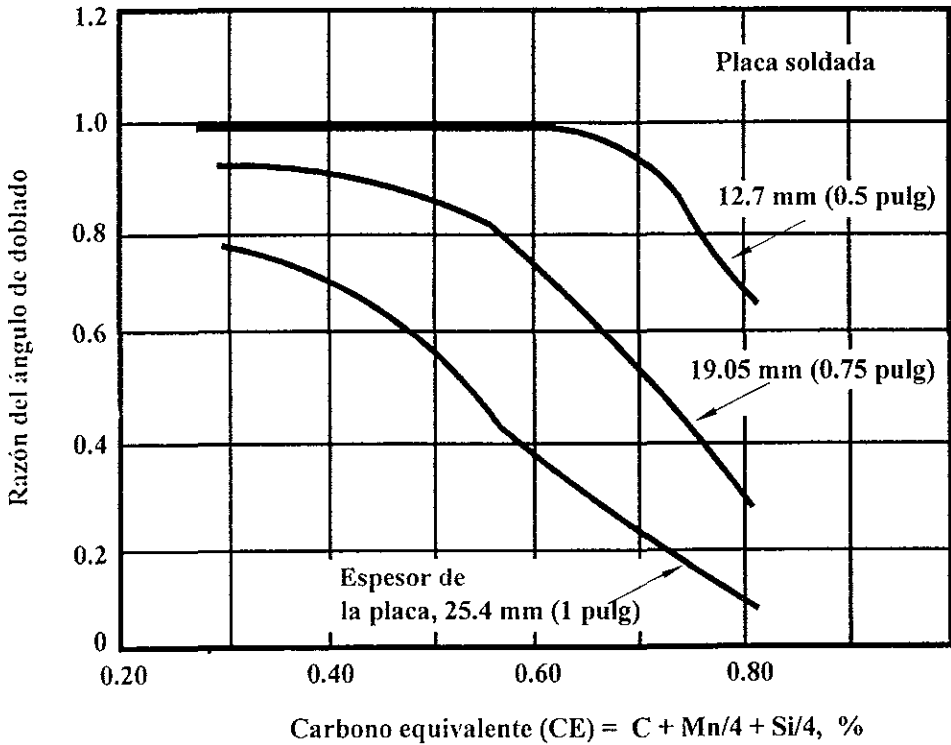


Figura 44.- Efecto del valor del carbono equivalente y espesor de la placa sobre la soldabilidad de los aceros al carbono expresado en términos de los resultados de una prueba de doblado.

Esta prueba está basada en la razón del ángulo de doblado de la sección soldada con respecto a la sección no soldada para placas de acero al carbono normalizadas. Un valor alto de la razón del ángulo de doblado indica que el acero posee buena soldabilidad. Así mismo, se puede observar que conforme aumenta el espesor de la placa y el valor del carbono equivalente disminuye la razón del ángulo de doblado y por consiguiente la soldabilidad del acero.

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los principales problemas de los aceros con alto contenido de carbono es el agrietamiento inducido por hidrógeno principalmente en la zona afectada por calentamiento. Ya que por ejemplo, los aceros de bajo carbono, al carbono manganeso y aceros de baja aleación con punto de fluencia por encima de 6118 kg/cm^2 (87022 lb/pulg^2) generalmente son susceptibles a este tipo de falla debido a que el contenido de carbono no es controlado lo suficiente como para evitar que aumente la templabilidad del material y la formación de martensita lo cual disminuye su soldabilidad e incrementa la susceptibilidad al agrietamiento debido a que la microestructura que se forma es bastante dura y frágil. Este factor aunado con el espesor de la sección que va a ser soldada y el flujo de calor transmitido durante la soldadura son determinantes en la aplicación de tratamientos de precalentamiento y/o post calentamiento para evitar el agrietamiento inducido por hidrógeno en este tipo de aceros. La principal desventaja de la aplicación de estos tratamientos es el incremento en el costo del material.

El espesor de la sección que va a ser soldada generalmente se conoce como espesor combinado. Este espesor es el espesor total de las placas que van a ser unidas o soldadas y es un factor que determina la magnitud del calor conducido a través de la soldadura. Generalmente, si el espesor combinado es mayor a 50 mm (2 pulg), se incrementa el riesgo de agrietamiento en la zona afectada por calentamiento.

La figura 45 muestra algunos ejemplos del cálculo del espesor combinado.

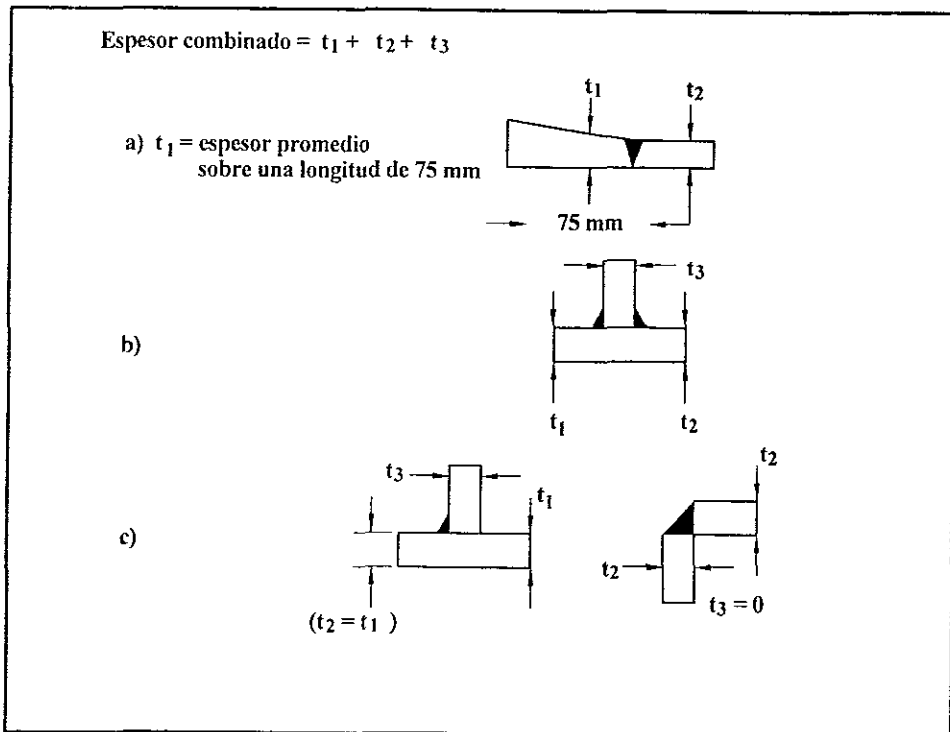


Figura 45.- Cálculo del espesor combinado.

4.4.5.1 Soldabilidad de los aceros de bajo carbono.

Estos aceros tienen la siguiente composición química:

Carbono (C): no más de 0.25 %

Manganeso (Mn): no más de 1.0 %

Silicio (Si): no más de 0.5 %

Estos aceros son generalmente los que poseen mejor soldabilidad de todos los aceros al carbono debido a que poseen baja templeabilidad pues su contenido de carbono es bajo. Con un valor de carbono equivalente (CE) menor a 0.30 % y espesor combinado menor a 70 mm (2 ¾ pulg) no se necesita aplicar tratamiento de precalentamiento ni post calentamiento o alguna técnica especial para poder ser soldados satisfactoriamente.

Las soldaduras verticales se pueden llevar a cabo exitosamente con un flujo de calor de aproximadamente 1.3 kJ/mm sobre cualquier espesor y con un valor de carbono equivalente de 0.32 %. Las soldaduras horizontales se deben realizar con un flujo de calor de 1.8 kJ/mm y con un valor de CE de 0.34 %.

Para espesores mayores a 70 mm (2 ¾ pulg) y CE menor a 0.30 %, se requiere tratamiento de precalentamiento para evitar agrietamiento en la zona de calentamiento.

Para conservar la buena soldabilidad de estos aceros, el valor del CE no debe exceder el 0.38 % para espesores menores a 70 mm. Sin embargo, cuando los espesores sobrepasan los 100 mm (4 pulg) se pueden encontrar valores de CE mayores a 0.38% debido al alto contenido de carbono y manganeso en el acero.

4.4.5.2 Soldabilidad de los aceros al carbono-manganeso.

Estos aceros tienen la siguiente composición química:

Carbono (C). de 0.25 a 0.50 %

Manganeso (Mn): de 1.0 a 1.7 %

Silicio (Si): no mayor a 0.7 %

Niobio (Nb) o vanadio (V): no mayor a 0.1 %

La templabilidad de estos aceros es mayor que la de los aceros de bajo carbono debido a que poseen relativamente mayor contenido de carbono por lo que se incrementa la formación de martensita en la microestructura del material. Debido a la alta dureza de la martensita, en algunas ocasiones se tiene la necesidad de aplicar tratamiento de precalentamiento y/o post calentamiento para mejorar la soldabilidad del material y eliminar el agrietamiento inducido por hidrógeno. Sin embargo, para espesores delgados aproximadamente menores a 50 mm (2 pulg) y flujo de calor aproximadamente menor a 1 kJ/mm no se necesita tratamiento de precalentamiento para soldar el material satisfactoriamente.

La tabla 44 muestra los niveles de carbono equivalente, espesor combinado y flujo de calor permisibles en este tipo de aceros para soldar satisfactoriamente al material sin la necesidad de tratamiento de precalentamiento.

Tabla 44.- Niveles de carbono equivalente (CE) permisibles para soldar satisfactoriamente aceros al carbono-manganeso en función del espesor combinado, flujo de calor y nivel de hidrógeno sin la necesidad de tratamiento de precalentamiento.

Espesor combinado mm	Flujo de calor mínimo kJ/mm	Carbono equivalente (CE) %	Nivel de hidrógeno (ml/100 g de material depositado)
41.5	0.6	0.32	≤ 15, >10
		0.35	≤ 10, >5
		0.43	≤ 5
30.0	0.6	0.33	>15
		0.38	≤ 15, >10
		0.41	≤ 10, >5
		0.46	≤ 5
22.85	0.6	0.38	>15
		0.41	≤ 15, >10
		0.43	≤ 10, >5
		0.48	≤ 5
20.0	0.6	0.41	>15
		0.43	≤ 15, >10
		0.45	≤ 10, >5
		0.50	≤ 5
16.0	0.6	0.43	>15
		0.45	≤ 15, >10
		0.47	≤ 10, >5
		0.53	≤ 5
12.85	0.6	0.45	>15
		0.47	≤ 15, >10
		0.49	≤ 10, >5
		0.55	≤ 5

Nota: Los valores del carbono equivalente fueron calculados mediante la formula:

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

En esta tabla se puede observar claramente que los valores del carbono equivalente (CE) permisibles para soldar satisfactoriamente al material sin la necesidad de precalentamiento están en función del espesor combinado y por lo tanto dependen del espesor de la placa ya que conforme disminuye este espesor, aumentan los valores permisibles del carbono equivalente.

Por lo que se puede asumir que las placas cuyos espesores no excedan los 50 mm (2 pulg) pueden ser soldadas satisfactoriamente sin la necesidad de un control estricto en el contenido de carbono y elementos de aleación, eliminando la necesidad de la aplicación de un tratamiento de precalentamiento y evitando el agrietamiento en la zona afectada por calentamiento.

CAPITULO 5. APLICACIONES.

5.1 Aplicaciones de aceros aluminizados.

Los aceros aluminizados se han utilizado exitosamente en ambientes altamente corrosivos y oxidantes, principalmente en ambientes ricos en azufre (H_2S y H_2SO_4), a temperaturas elevadas las que en algunas aplicaciones llegan a ser del orden de $1150\text{ }^\circ\text{C}$.

Tambi3n han tenido aplicaciones exitosas en la industria automotriz, pues la fabricaci3n de piezas de acero aluminizado tales como: v3lvulas de admisi3n y escape, entre otros elementos de los motores de combusti3n interna as3 como los tubos para escape de gases, han reducido los costos de algunos autom3viles ya que se evita la utilizaci3n de materiales m3s costosos tales como los aceros inoxidable debido a que los aluminizados proporcionan la resistencia necesaria a las altas temperaturas a las que operan estos componentes, incrementando en la mayor3a de los casos su tiempo de vida 3til y reduciendo el peso de los autom3viles.

Otras aplicaciones son: alambres para cerca, postes de luz, y ductos para drenaje Sin embargo, el prop3sito principal de esta tesis es la aplicaci3n de estos aceros en la industria petrolera principalmente en elementos de cambiadores de calor y recipientes a presi3n como los que se encuentran en las refiner3as de petr3leo y plantas petroqu3micas.

5.1.1 Tuber3a.

A la fecha, una de las principales aplicaciones de los aceros aluminizados en la industria petrolera ha sido en tuber3a para unidades de hidrodesulfurizaci3n debido a que son mucho m3s resistentes que los aceros inoxidable que normalmente se utilizan en este tipo de unidades pues en comparaci3n con estos 3ltimos, est3n libres de agrietamiento por corrosi3n bajo esfuerzos causado por el 3cido politi3nico que se genera durante el cierre de la planta.

La tabla 45 muestra las principales aplicaciones de los aceros aluminizados en unidades de hidrodesulfurizaci3n.

Tabla 45.- Aplicación de aceros aluminizados en unidades de hidrodesulfurización.

Aplicación	Condiciones ambientales					Período de aplicación años
	Temperatura		Presión		Concentración de H ₂ S (% volumen)	
	°C	°F	kg/cm ²	lb/pulg ²		
Tubería de unidad de desulfurización de naftas.	415.5 - 438	780 - 820	60 - 63	850 - 890	0.3 - 0.4	4
Tubería de unidad de desulfurización BTX.	438 - 460	820 - 860	45 - 48	640 - 680	3 - 6	4
Tubería de unidad de desulfurización VGO.	418 - 454	785 - 850	63 - 141	900 - 2000	0.3 - 6	6
Tubería de unidad de desulfurización de petróleo crudo.	443 - 454	830 - 850	155 - 178	2200 - 2530	7 - 8	6
Calentador para unidad de desulfurización de naftas.	418 - 443	785 - 830	55 - 58	785 - 830	aproximadamente 0.02	3

Nota: Los metales base son aceros al carbono y aceros de baja aleación.

5.1.1.1 Tubos calentadores.

Las condiciones ambientales en el interior de los tubos calentadores de las unidades de hidrodesulfurización son relativamente moderadas ya que las temperaturas alcanzadas son del orden de 415.5 a 443 °C (780 a 830 °F) y el contenido de H₂S y vapor de azufre es muy bajo. Debido a que estos elementos no están expuestos a una atmósfera muy corrosiva, es suficiente la utilización de aceros al cromo-molibdeno (1.25Cr-0.5Mo). Sin embargo, en algunos calentadores en donde se utilizó este material, el porcentaje de corrosión fue de 20-30 mpy por lo que tuvieron que ser reemplazados en un periodo de aproximadamente 6 años. Además, los tubos mostraron escamamiento y se tenía la necesidad de cierres frecuentes para la limpieza del reactor pues presentaba ensuciamiento constante en la corriente abajo.

Este problema se ha solucionado con la utilización de tubos de acero al cromo-molibdeno (2.25Cr-1Mo) aluminizados, ya que se ha detectado que la velocidad de corrosión en este material se ha reducido hasta 1 mpy; y en aproximadamente tres años de servicio, los tubos han permanecido perfectamente limpios y libres de escamas. Los costos de mantenimiento debido a operaciones periódicas de limpieza se han eliminado. Además, la producción se ha incrementado pues los periodos entre limpiezas son más largos debido a que se ha reducido el ensuciamiento en el reactor.

Los aceros aluminizados mantienen un valor de transferencia de calor elevado durante todo el tiempo de vida útil del metal base. Por lo tanto, se reducen los costos del equipo pues el flujo de calor de entrada requerido es muy bajo.

En la figura 46 se muestran los tubos calentadores que se utilizan en las unidades hidrodesulfuradoras.



Figura 46.- Tubos calentadores utilizados en las unidades hidrodesulfuradoras.

5.1.1.2 Tubos de transferencia de cambiadores de calor.

Actualmente las plantas de ácido sulfúrico de los Estados Unidos de Norteamérica, Canadá, Europa, Asia y Sudamérica han diseñado nuevos cambiadores de calor cuyos tubos de transferencia han sido fabricados de acero aluminizado e inclusive los equipos ya existentes han sido rediseñados utilizando tubos de transferencia de acero aluminizado. Estas plantas han optado por utilizar tubos de transferencia de este tipo de material debido a que son *completamente resistentes al ataque por gases calientes de SO₂*, además de que están libres de la formación de escamas. incrementan la transferencia de calor, disminuyen la caída de presión, se eleva la conductividad térmica y por consiguiente aumenta la producción de ácido en sus plantas. Generalmente los tubos de transferencia convencionales que se utilizan en los cambiadores de calor que manejan gas por ambos lados (lado envolvente y lado tubos), sufren formación de escamas aproximadamente al tercer o cuarto año de servicio. significando con esto el comienzo de los cierres frecuentes de la planta para el mantenimiento, inspección y detección de posibles

fugas, así como la eliminación de escamas de los tubos de transferencia. Esto no pasa con los tubos de acero aluminizado pues estos ofrecen de cuatro a cinco veces más la vida útil del elemento comparados con los tubos de acero normales. Ya que por ejemplo, los cambiadores de calor con tubos de transferencia de acero aluminizado que actualmente operan en las plantas antes mencionadas han estado en servicio durante *aproximadamente 20 años* y aún permanecen completamente libres de escamas y corrosión.

5.1.1.3 Tubería para hornos retardadores de coke.

La coquización retardada es un proceso térmico que se utiliza en las refinerías de petróleo para convertir los residuos o fondos de petróleo crudo en productos líquidos como la gasolina, el diesel y otros productos más ligeros. Generalmente se utilizan tubos de acero al cromo-molibdeno (9Cr-1Mo) los cuales, debido a las altas temperaturas que alcanzan los gases de combustión del proceso (aproximadamente 621 °C y en algunos casos hasta mayores) están expuestos a oxidación en su superficie externa y a carburización en su superficie interna por lo que se tiene la necesidad de darles mantenimiento *aproximadamente cada tres o seis meses*.

Utilizando tubos de acero al cromo-molibdeno (9Cr-1Mo) aluminizados en este tipo de equipos se mejora la resistencia a la oxidación y a la carburización prolongando el tiempo de vida útil de los tubos *aproximadamente tres veces más* de lo que normalmente durarían los aceros sin aluminizar. Además, tan solo necesitan mantenimiento cada 18 a 24 meses por lo que se reducen los costos por mantenimiento.

La tabla 46 muestra la diferencia en resistencia al ataque por H₂S de los tubos de acero al cromo-molibdeno (9Cr-1Mo) y los tubos de acero al cromo-molibdeno (9Cr-1Mo) aluminizados. En esta tabla se puede observar que los tubos de acero aluminizado son más resistentes a este ataque y conforme aumenta la temperatura, disminuye la pérdida de peso, es decir, son más resistentes a la corrosión a elevadas temperaturas.

Tabla 46.- Resistencia al ataque por H₂S. Pérdida de peso de los tubos de acero (9Cr-1Mo) aluminizados comparados con los tubos de acero (9Cr-1Mo) sin aluminizar.

Temperatura		Pérdida de peso		Proporción
°C	°F	Tubos de acero (9Cr-1Mo)	Tubos de acero (9Cr-1Mo) aluminizados	
371	700	0.7673	0.0213	36:1
482	900	2.3658	0.0152	156:1

5.1.2 Pernos de alta resistencia.

Los pernos utilizados en cambiadores de calor que operan en ambientes ricos en azufre a elevadas temperaturas deben ser lo suficientemente resistentes a la corrosión producida por este ambiente pues las temperaturas manejadas son del orden de 371 a 410 °C (700 a 770 °F). Los pernos que generalmente se utilizan en estos equipos están fabricados de acero ASTM A 193 B6 (13Cr) o B8 (18Cr-8Ni) los cuales poseen buena resistencia a este tipo de ambientes. Sin embargo, el esfuerzo permisible de estos materiales es muy bajo en el rango de 93 a 454 °C (200 a 850 °F) lo que hace que el diámetro de los pernos aumente y se incremente el tamaño del equipo.

Utilizando pernos de acero alta resistencia aluminizados se reduce el diámetro de los pernos internos en un 20 % comparado con los pernos de acero B8T (18Cr-10Ni-Ti) lo que permite el desarrollo de diseños más compactos, es decir, se puede reducir el tamaño de los equipos.

5.1.3 Válvulas.

Durante los últimos años se han venido utilizando válvulas de acero aluminizado principalmente en ambientes ricos en azufre a elevadas temperaturas con el fin de mejorar la resistencia a la corrosión de estos elementos bajo este tipo de ambientes.

Se han instalado con éxito válvulas de compuerta de 406 mm (16 pulg) y mayores, así como válvulas de globo de hasta 152 mm (6 pulg) en servicios cuyas presiones alcanzan los 105 kg/cm² (1500 lb/pulg²) ambas fabricadas de acero aluminizado, y se han obtenido buenos resultados pues disminuye el porcentaje de corrosión considerablemente además de que no requieren limpieza de neutralización durante el cierre de la planta.

5.2 Aplicaciones de aceros microaleados.

Los aceros microaleados se han usado en una gran variedad de aplicaciones. La principal ventaja de esta clase de aceros es que sus propiedades se pueden ajustar a las necesidades del cliente. Por ejemplo, un bajo contenido de carbono y buen control del carbono equivalente, mejoran substancialmente la soldabilidad y tenacidad, esto se debe al tamaño de grano.

Se deben considerar varios aspectos en la selección de este tipo de aceros y no sólo en el costo, ya que este es más elevado que el de un acero al carbono convencional. Sin embargo, pueden competir con otras aleaciones donde las condiciones permitan:

- Reducir el peso del equipo
- Realizar nuevos diseños obteniendo mejor eficiencia
- Reducir los costos de fabricación

- Reducir el costo del transporte debido a la reducción en el peso del equipo

Las ventajas anteriores se pueden presentar por separado o en conjunto, todo se puede resumir a la reducción en el peso del material, lo que hace que el equipo sea menos costoso y más fácil de transportar además de tener otras ventajas como la soldabilidad y formabilidad, la cual requiere menos pasos que la que requiere el acero al carbono convencional. Sin embargo, en ciertas aplicaciones se puede justificar el uso de este material únicamente por el costo.

Otro beneficio adicional es la reducción de las operaciones de fabricación. Por ejemplo, se pueden obtener forjas de alta resistencia sin que sea necesario un tratamiento térmico posterior.

Otros factores que deben considerarse en la selección de estos aceros son:

Formabilidad. Las limitaciones de estos aceros, se pueden compensar con el rediseño de la pieza y algunas modificaciones mínimas durante el procedimiento de fabricación.

Tenacidad. La microaleación en conjunto con el rolado controlado proporciona mejor tenacidad que un acero rolado en caliente.

Resistencia a la fatiga. Es adecuada excepto, posiblemente, en el caso de las uniones soldadas.

Soldabilidad. No se le considera como un obstáculo para su uso.

Maquinabilidad. Es similar, y en algunos casos superior a la de los aceros al carbono templados y revenidos.

Resistencia a la corrosión. Dependiendo del servicio, presentan de 4 a 8 veces mayor resistencia que los aceros al carbono.

Resistencia al agrietamiento inducido por hidrógeno y a la corrosión bajo esfuerzos. Se han desarrollado grados para ductos y recipientes a presión los cuales cuentan con mejor resistencia al ataque por H_2S .

Un uso frecuente de los aceros microaleados es en ductos para el transporte de gas y petróleo que se encuentran en ambientes a muy bajas temperaturas, particularmente en el círculo ártico. El desarrollo de ductos de alta resistencia ha permitido el uso de este material para presiones superiores a los 112 kg/cm^2 (1600 lb/pulg^2). Además de contar con un punto de fluencia superior a los 4925 kg/cm^2 ($70 \times 10^3 \text{ lb/pulg}^2$) y de fabricarse con espesores mayores a 25.4 mm (1 pulg), cumple también con factores indispensables para este servicio como son: la soldabilidad, tenacidad y resistencia al ataque del gas amargo.

La técnica más utilizada para prevenir el agrietamiento en este tipo de servicio, es reducir el contenido de azufre hasta un porcentaje en peso de 0.002, lo que reduce el riesgo de reacciones con el gas amargo y petróleo.

Otra aplicación de los aceros microaleados se da en plataformas de extracción costa fuera. Las características esenciales que debe poseer este material son:

- Un punto de fluencia en el rango de 3570 a 4232 kg/cm² (50 a 60 X 10³ lb/pulg²)
- Deben tener buena soldabilidad
- Una composición que elimine la necesidad del precalentamiento para la soldadura
- Elevada tenacidad en las zonas aledañas a la soldadura
- Buena tenacidad a las temperaturas de diseño

Algunas de las características anteriores se han logrado a base de reducir durante su fabricación, las impurezas tales como: azufre, nitrógeno y fósforo. Sin embargo, el mayor reto se ha presentado en mantener bajo el carbono equivalente sin que esto afecte la resistencia del acero. La adición de los elementos de microaleación como el niobio ha hecho posible la reducción del contenido de carbono, el cual puede reducirse aún más cuando se usa una velocidad de enfriamiento elevada.

5.3 Aplicaciones de aceros inoxidables dúplex.

Los aceros inoxidables dúplex, se han aplicado en cambiadores de calor para una amplia gama de servicios, entre las que destacan los servicios con ácidos y cloruros.

Un aspecto sobresaliente de estos aceros es que poseen buena resistencia a la corrosión por picaduras en ambientes ricos en cloruros, este tipo de servicio se encuentra con frecuencia en plantas de proceso, especialmente cuando éstas se localizan cerca del mar y se utiliza el agua de mar como medio de enfriamiento.

Se ha observado que los aceros inoxidables austeníticos son sensibles a la corrosión bajo esfuerzos (SCC) en ambientes ricos en cloruros, a temperaturas superiores a los 60 °C. Esto limita el uso de estos aceros en la construcción de cambiadores de calor que se utilizan en la industria de proceso, ya que estos trabajan a mayores temperaturas. Por el contrario, los aceros dúplex poseen una buena resistencia a la SCC, en servicios con cloruros. Esto se debe a que teóricamente, la ferrita actúa como cátodo protegiendo de esta manera a la austenita la cual no sufre fractura.

En la figura 47, se muestran los resultados obtenidos al sumergir en una solución con cloruros, aceros de diferentes tipos. Por arriba de la línea punteada los materiales sufren corrosión bajo esfuerzos. Estos resultados, se apegan bastante a la realidad, pues el contenido de cloruro que se muestra en la gráfica y el agua de enfriamiento que manejan con frecuencia los cambiadores de calor, suelen ser iguales. Al mismo tiempo, los niveles de esfuerzos que se aplican a las probetas en el laboratorio coinciden con los esfuerzos residuales, debidos a la soldadura, al trabajo en frío, etc

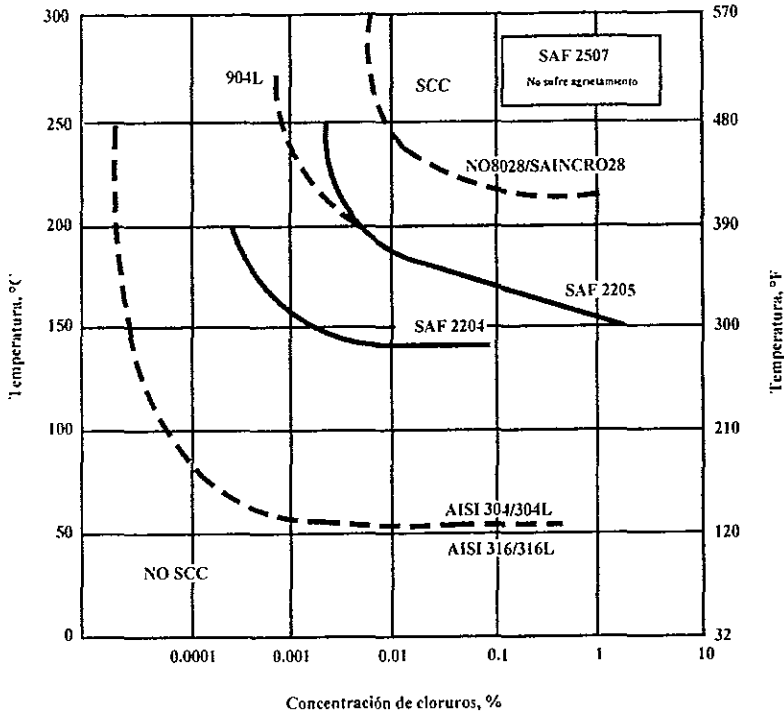


Figura 47.- Resistencia a la corrosión bajo esfuerzos de los aceros dúplex SAF 2507, 2205 Y 2304 en soluciones con contenido de cloruros.

Dentro de la gama de sustancias que puede manejar este tipo de aceros se encuentra el ácido sulfúrico. Como se puede observar en la figura 48, la resistencia del acero inoxidable dúplex en este ambiente es superior a la de los aceros usados convencionalmente. En la figura 49 se puede observar la resistencia a la corrosión del acero SAF 2507 en ácido sulfúrico en combinación con cloruros. por ejemplo NaCl, haciendo de esta sustancia un agente altamente corrosivo. Las gráficas de isocorrosión muestran una velocidad de desgaste de 0.1 mm/año.

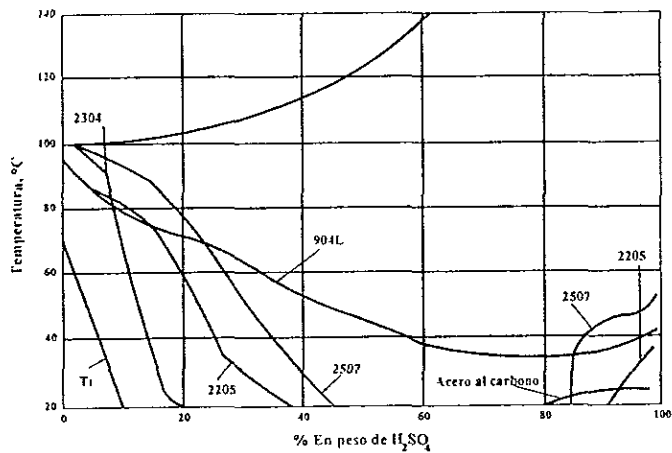


Figura 48.- Curvas de isocorrosión de los aceros inoxidables dúplex en ácido sulfúrico.

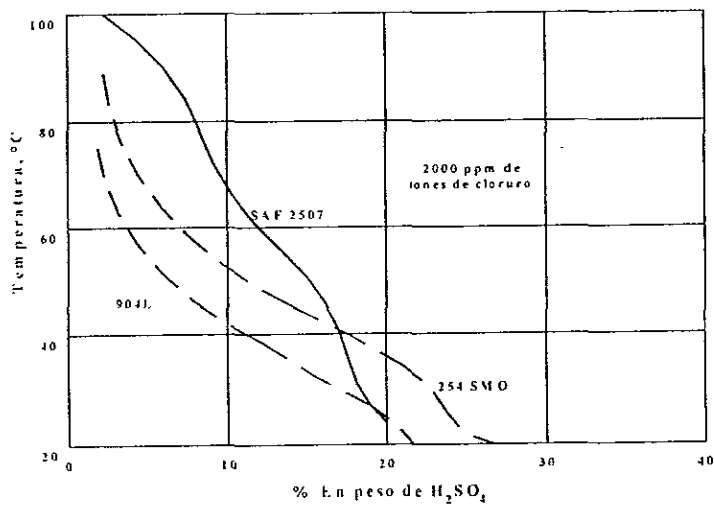


Figura 49.- Curvas de isocorrosión del acero SAF 2507 en ácido sulfúrico diluido, en combinación con cloruros.

Otra clase de ácidos que pueden manejar los aceros inoxidable dúplex son los ácidos orgánicos como el ácido fórmico y el acético. Estos últimos han tenido recientemente un uso frecuente en la industria química y se caracterizan por su extremada corrosividad. En la figura 50, se representa el comportamiento de estos aceros en ácido fórmico, a varias concentraciones.

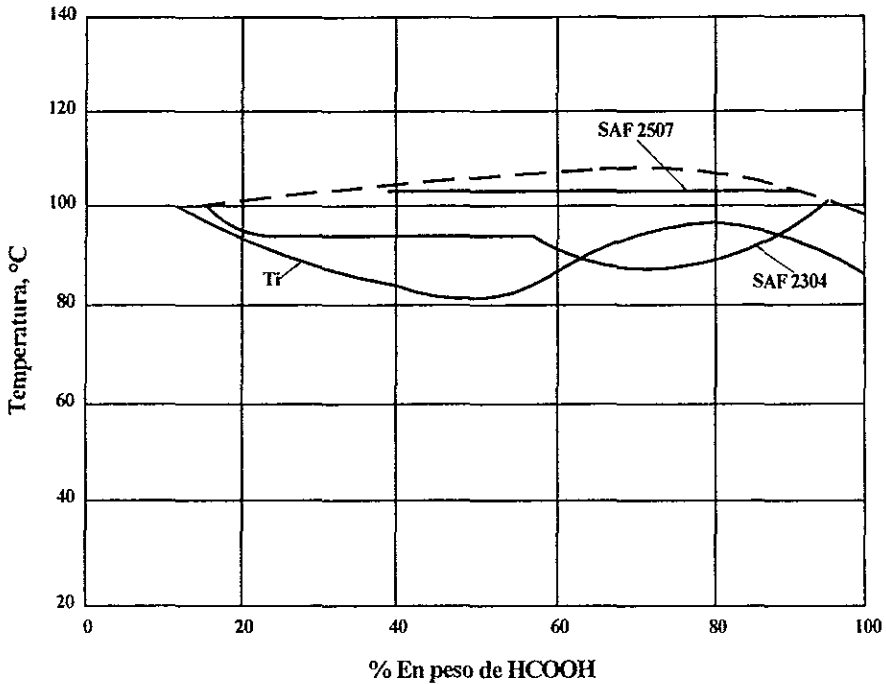


Figura 50.- Curvas de isocorrosión para aceros dúplex SAF 2304, 2507 y titanio en ácido fórmico a diferentes concentraciones.

En la figura 51, se presenta la velocidad de desgaste de varias aleaciones en ácido fórmico en combinación con ácido acético.

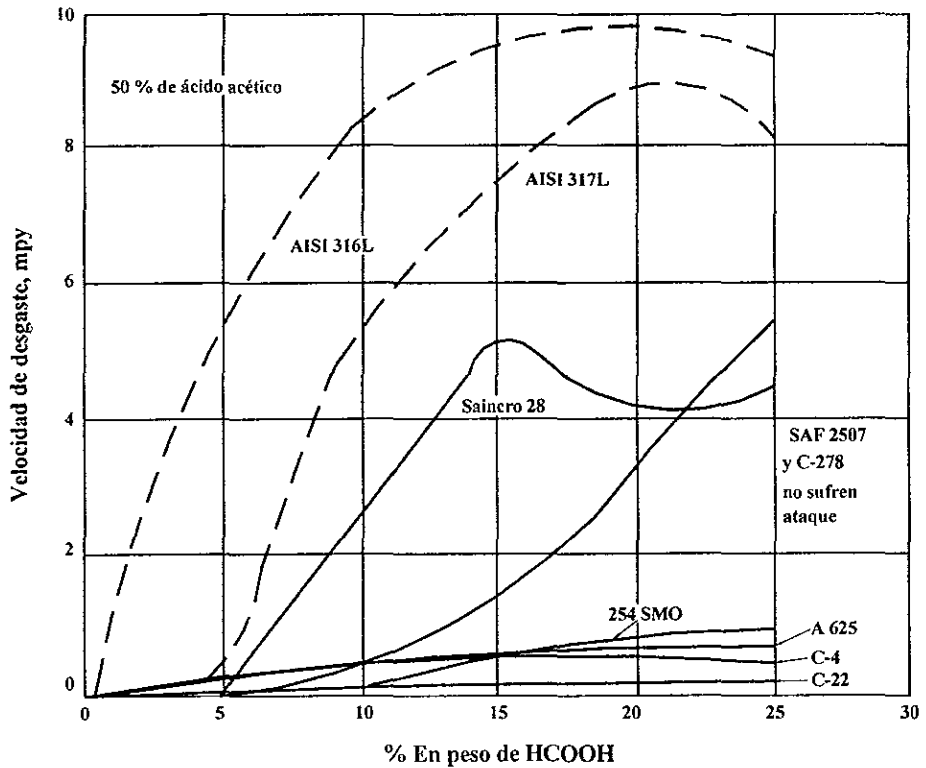


Figura 51.- Velocidad de desgaste de varias aleaciones a diferentes concentraciones de ácido fórmico en combinación con 50% de ácido acético hirviendo.

La siguiente figura, muestra el comportamiento del acero inoxidable dúplex SAF 2304 en ácido nítrico. Para este tipo de sustancia no es recomendable el uso de los otros tipos de aceros dúplex, esto se debe al contenido de molibdeno. Por lo que no se aconseja su uso en cambiadores de calor que manejen ácido nítrico y agua de mar como medio de enfriamiento.

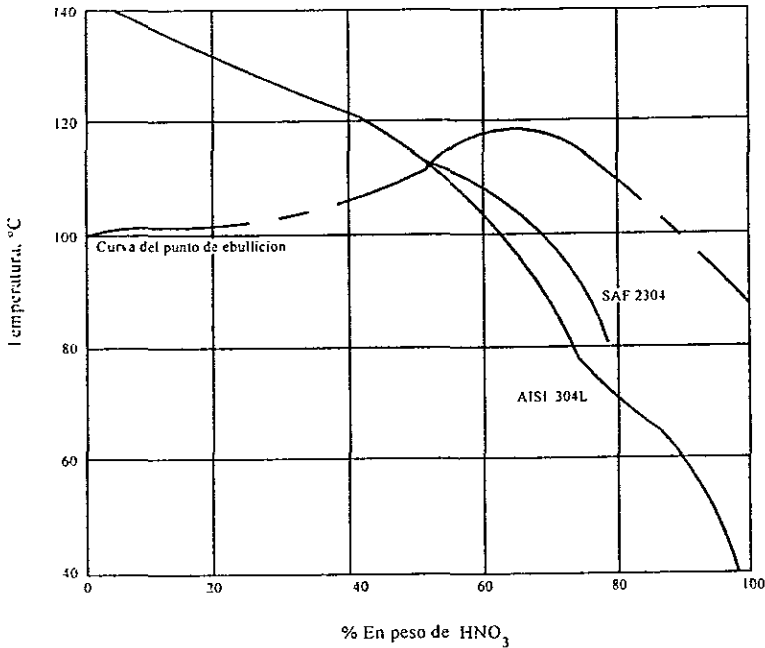


Figura 52.- Diagrama de isocorrosión de un acero inoxidable dúplex SAF 2304 y un acero AISI 304L, en ácido nítrico. Las curvas representan una velocidad de corrosión de 0.1 mm/año.

SAF 2304.

Debido a su microestructura, este acero posee excelentes propiedades mecánicas y físicas, excelente resistencia a la corrosión por concentración de esfuerzos y otros tipos de corrosión al igual que una buena soldabilidad. Estas propiedades hacen al SAF 2304 una excelente alternativa para su uso en lugar de los aceros austeníticos AISI 304, 304L, 316 y 316L. En la tabla 47 se listan las aplicaciones para este tipo de acero así como las ventajas que ofrece en comparación con otros materiales.

Tabla 47.- Aplicaciones del acero dúplex SAF 2304 en diversas industrias.

Industria	Aplicaciones	Aleación comúnmente utilizada	Ventajas del SAF 2304
Proceso	Cambiadores de calor y tubería en donde se encuentran presentes altas concentraciones de cloruros.	AISI 304 / 304L AISI 316 / 316L	Resistencia superior a la SCC
	Tubería para instrumentación y rastreo de vapor.	AISI 304 / 304L AISI 316 / 316L	Resistencia superior a la SCC
Petroquímica	Reactores tubulares en los cuales se utiliza acero al carbono en la envolvente.	AISI 304 / 304L AISI 316 / 316L	Coefficiente de expansión térmica similar al del acero al carbono.
Gas y petróleo	Enfriadores, tuberías y líneas de flujo dentro y costa fuera.	Aceros al carbono. AISI 304 / 304L AISI 316 / 316L AISI 420	Excelente combinación de resistencia, soldabilidad, resistencia a la corrosión y costo.
	Sistemas de tensión de equipos costa fuera y tubería para instrumentación.	AISI 304 / 304L AISI 316 / 316L ACEROS AL C.	Elevada resistencia mecánica y a la corrosión.

SAF 2205.

Es un material recomendable para ambientes con altas concentraciones de cloruros. Una aplicación típica de este material es en cambiadores de calor que manejan agua de enfriamiento. También puede utilizarse para el manejo de ácido sulfúrico diluido, ácido acético y diversas mezclas.

Tabla 48.- Aplicaciones del acero inoxidable dúplex SAF 2205.

Industria	Aplicaciones
Refinerías	Desalinizado de petróleo crudo, limpieza de gas amargo, tratamiento de aguas residuales y manejo de agua de enfriamiento.
Gas y petróleo	Sistemas de ductos y tuberías para producción.
Petroquímica	Producción de: cloruro de amonio, alcoholes EDC/VCM, ácidos orgánicos, fenoles, glicoles, etc.
Química	Sistemas de enfriamiento que utilizan agua salada, ácido sulfúrico diluido y otros ácidos reductores.

SAF 2507.

Se recomienda la utilización de este tipo de acero principalmente en ambientes con altas concentraciones de cloruros. Sus principales aplicaciones son:

Tabla 49.- Aplicaciones del acero inoxidable dúplex SAF 2507.

Industria	Aplicaciones
Gas y petróleo	En ambientes con contenido de cloruros, tales como: agua de mar, y fluidos de proceso, tubería de control para plataformas marinas.
Enfriadores con agua de mar	Haz de tubos para cambiadores de calor dentro de refinerías, industrias químicas, industrias de proceso y en todo tipo de industrias que usen agua de mar o con altas concentraciones de cloruros como medio de enfriamiento.
Evaporadores de sal	Tubería para evaporadores de sales corrosivas, por ejemplo: cloruros, sulfatos y carbonatos.
Plantas desalinizadoras	Recipientes a presión utilizados en unidades de ósmosis inversa, tubería utilizada para el transporte de agua marina, tubería en haces de cambiadores de calor.
Refinerías	Tuberías para el manejo de sustancias con un elevado contenido de cloruros o contaminadas por ácido clorhídrico.

Algunas investigaciones recientes efectuadas sobre aceros inoxidables dúplex SAF 2507, han demostrado que en el expansionado de los tubos, es decir, en la unión tubo-espejo, no se produce corrosión por picadura bajo la presencia de agua de mar a una temperatura de 35 °C, mientras que para uniones tubo-espejo soldadas, la temperatura a la cual no se presenta este tipo de corrosión es de 45 °C.

En otro experimento realizado a este tipo de acero, se encontró que su resistencia a la corrosión en un ambiente artificial a una temperatura de 20 °C, fue superior al de la aleación 254 SMO.

5.4 Aplicaciones de aceros con carbono controlado.

Las refinerías de petróleo utilizan el ácido fluorhídrico (HF) en un proceso llamado alquilación el cual es muy importante en la producción de gasolina de alta calidad. Este ácido es muy peligroso y corrosivo debido a las altas concentraciones de hidrógeno que genera. El principal daño que produce a los aceros –principalmente a los aceros al carbono y de baja aleación- es el agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC).

Se puede mejorar la resistencia a este ataque mediante el control del contenido de carbono y elementos de aleación de los aceros al carbono que normalmente se utilizan para la construcción de cambiadores de calor que operan en plantas de alquilación.

Phillips Petroleum Company es una de las principales licenciadoras del proceso de alquilación en los Estados Unidos de Norteamérica. Esta compañía recomienda que todas las partes de cambiadores de calor que operan en servicios de alquilación y que estén fabricadas de acero al carbono tengan un valor de carbono equivalente (C.E.) máximo de 0.40 % dependiendo del espesor de la placa, el cual debe ser calculado mediante la siguiente fórmula:

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

Además, el contenido de niobio (Cb) + vanadio (V) no debe exceder el 0.1 %. Así como el contenido de cromo (Cr) + níquel (Ni) + cobre (Cu) no debe exceder el 0.20 %.

Los cambiadores de calor que operan en servicios con ácido fluorhídrico (HF) deben cumplir con la especificación recomendada por Phillips Petroleum Company.

5.4.1 Cambiadores de calor de tubos y envolvente.

- 1) La envolvente, espejos y/o canal de los cambiadores de calor de tubos y envolvente que operan en servicios con HF deben ser fabricados de acero al carbono ASTM A-516. Las placas deben tener un valor de carbono equivalente (C.E.) máximo de 0.40%. Las placas de 13 mm (1/2 pulg) y espesores mayores deben cumplir con los siguientes requerimientos:
 - a) El contenido de azufre (S) debe ser limitado a un máximo de 0.005 % y tratado térmicamente para el control de su geometría.
 - b) Deben ser normalizados o templados y revenidos.
- 2) Los coples para venteo y drenado instalados en las boquillas de los cambiadores de calor deben ser mínimo de 19.05 mm (3/4 pulg) de acero forjado. Todos los coples deben tener un valor de carbono equivalente máximo de 0.40 %.
- 3) Cuando el ácido fluorhídrico (HF) esté presente sobre el lado envolvente, los materiales que van a ser soldados deben tener un valor de carbono equivalente máximo de 0.40 %.
- 4) Cuando el ácido fluorhídrico fluye por el lado envolvente, las boquillas y bridas de la envolvente deben ser fabricadas de acero al carbono ASTM A-105 normalizado o normalizado y revenido.

Para temperaturas de diseño menores a -29 °C (-20 °F), los cuellos de las boquillas deben ser fabricados de tubo sin costura ASTM A-333, Grados 1 o 6 y deben tener un valor de carbono equivalente máximo de 0.40 %.

5.4.2 Cambiadores de calor tipo doble tubo y multitubo.

- 1) Los tubos de los cambiadores de calor tipo doble tubo que operan en servicios con HF deben ser sin costura y fabricados de acero al carbono ASTM A-179 calibre 12 BWG o ASTM A-524 o ASTM A-106 Grado B.

Si el espesor del material ASTM A-106 Grado B es mayor a 9.5 mm (3/8 pulg), debe tener un valor de carbono equivalente máximo de 0.40 %.

- 2) La envolvente de los cambiadores de calor tipo multitubo en servicios con HF deben ser tubos sin costura de acero al carbono ASTM A-524 o ASTM A-106 Grado B.

Si el espesor del material ASTM A-106 Grado B es mayor a 9.5 mm (3/8 pulg), debe tener un valor de carbono equivalente máximo de 0.40 %.

CONCLUSIONES.

De acuerdo con la información recopilada en esta tesis sobre las tendencias de materiales de construcción en cambiadores de calor y en la experiencia obtenida durante la estancia en el Instituto Mexicano del Petróleo sobre el comportamiento de los materiales más utilizados en los diferentes servicios que se manejan en la industria petrolera, se pueden establecer las conclusiones siguientes:

1. Los aceros aluminizados se han utilizado exitosamente durante los últimos 30 años principalmente en la industria petrolera de los Estados Unidos de Norteamérica debido a su excelente resistencia a la corrosión, carburización, oxidación, penetración de hidrógeno (la cual en la mayoría de los casos conduce al agrietamiento inducido por hidrógeno), al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos y a la formación de escamas sobre la superficie del material principalmente en servicios ricos en azufre (H_2S y H_2SO_4) a elevadas temperaturas.
2. El aluminizado no mejora las propiedades mecánicas del metal base, su principal característica es la de incrementar la vida útil del material pues reduce su velocidad de desgaste. Conforme aumenta la temperatura del servicio, disminuye la velocidad de desgaste.
3. Los metales base que generalmente se utilizan son aceros al bajo carbono y aceros de baja aleación (cromo-molibdeno) pues comparados con los aceros inoxidable son menos costosos y resisten perfectamente las condiciones más críticas de servicio.
4. La temperatura mínima a la cual pueden ser utilizados los aceros aluminizados para prevenir los problemas de carburización, oxidación y sulfuración es de $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($450\text{ }^{\circ}\text{F}$), ya que en aplicaciones por debajo de esta temperatura, se pueden presentar problemas de celdas locales, reacciones anódicas o catódicas o algún otro problema de corrosión que generalmente ocurre en ambientes de fase líquida.
5. Los métodos comúnmente utilizados para el aluminizado son: la inmersión en caliente y la difusión ya que estos producen recubrimientos más uniformes y con mayor adherencia formando casi una aleación aluminio-acero en el caso del método de difusión.
6. La principal aplicación de los aceros aluminizados dentro de la industria petrolera es en tubos de transferencia de cambiadores de calor y en tubería en general, siendo los servicios ricos en azufre los principales en aplicación.

7. Los aceros microaleados cuentan con una resistencia mucho mayor que los aceros al carbono convencionales y por ello, se pueden fabricar piezas con menores espesores. Esto se debe a las características que le proporcionan los diferentes elementos de microaleación ya que compensan el bajo contenido de carbono lo que proporciona mejores propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión comparados con los aceros al carbono.
8. Una desventaja de estos aceros es que para alcanzar el nivel óptimo de propiedades, es necesario tener velocidades de enfriamiento elevadas, lo que hace necesario el uso de equipos especiales que elevan el costo.
9. Dentro de los diferentes tipos de aceros microaleados, se destacan por sus excelentes propiedades, los aceros al niobio-vanadio y los aceros al niobio-titanio. Aunque para alcanzar los niveles óptimos de propiedades, se tienen que aplicar procesos en los cuales se controla cuidadosamente las temperaturas así como la velocidad de enfriamiento, el cual es un factor que influye en las propiedades de los aceros microaleados.
10. Otra característica que poseen, es la buena soldabilidad, esto se debe al bajo contenido de carbono de estos aceros.
11. El uso que se le puede dar a estos aceros para la fabricación de cambiadores de calor, se basa principalmente en el aumento de sus propiedades mecánicas, lo cual implica una importante reducción en el espesor de los equipos que operan a presiones elevadas, otro servicio en el que se puede justificar su uso es en servicios a bajas temperaturas, en donde los aceros al carbono convencionales no resistirían. Esto se debe a la mejor tenacidad de los aceros microaleados comparada con los aceros al carbono.
12. Una de las ventajas que tienen los aceros inoxidables dúplex es su excelente resistencia a la corrosión bajo esfuerzos en servicios que manejan cloruros, esto puede tener una gran influencia en la selección del material de construcción de un cambiador de calor, ya que en nuestro país. la mayoría de los pozos de extracción se encuentran costa fuera lo que hace necesario el uso del agua de mar como medio de enfriamiento, a su vez, en las refinerías y petroquímicas, el uso del agua de río o presas es muy frecuente. Estos ambientes contienen una gran cantidad de impurezas y cloruros, por lo que el uso de los aceros inoxidables dúplex es una excelente alternativa en comparación con los aceros austeníticos convencionales para prevenir la corrosión por picaduras y de esta manera, alargar la vida útil de los equipos. Además, los aceros inoxidables dúplex cuentan también con una excelente resistencia a la corrosión en ácidos, excepto en ácido nítrico y esto es debido al contenido de molibdeno de estos aceros. pero presentan mejor resistencia a la mayoría de los ácidos comparados con los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos.

14. Otras características importantes de este tipo de aceros son las buenas propiedades mecánicas y físicas con las que cuentan. Dentro de las propiedades mecánicas se puede mencionar su elevado punto de fluencia, el cual suele ser el doble que el de los aceros austeníticos y significativamente mayor que el acero ferrítico. Lo anterior es de gran importancia ya que estos aceros pueden soportar presiones mayores con espesores más pequeños, lo cual trae consigo una reducción en el peso del equipo, haciendo que éste sea más fácil de transportar. Dentro de las propiedades físicas, cabe destacar su bajo coeficiente de expansión térmica que es un poco mayor que el de un acero al carbono pero menor al de un acero inoxidable austenítico, haciendo posible, por ejemplo, la construcción de la envolvente en acero al carbono y el haz de tubos en acero inoxidable dúplex. Una ventaja adicional es su coeficiente de conductividad térmica que es la mitad del de un acero al carbono pero 25 % mayor que el de un acero inoxidable austenítico, esta propiedad es de vital importancia para el diseño térmico del cambiador.
15. A parte de las ventajas mencionadas en los puntos anteriores, los aceros inoxidables dúplex, cuentan también con buena formabilidad, aunque se ve un poco limitada por la resistencia de estos aceros lo cual hace necesario el uso de equipo con mayor capacidad para conseguir las formas que se deseen. Se deben observar las precauciones correspondientes al trabajar este tipo de aceros, ya que se debe conservar su microestructura lo más apegada al 50 % de ferrita y 50 % de austenita por lo que cualquier variación en la temperatura, puede alterar la microestructura produciéndose resultados no deseados. Otra ventaja de estos aceros es su buena soldabilidad, esta es de gran importancia para la construcción de cambiadores de calor, ya que la mayoría de sus componentes son soldados. Dicha ventaja se consigue gracias al bajo contenido de carbono de estos aceros pero se debe elegir cuidadosamente el material de aporte y el proceso de soldadura a utilizarse. Se puede utilizar casi cualquier proceso de soldadura, excepto soldadura autógena lo cual los hace bastante flexibles ya que pueden soldarse aún en campo. También se les puede aplicar un recocido para mejorar sus propiedades mecánicas y recuperar algo de la resistencia que se pierde durante los procesos de formado y soldadura.
16. El carbono equivalente (CE) es un método comúnmente utilizado para correlacionar la templeabilidad de los aceros al carbono con su composición química y así mostrar los efectos que tienen los cambios de composición sobre el comportamiento del material.
17. La fórmula del carbono equivalente tiene su principal aplicación en los aceros al carbono que se utilizan para la construcción de cambiadores de calor en servicios que manejan ácido fluorhídrico (HF) tales como los de alquilación.

18. Las placas de acero al carbono ASTM A-516 deben tener un contenido máximo de carbono equivalente (CE) de 0.40 % dependiendo el espesor de la placa. Esto con la finalidad de disminuir la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno producido por las altas concentraciones de hidrógeno que genera el ácido fluorhídrico (HF) además de mejorar la soldabilidad del material.
19. El espesor de la placa, la velocidad de enfriamiento, el flujo de calor transmitido durante la soldadura, el nivel de hidrógeno tanto en el servicio como en la soldadura y el tipo de microestructura presente en el material son determinantes en los niveles de carbono equivalente (CE) permisibles para evitar la aplicación de tratamientos térmicos especiales que disminuyan la susceptibilidad del material al agrietamiento inducido por hidrógeno.
20. Además del control del carbono equivalente, el contenido de niobio (Cb) + vanadio (V) no debe exceder el 0.1 %. Así como el contenido de cromo (Cr) + níquel (Ni) + cobre (Cu) no debe exceder el 0.20 %.

A través de la investigación de estos materiales llegamos a la conclusión de que son una buena alternativa para las condiciones de servicio que cada vez son más exigentes. Además, el costo es un factor importante pues en algunos casos estos materiales son económicamente factibles pues en el caso de los aceros aluminizados y aceros inoxidables dúplex se reducen los gastos por mantenimiento, se incrementa la producción en el proceso debido a que los cierres de la planta son menos frecuentes y se alarga la vida útil del material al tener mejor resistencia a la corrosión. Desafortunadamente, en la industria petrolera de nuestro país, dichos materiales han tenido un uso muy limitado, lo que contrasta con los casos de Estados Unidos y Europa donde se han empleado de manera sustancial con excelentes resultados.

Así, esta tesis es una fuente de información sobre estos materiales, pues da a conocer las principales ventajas que ofrecen comparadas con los materiales que normalmente se utilizan, las cuales sirven como base para una posible aplicación dentro de la industria petrolera de nuestro país.

BIBLIOGRAFIA.

1. BEDNAR, Henry H. Pressure Vessel Design Handbook. 2ª ed., Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1986, 431 pp.
2. HARVEY, John F. Theory and Design of Modern Pressure Vessels. 2ª ed., Van Nostrand Reinhold Company, U.S.A., 1974, 436 pp.
3. ASKELAND, Donald R. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Grupo Editorial Iberoamericana, México, 1985, 556 pp.
4. THIELSCH, Helmut. Defects and Failures in Pressure Vessels and Piping. Krieger Publishing Company, U.S.A., 1977, 443 pp.
5. HORWITZ, Henry P.E. Soldadura: Aplicaciones y Práctica. Alfaomega, México, 1991, 786 pp.
6. BRADY, G. Manual de Materiales. Compañía Editorial Continental S.A., México, 1965.
7. NORMAN, A. Waterman. CRC-Elsevier Materials Selector. Vol. 2, CRC Press, London, 1991
8. Metals Handbook. 9ª ed., Vol. 5, American Society for Metals, U.S.A., 1982.
9. Metals Handbook: Welding, Brazing and Soldering. 9ª ed., Vol. 6, American Society for Metals, U.S.A., 1983.
10. BURNS, R.M. Protective Coatings for Metals. 3ª ed., Reinhold Publishing Corporation, New York, 1970.
11. BAILEY, N. Welding Steels Without Hydrogen Cracking. 2ª ed., ASM International, U.S.A., 1973, 150 pp.
12. CORROSION. Vol. 3, Número 5, Junio 1992, pp. 21-25.
13. HYDROCARBON PROCESSING. Vol. 49, Número 12, May 1970, pp. 85-92.
14. HYDROCARBON PROCESSING. Vol. 55, Número 6, June 1976, pp. 75-80
15. HYDROCARBON PROCESSING. Vol. 51, Número 6, June 1972, pp. 127-128
16. CHEMICAL ENGINEERING. Vol. 87, Número 22, November 1980, pp. 87-131
17. CHEMICAL ENGINEERING. Vol. 93, Número 22, November 1986, pp. 103-105.
18. CHEMICAL ENGINEERING. Vol. 93, Número 21, October 1986, pp. 153-155.

19. ALON PROCESSING, INC. Grantham St., Tarentum PA.
20. ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Sección VIII – División I, II, Parte A, B, D.
21. STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION, 7th Edition, 1988.
22. HEAT EXCHANGERS, HF SERVICE SPECIFICATIONS, HF ALKYLATION, Phillips P. Standars.
23. MANUAL DE DISEÑO MECANICO DE CAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA, Instituto Mexicano del Petróleo, 1987.
24. ASM SPECIALTY HANDBOOK, Stainless steels, ASM International, U.S.A., 1994, 557 pp.
25. ASM HANDBOOK: Properties and selection: Irons, Steels and High performance alloys, Vol. 1, U.S.A., 1989.
26. CHAWLA, S.L., Gupta, R.K. Material selection for corrosion control, ASM International, U.S.A., 1993.
27. DUPLEX STAINLESS STEEL, Sandvik steels.
28. USINOR COMPANY, Corporate communications, Paris.