



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACION DE  
COSTOS DE UN RECIPIENTE PARA ALMACENAR  
HIDROGENO A PRESION

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

DAGOBERTO RIOS MORALES

276498

ASESOR: ANDRES AQUINO CANCHOLA

MEXICO, D. F., MARZO DEL 2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
ZARAGOZA\*

JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/245/99.

**ALUMNO: DAGOBERTO RIOS MORALES**  
*Presente.*

*En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:*

- Presidente: I.Q. Rafael Sánchez Dirzo*
- Vocal: I.Q. Andrés Aquino Canchola*
- Secretario: I.Q. Flora Antor Hernández*
- Suplente: I.Q. Genaro Altamirano García*
- Suplente: I.Q. Roberto Ramírez Torres*

*Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.*

**A T E N T A M E N T E**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
*México, D. F., 13 de Diciembre, de 1999.*

**ING. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ**  
**JEFE DE LA CARRERA**

**DEDICO ESTE TRABAJO**

**A MI MAMA**

**Para usted, que es ejemplo de dedicación y perseverancia,  
Motivo de alegría y superación, paraíso de descanso y  
tranquilidad. Mi eterno agradecimiento por la confianza  
depositada hasta la culminación de esta etapa tan importante  
en mi vida.**

**Gracias mamá**

## ***AGRADECIMIENTOS***

**A mi padre** por sus valiosos consejos y por su ejemplo de hacer las cosas con dedicación.

**A mi hermano Guillermo** por los inolvidables momentos tan agradables que compartimos, por su apoyo incondicional y también por sus consejos refortalecientes.

**A mi hermana Irma** por su comprensión y cariño, y por ser una persona tan imprescindible en mi vida. Gracias hermana.

**A mi hermano Ricardo** por que sé que cuento contigo en todo momento

**A mi tía Trinidad Morales** por sus consejos y apoyo.

**A la Biol. Magdalena Ordoñez R.** por brindarme su amistad y comprensión.

**Al Ing. Leonardo Reyes** por su valiosa e incalculable ayuda para la elaboración de este trabajo.

**A mis queridas amigas Martha y Elizabeth Leyvin** por su hermosa compañía y por los momentos llenos de felicidad que me brindaron.

Agradezco a todos mis **amigos y compañeros** con los que he convivido en la Universidad, ya que con ellos he compartido muchos momentos de alegría.

# INDICE

	Página
<b>I. Hidrógeno.</b>	
1.1. Introducción	1
1.2. El Hidrógeno como combustible	3
1.3. Generación de hidrógeno	3
1.4. Transmisión	5
1.5. Servicio final	6
1.6. Otras fuentes de hidrógeno	6
1.7. Efectos fisiológicos del hidrógeno	7
1.8. Almacenamiento	7
1.9. Opciones de entrega	8
1.10. Localización de los tanques de almacenamiento	9
1.11. Propiedades que afectan el manejo del hidrógeno	10
1.12. Materiales de construcción	11
1.13. Fragilidad en el acero de recipientes a presión por la presencia de hidrógeno	12
<b>II. Almacenamiento.</b>	
2.1. Introducción	14
2.2. Almacenamiento de líquidos	15
2.2.1. Tanques atmosféricos	15
2.2.2. Tanques a presión	16
2.2.3. Estanques y almacenamiento subterráneo	16
2.3. Almacenamiento de gases	17
2.3.1. Recipientes para gases	17
2.3.2. Solución de gases en líquidos	17
2.3.3. Almacenamiento en recipientes a presión	17
2.3.4. Botellas y líneas de tuberías	18
2.3.5. Almacenamiento criogénico y a bajas temperaturas	18

**III. Materiales para la construcción de recipientes de proceso y tanques de almacenamiento.**

3.1. Introducción	20
3.2. Principio de tratamiento térmico	20
3.2.1. Tratamiento térmico de aleaciones no alotrópicas	21
3.2.2. Tratamiento térmico de los aceros	23
3.3. Aceros al carbón	33
3.4. Aceros de aleación	34
3.5. Forja	38
3.6. Soldadura de los recipientes a presión	41
3.7. Corrosión	47
3.7.1. Factores que influyen en la corrosión	48
3.7.2. Ataque a alta temperatura	49
3.7.3. Corrosión localizada	50
3.7.4. Como combatir la corrosión	52
3.8. Pintura	56

**IV. Diseño de recipientes.**

4.1. Introducción	62
4.2. Esfuerzos en recipientes a presión	64
4.3. Esfuerzos en cascos cilíndricos	65
4.4. Diseño de recipientes de almacenamiento	66
4.5. Definiciones	66
4.6. Tipos de tapas	68
4.7. Ecuaciones de diseño	72
4.8. Recipientes de construcción especial	72
4.9. La seguridad en el diseño	74
4.10. Pruebas no destructivas	75
4.11. Cuidado de los recipientes a presión	76

**V. Memoria de cálculo.**

5.1. Memoria de cálculo	79
-------------------------	----

**VI. Conclusiones.** 95**VII. Bibliografía.** 97

## *INDICE DE FIGURAS*

	Página
Fig. 2-1. Diagrama de solubilidad del cobre en aluminio.	22
Fig. 2-2. Diagrama de enfriamiento del carburo de hierro.	24
Fig. 2-3. Curva de transformación de enfriamiento continuo.	25
Fig. 2-4. Diagrama de dureza del acero por enfriamiento brusco.	26
Fig. 2-5. Diagrama de revenido del acero.	29
Fig. 2-6. Diagrama de enfriamiento del acero austenizado.	30
Fig. 2-7. Diagrama de revenido del acero austenizado.	30
Fig. 2-8. Diagrama de comparación de endurecimiento de un acero aleado y uno no aleado.	31
Fig. 2-9. Proceso de forja.	38
Fig. 2-10. Diagrama de temperaturas apropiadas para el proceso de forja.	39
Fig. 2-11. Descripción del proceso de soldadura.	42
Fig. 4-1. Esfuerzos en cascos cilíndricos.	65
Fig. 4-2. Tapa plana.	69

## ***INDICE DE FIGURAS***

	<b>Página</b>
Fig. 4-3. Tapa toriesférica.	69
Fig. 4-4. Tapa elíptica.	70
Fig. 4-5. Tapa hemiesférica.	71
Fig. 4-6. Tapa cónica.	71
Fig. 5-1. Recipiente integralmente forjado.	91
Fig. 5-2. Recipiente fabricado por método ordinario.	94

## ***INDICE DE TABLAS***

	Página
<b>Tabla 1.</b> Propiedades físicas del hidrógeno, metano y gasolina.	9
<b>Tabla 2.</b> Sistema numérico unificado (numeración de metales y aleaciones).	35
<b>Tabla 3.</b> Sistema de pintura.	58, 59
<b>Tabla 4.</b> Especificaciones para la preparación de superficies.	60
<b>Tabla 5.</b> Especificación para el tratamiento previo.	61
<b>Tabla 6.</b> Pinturas.	61
<b>Tabla 7.</b> Factores de seguridad.	67
<b>Tabla 8.</b> Ecuaciones de diseño.	72
<b>Tabla 9.</b> Volumen obtenido con diferentes ecuaciones de estado.	84
<b>Tabla 10.</b> Evaluación de costo del equipo Integralmente forjado.	94
<b>Tabla 11.</b> Evaluación de costo del equipo diseño ordinario.	94

## ***ABREVIATURAS***

***A.S.M.E.*** American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

***A.P.I.*** Institute American of Petroleum (Instituto Americano del petróleo).

***A.I.S.I.*** American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y Acero).

***C.N.F.E.*** Clasificación Nacional de Fabricantes Eléctricos.

***N.F.P.A.*** National fire Protection Association (Asociación Nacional contra Incendios).

***D.O.T.*** Departamento de Transporte de los Estados Unidos.

***T.C.*** Transporte de Canadá.

***S.A.E.*** Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros del Automóvil).

***T.T.T.*** Diagrama "Temperatura-Tiempo-Transformacion"

***H.S.L.A.*** Aceros Estructurales de Alta Resistencia.

## ***OBJETIVOS***

- ❖ Determinar el espesor necesario para resistir los esfuerzos a los que se ve sometido el recipiente.
- ❖ Seleccionar el material más adecuado para la construcción del tanque atendiendo las propiedades del fluido y las condiciones de operación.
- ❖ Determinar el método de fabricación del recipiente dependiendo del tamaño, servicio y propiedades del material.

# CAPITULO 1

## HIDROGENO

## *INTRODUCCION*

Es un hecho que el grado de desarrollo industrial así como la prosperidad de cada nación está relacionado con el consumo de energía, cuando el suministro de energía es abundante permite una mayor actividad, esto implica que los países más avanzados industrialmente consumen más energía que los países menos desarrollados.

Las sociedades industrializadas contemporáneas consumen entre 50 y 70 millones de barriles de petróleo todos los días sin parar. Tan solo los Estados Unidos de Norteamérica consume más petróleo que la América Latina, Africa y Asia juntas. Por lo tanto demandas tan grandemente aumentadas ejercerán una fuerte presión sobre las limitadas fuentes de energía del mundo.

Nunca como hoy estos flujos de energía (combustibles fósiles) han modelado el camino de nuestro destino, que se traducen en lujos y derroches, pero también nunca como hoy nuestro planeta estuvo tan manchado y ahogado de humos, basura y desperdicios, productos de la intensa actividad industrial.

Por consiguiente es necesario considerar la utilización de otras fuentes de energía que sean capaces de sustituir a los combustibles fósiles y aunado a esto puedan tener una relación con la naturaleza basada en su respeto y conservación. Hoy en la actualidad el hombre cuenta con el conocimiento necesario para rectificar incidiendo precisamente en el alimento que pone en marcha aquellos sistemas industriales sobre los que se sostiene nuestra civilización.

Una alternativa para transmitir energía sería el empleo del hidrógeno como combustible, con el uso del hidrógeno, estaremos lejos de depender de los combustibles fósiles (que son amenazados con escasear, además su localización se dificulta cada día más); el hidrógeno arde con una llama muy caliente y el producto de combustión es agua, que es completamente reciclable.

Existen diversas formas para obtener el hidrógeno, La Comisión de Energía Atómica de los E.U., propone el empleo de los reactores nucleares que generan la radiación, que sirve para extraer el hidrógeno del agua por medio de una electrólisis, otro sistema es el de adicionar elementos pesados que generan el plasma de alta temperatura para que emitan la luz ultravioleta que sirva para disociar el agua.

## *INTRODUCCION*

Es un hecho que el grado de desarrollo industrial así como la prosperidad de cada nación está relacionado con el consumo de energía, cuando el suministro de energía es abundante permite una mayor actividad, esto implica que los países más avanzados industrialmente consumen más energía que los países menos desarrollados.

Las sociedades industrializadas contemporáneas consumen entre 50 y 70 millones de barriles de petróleo todos los días sin parar. Tan solo los Estados Unidos de Norteamérica consume más petróleo que la América Latina, Africa y Asia juntas. Por lo tanto demandas tan grandemente aumentadas ejercerán una fuerte presión sobre las limitadas fuentes de energía del mundo.

Nunca como hoy estos flujos de energía (combustibles fósiles) han modelado el camino de nuestro destino, que se traducen en lujos y derroches, pero también nunca como hoy nuestro planeta estuvo tan manchado y ahogado de humos, basura y desperdicios, productos de la intensa actividad industrial.

Por consiguiente es necesario considerar la utilización de otras fuentes de energía que sean capaces de sustituir a los combustibles fósiles y aunado a esto puedan tener una relación con la naturaleza basada en su respeto y conservación. Hoy en la actualidad el hombre cuenta con el conocimiento necesario para rectificar incidiendo precisamente en el alimento que pone en marcha aquellos sistemas industriales sobre los que se sostiene nuestra civilización.

Una alternativa para transmitir energía sería el empleo del hidrógeno como combustible, con el uso del hidrógeno, estaremos lejos de depender de los combustibles fósiles (que son amenazados con escasear, además su localización se dificulta cada día más); el hidrógeno arde con una llama muy caliente y el producto de combustión es agua, que es completamente reciclable.

Existen diversas formas para obtener el hidrógeno, La Comisión de Energía Atómica de los E.U., propone el empleo de los reactores nucleares que generan la radiación, que sirve para extraer el hidrógeno del agua por medio de una electrólisis, otro sistema es el de adicionar elementos pesados que generan el plasma de alta temperatura para que emitan la luz ultravioleta que sirva para disociar el agua.

El proyecto llamado *pequeño sol*, propuesto por el Ingeniero Rafael Sánchez Dirzo (Académico de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza), trata de la obtención del hidrógeno por medio de la hidrólisis del agua, donde la planta electrolítica será alimentada por paneles solares, aerogeneradores y dinamos movidos mecánicamente (acoplándoles bicicletas), generando la descarga eléctrica necesaria para la disociación del agua, el sistema se complementa con transporte y almacenamiento del hidrógeno y oxígeno a presión.

El tema central del presente trabajo es el almacenamiento del hidrógeno gaseoso, dónde, primeramente se determinó la cantidad de hidrógeno a almacenar, posteriormente se recopiló todo lo referente a las propiedades físicas del hidrógeno y los peligros potenciales en su manejo.

---

## ÉL HIDROGENO COMO COMBUSTIBLE

¿Es el hidrógeno el combustible del futuro?

Esta alternativa no se pondrá en marcha pronto, pero el hidrógeno extraído del agua, podrá suplir tanto a los combustibles fósiles como a las redes de distribución eléctrica. Repentinamente científicos y editores de prensa parecen hablar acerca de esta idea en encuentros técnicos realizados en E.U., en la reunión Nacional de Química en Boston y en la Conferencia Anual de Ingeniería para la Conversión de Energía basados en el hidrógeno. Pero toda esta atención puede ser prematura, los oficiales de Washington en instancia no dan mucho apoyo o prioridad a esta idea de sistemas de energía basados en el hidrógeno. Los más entusiastas partidarios de esta idea esperan de 20 a 50 años antes de que la economía cambie hacia esta alternativa.

### GENERACION DEL HIDROGENO

El concepto llamado *hidrógeno como combustible* en su forma más popular de obtención y servicio:

1. Empleando la energía nuclear de la fisión o fusión de las grandes centrales para la obtención del hidrógeno del agua.
2. A partir de procesos electrolíticos para la descomposición del agua, con empleo de fuentes naturales de energía.
3. Entubamiento del hidrógeno para satisfacer las demandas de energía de los diferentes sitios (hogares, factorías, subestaciones eléctricas, etc.).
4. Consumiendo el hidrógeno para generar calor, propulsión o electricidad.

Este concepto promete tres ventajas básicas:

- \* Empleando el hidrógeno como combustible, estamos lejos de depender de los combustibles fósiles (que son amenazados con escasear además su localización se dificulta cada día más)
- \* El hidrógeno cuando se quema es muy limpio, lo que permite ser bienvenido por los ambientalistas y esto se debe a que el producto de combustión es agua, además de ser completamente reciclable.
- \* El almacenamiento del hidrógeno es más económico que la transmisión de la electricidad.

Un notable aspecto importante de esta idea es el brindarle un gran papel a la energía nuclear ya que con esta energía es posible generar electricidad, lo cual ya es posible en naciones avanzadas, en donde se destina solo un 10 % del presupuesto Pero con la tarea de extraer el hidrógeno del agua a través de la energía nuclear, el presupuesto se elevaría a un 90% para tal generación.

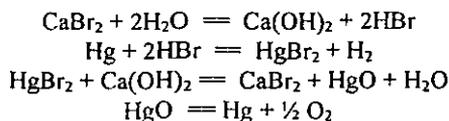
La energía nuclear se puede emplear para extraer el hidrógeno del agua por medio de varios métodos, según en teoría. El camino más común es el uso de reactores nucleares para generar electricidad para la electrólisis del agua. Esta aproximación es claramente redundante en casos donde el hidrógeno es empleado para generar electricidad, además en su punto final de uso, la eficiencia global de conversión electricidad-hidrógeno-electricidad es solo del 38%, reportado por E.C. Tanner de la Universidad de Princeton.

La ventaja de emplear al Hidrógeno como combustible, es que sus costos de distribución son menores que los correspondientes a la distribución de electricidad. Esto se puede ser verdadero si los esfuerzos se enfocan para mejorar la electrólisis. Este hecho incluye el uso de mejores electrodos (quizá una mejor celda de trabajo-combustible) y una línea para la provisión de electricidad para la operación.

Un método más especulativo pero inherentemente más atractivo es la extracción del hidrógeno que se deriva de la electrólisis por medio de la radiación y calor generado en las plantas nucleares. El método más directo es la disociación del agua por calentamiento a 3000°C, pero esta idea debe permanecer como teoría hasta que se encuentren los materiales de construcción para soportar esta temperatura.

Otra posibilidad sugerida por Brook Haven National Laboratory es extraer el hidrógeno por medio del bombardeo con la radiación generada en la fisión. William Gough y Bernar Eastloyd miembros de la Comisión de Energía Atómica de los E.U., sugieren un sistema en donde se adicionan elementos pesados, causando el plasma de alta temperatura para que emita luz ultravioleta que sirva para disociar el agua.

Químicamente la secuencia de elaboración se basa en emplear los reactores nucleares solamente como fuentes de calor. Este sistema ha sido estudiado por organizaciones tales como el Instituto de Tecnología del Gas, General Electric y la Comunidad Europea de Energía Atómica y por el laboratorio de Ispra en Italia. Ispra por ejemplo, ha trabajado con una secuencia de reacciones químicas que operan a una temperatura de 730°C. Esta secuencia consiste de cuatro reacciones:



Una desventaja de esta secuencia es el uso del altamente corrosivo bromuro de hidrógeno, en adición a estas observaciones, dijeron que necesitaban un gran inventario de mercurio. En un desarrollo más reciente desarrollado por Ispra, disminuyó este problema empleando compuestos de cloro y de hierro. Por ahora los estudios preliminares se han desarrollado a nivel laboratorio, pero hay una gran incertidumbre para realizar cambios graduales para realizarlo en la planta piloto. Los observadores están de acuerdo en que está lejano el poder asignarle cualquier economía a tal proceso químico.

Si los métodos de producción de hidrógeno se basaran en la fusión nuclear en lugar de la fisión, la sociedad no tendría que depender por más tiempo del uranio u otros combustibles de fisión. Sin embargo, existen otros dos métodos de conversión de energía que ofrecen las mismas ventajas que el hidrógeno obtenido del agua, estos métodos son los hornos solares y los sistemas biológicos que fueron mencionados por científico, pero parece ser que le otorgan poca importancia.

### *TRANSMISIÓN*

Puesto que la transmisión de hidrógeno es más económica que la distribución de electricidad, su costo comparado con la transmisión de gas natural es mucho. Tomando en consideración las diferencias en el valor de calentamiento  $12 \times 10^6 \text{ J/m}^3$  ( $325 \text{ BTU/ft}^3$  que es tres veces mayor que el del gas natural), la densidad, viscosidad y factor de compresibilidad en una tubería presurizada, Gregori y colaboradores calcularon, que para una línea diseñada específicamente para hidrógeno, el costo global de transmisión puede ser cerca de 3.5 – 4.5 centavos / MMJ, si la línea opera a 51 atm, o cerca de 2.5-3 centavos, si opera a 136 atm. Pero este punto cae fuera del costo de transmisión del gas natural que es de 1.5-1.7 centavos. Probablemente las tuberías de gas puedan usarse para el servicio de suministro de hidrógeno, pero para entregar una cantidad de energía equivalente, dice Gregori, a la capacidad del compresor o a una línea puede subir por un factor de 3.8 y los caballos de potencia para el compresor por un factor de 5.5.

## ***SERVICIO FINAL***

El hidrógeno es utilizado en máquinas de combustión interna por ejemplo, en dirigibles. Recientemente es anfitrión de estudios realizados por universidades y grupos exteriores como la industria automotriz, que poseen la máquina térmica para automóviles, en el que el hidrógeno podría ser empleado como combustible.

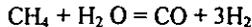
Pero Detroit ha concluido que aunque el hidrógeno pueda ser realmente el remedio para la severa crisis energética, esta no aparece en un futuro cercano.

Otro mercado donde el hidrógeno podría incursionar, es el de las aeronaves supersónicas, se puede capitalizar no solo el hidrógeno por su excelente relación peso-energía sino también como hidrógeno líquido por su gran capacidad de calentamiento.

Otro empleo del hidrógeno es él quemarlo para producir energía eléctrica, como se hace en las turbinas-generadores. La turbina de gas ya ha sido operada con hidrógeno teniendo un buen éxito y es además el combustible preferido para la mayor parte de las investigaciones realizadas en celdas-combustible.

## ***OTRAS FUENTES DE HIDROGENO.***

La producción de hidrogeno para el gas de síntesis se ha desplazado en los últimos años con celeridad extraordinaria del empleo del carbón (gas de agua-gas de generador) al de productos del petróleo, como materia prima. En U.S.A., el hidrógeno se obtiene ya desde hace tiempo por conversión catalítica de gas natural con vapor de agua:



Actualmente, el empleo de fracciones líquidas de productos de petróleo para la obtención de hidrogeno aumenta fuertemente en todo el mundo como consecuencia del crecimiento de las necesidades mundiales de hidrogeno y del aumento de los tonelajes disponibles de fracciones líquidas del petróleo.

Las crecientes necesidades de hidrógeno deben referirse al fuerte aumento de la síntesis de amoniaco en muchos países y sobre todo a la importancia continuamente creciente de los métodos de hidrocraqueo e hidrogenación en las refinarias (craqueo de hidrocarburos con simultanea adición de hidrogeno y eliminación del azufre que contienen las fracciones, en forma de SH<sub>2</sub>).

## ***EFFECTOS FISIOLÓGICOS DEL HIDROGENO***

El hidrógeno es un gas no-tóxico, pero puede actuar como un simple asfixiante por el desplazamiento o dilución del oxígeno atmosférico a el punto tal donde es soporte para la vida. La inconsciencia puede ocurrir sin algún síntoma de advertencia, si se inhala aire con una alta concentración de hidrógeno. Sin embargo, el límite inferior de flamabilidad del solo 4% por volumen de hidrógeno en el aire es suficiente para lograr el nivel de riesgo para la asfixia.

Si la persona está consiente y empieza a presentar síntomas de asfixia, deberá ser trasladada a un área descontaminada y darle a inhalar aire fresco u oxígeno. Una persona inconsciente debe de ser trasladada a un área descontaminada y darles respiración artificial con administración simultánea de oxígeno así como proporcionar atención médica tan pronto como sea posible.

## ***ALMACENAMIENTO***

El hidrógeno se puede almacenar como un gas comprimido o líquido criogénico. Pero una alternativa muy seductora es el empaquetamiento del hidrogeno en un metal anhidro. Esto salva el complicado almacenamiento en recipientes y lo difícil de mantener las condiciones de temperatura y presión. Pero algunos metales anhidros están lejos de contener el hidrógeno por unidad de volumen, que el mismo hidrógeno líquido. El hidrógeno se absorbe exotérmicamente bajo presión por el metal y este puede ser liberado en el punto de uso, por una disminución de la presión o elevación de la temperatura. La temperatura y presión apropiada varia ampliamente, dependiendo del sistema anhidro. El anhídrido de magnesio fue el más estudiado de aquellos que muestran tal propiedad, tales como: el mono e dihidrato de vanadio y el niobio; anhídridos basados en un metal raro junto con el hierro, cobalto, nickel, cobre y unos formados con un componente intermetálico conteniendo acero y titanio.

***Gases criogénicos.*** En ausencia de un término preciso, debemos adoptar la definición arbitraria de " Gases Criogénicos ": un gas criogénico es aquel que puede licuarse o solidificarse sólo a temperaturas menores de -100°F. Tales como el Oxígeno, con un punto de ebullición de -297°F bajo presión atmosférica, Nitrógeno (-320°F); Dióxido de Carbono (que sublima a -170°F); Argón (-303°F ) y el Hidrógeno (-423°F). La gran peculiaridad de estos gases, es que se abastecen y almacenan como líquidos criogénicos, que requieren para su manejo y seguridad de un diseño de equipos y materiales especiales.

El oxígeno y el hidrógeno son casos especiales, el oxígeno es un poderoso promotor de combustión y el hidrógeno es altamente flamable. Así lo concerniente a la seguridad para estos dos gases es complementaria.

---

## OPCIONES DE ENTREGA

Son seis los modos de abastecimiento de gases criogénicos:

\* *Cilindros de gas comprimido.* Son mejores en aplicaciones que requieren un pequeño volumen, por ejemplo, en pruebas de planta-piloto, cuando los usuarios necesitan menos de 50000 ft<sup>3</sup> std de gas por mes. Los cilindros estándar tienen una capacidad de 270 ft<sup>3</sup> std aproximadamente y a una presión de 2265 psi, pero hay disponibles cilindros de diferentes capacidades.

• *Cilindros de gases licuados.* Son portátiles, estos contenedores criogénicos están a vacío y tienen un aislamiento, los gases que se almacenan como líquidos son oxígeno, nitrógeno y argón. Estos requieren de un menor manejo que los cilindros de gases.

Los cilindros líquidos se encuentran a una presión de 230 psig, pero la operación normal es de alrededor de 125 psig. Los rangos de capacidad de estos recipientes van de 3630 ft<sup>3</sup> std para el nitrógeno a 4500 ft<sup>3</sup> std para el oxígeno.

\* *Remolques de gases comprimidos.* Son muchas veces llamados tubo remolques, la capacidad de los remolques es de alrededor de 45,000 ft<sup>3</sup> std para helio comprimido y remolques similares con capacidad de 125,000 ft<sup>3</sup> std para el hidrógeno y nitrógeno. Tales remolques abastecen gas a una presión de 2640 psig. Así que el gas puede ser usado para aplicaciones semejantes a una presurización en un autoclave. En la mayoría de los casos, los remolques tubos son entregados completos y permanecen hasta que son desocupados. Para lograr esto se requiere de un gran libre en el lugar de entrega.

\* *Volumen de gas licuado.* Es la opción más común después de los cilindros de gas comprimido. El gas licuado puede ser entregado por camino en remolques con capacidades de 4500 gal, o en carros de ferrocarril con capacidades de 17,000 gal. Se almacenan en recipientes externos especialmente diseñados para el gas. Los recipientes contienen de 500-11,000 gal de gas líquido a una presión de 250 psig, los recipientes que proveen solo líquidos operan a una presión de 25-75 psig para reducir las pérdidas por evaporación

\* *Producción criogénica exterior.* El oxígeno y el nitrógeno se pueden producir en unidades de separación del aire en lugares exteriores, que son económicos si los volúmenes son de menos de 8 millones ft<sup>3</sup> std/mes para el nitrógeno o 15 millones ft<sup>3</sup> std/mes para el oxígeno. Estas unidades son propias para cualquiera de los usos o abastecimientos.

\* *Abastecimiento por parrillas de tuberías.* Varios usuarios con una separación central de planta a planta abastecedora, puede ser abastecido por las rejillas de tuberías.

## **LOCALIZACIÓN DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO**

Los lineamientos para la localización del recipiente dependen del gas que se va a almacenar. Sin embargo, es generalmente recomendable para las facilidades de almacenamiento que este sea en el exterior, porque en el interior puede haber acumulación de cualquier gas criogénico que puede generar situaciones de peligro como el fuego, explosiones o asfixias. Cualquier fuga de un líquido en particular, puede resultar un gas frío que puede deslizarse y acumularse en sitios bajos tales como: trincheras, drenajes o áreas subterráneas de trabajo. El almacenamiento de oxígeno e hidrógeno envuelve grandes peligros, así que su localización es más crítica. Por facilidad el almacenamiento de hidrógeno debe de ser solo en espacios abiertos, porque las mezclas de hidrógeno/aire dentro de espacios confinados pueden explotar. Cualquier barrera de protección o pared contra fuego debe de ser de una pared única, y diversos fosos deben de ser usados para prevenir que un derramamiento de hidrógeno pueda llegar a una posible fuente de ignición. Cualquier material flamable próximo al tanque debe de ser confinado en recintos no-flamables con agua (rociada o inundada).

Todo el equipo eléctrico debe conformarse a la Clase I, Grupo B o Grupo C y D (Clasificación Nacional de Fabricantes Eléctricos) completamente sellados y presurizados con un gas inerte o aire seco. Todas las partes metálicas y máquinas operando, conductos y controles deben de ser cerrados.

Los peligros potenciales en el manejo del hidrógeno se deben poner de manifiesto comparando sus propiedades de combustión con las propiedades del metano y gasolina.

<b>Propiedad</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>Metano</b>	<b>Gasolina</b>
Peso molecular	2.016	16.043	107
Punto de Ebullición, K (1 atm)	20.3	111.6	310-478
Presión Crítica atm	12.8	45.4	24.5-27
Factor de Expansión (líquido a vapor)	845	649	156
Límites de flamabilidad en el aire, vol. %	4.0-75	5.3-15	1.0-7.6
Límites de detonabilidad en el aire, vol. %	18-59	6.3-14	1.1-3.3
Energía mínima de ignición, mJ	0.02	0.29	0.24
Temperatura auto-ignición, K	858	813	501-744
Coefficiente de difusión cm <sup>2</sup> /s	0.61	0.16	0.05
Velocidad de flama, cm/s	265-325	37-45	37-43

Tabla I. Tabla comparativa de propiedades físicas.

## *¿ Como afectan estas propiedades el manejo del hidrógeno?*

1. El hidrógeno tiene una velocidad de difusión más alta que el metano y la gasolina. Así que forma mezclas explosivas más rápidas con el aire, pero también se dispersa muy rápido. Sin embargo, si se derrama hidrógeno líquido este se dispersa más despacio.
2. El hidrógeno líquido se escapa más rápidamente que el metano o la gasolina porque es menos viscoso, pero como gas se fuga eficazmente, caso similar al metano.
3. La energía de ignición del hidrógeno es mucho menor (0.02 mj mínimo), para una comparación, una carga estática generada en el cuerpo humano produce 10 mj.
4. El hidrógeno tiene una velocidad de propagación de flama 5 veces más alta que el metano; así la ignición del hidrógeno es más probable para producir una explosión.

Como con cualquier gas flamable, todas las fuentes de ignición deben ser eliminadas. Las instalaciones eléctricas deben ser Clase I Grupo B, en cualquier recinto donde el hidrógeno se empleé, debe de estar bien ventilado, con 20-60 intercambios de aire por hora.

Como precaución adicional, un detector de hidrógeno debe de ser instalado en cualquier área donde se emplea el hidrógeno. Pero se debe tener cuidado y estar seguro que los elementos del detector (un alambre caliente, por ejemplo) no sean una fuente de ignición.

El detector debe de ser intrínsecamente seguro. Cualquier maquinaria en movimiento en áreas donde hay hidrógeno no debe promover chispas y debe de ser totalmente cubierto. Como con el oxígeno, son recomendados los instrumentos resistentes a las chispas (como las aleaciones de bronce). Ropa que promueva chispas debe de ser evitada en lugares donde se encuentra el hidrógeno, y zapatos con suelas diatérmicas son recomendados.

Las flamas de un fuego ocasionadas por hidrógeno son casi invisibles en la luz del día; así el peligro de fuego por hidrógeno es compuesto, porque las flamas se pueden propagar inadvertidamente a otros materiales flamables. Cuando el fuego es advertido, el primer paso es cerrar el flujo de hidrógeno por un sistema de control remoto o automático, cuando el flujo no puede cortarse, la situación podría quedar fuera de control: es difícil extinguir un fuego por hidrógeno, si el fuego es extinguido, pero el hidrógeno continúa escapando, puede comenzar otro fuego o lo que es peor podría generar una explosión si alcanza una segunda fuente de ignición, tal argumento demuestra porque es necesario cerrar el sistema.

Los requerimientos específicos para el almacenamiento de hidrógeno están contenidos en NFPA (National Fire Protection Association) 50A<sup>(24)</sup> (Edición 1999), estándares para sistemas de hidrógeno gaseoso en sitios consumidores y NFPA 50B<sup>(25)</sup> (Edición 1999), estándares para sistemas de hidrógeno licuado en sitios consumidores. Los bancos de almacenamiento tanto portátiles como estacionarios, deben ser inspeccionados periódicamente por:

1. Corrosión de los recipientes y soportes.
2. Condición de los dispositivos de alivio de presión.
3. Operación adecuada de las válvulas de corte.
4. Condición de las tuberías.

Se puede emplear una solución de jabón u otra prueba apropiada para detectar fugas en los equipos y estas deben de realizarse periódicamente a la presión máxima de trabajo. Los cilindros de estos bancos deben de ser probados cada cinco años. Los cilindros TC/DOT (Transporte de Canadá/Departamento de Transporte de los Estados Unidos) deben de ser llenados y probados acorde con las regulaciones apropiadas. Se debe verificar el estado de la coleta y si esta se encuentra desgastada o estropeada se debe de reemplazar. Las ruedas de los bancos portátiles deben de verificarse para su operación y lubricarlas si es necesario.

Los orificios del drenaje en la base del soporte se deben destapar y limpiar para impedir que esa parte del cilindro se llene de herrumbre. Ellos deben ser verificados conforme a la última fecha en que se realizó la prueba hidrostática para cerciorarse que los cilindros están dentro del tiempo admisible entre cada prueba.

## ***MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN***

El hidrógeno es un gas no-corrosivo y se puede contener a temperatura ambiente por diversos materiales metálicos empleados en el diseño de instalaciones por tener una suficiente resistencia para soportar la presión de trabajo a la que se ve envuelto el equipo. Los materiales para la construcción de los equipos y tuberías que sean expuestos al hidrógeno se deben seleccionar considerando la posibilidad de fractura por hidrógeno, particularmente a presiones elevadas y temperaturas arriba de 232°C.

## ***FRAGILIDAD EN EL ACERO DE RECIPIENTE A PRESIÓN POR LA PRESENCIA DE HIDRÓGENO.***

Diversos medios que contiene un recipiente a presión, pueden ocasionar cambios críticos en las propiedades físicas del material del recipiente durante el servicio. Uno de estos medios es el hidrógeno que bajo la acción de altas presiones o elevadas temperaturas produce dos efectos: (1) la difusión dentro del metal como hidrógeno atómico y el proceso de recombinación de esta forma molecular dentro del metal, con lo cual incrementando la presión, trae como consecuencia el pandeo en la superficie, (2) una descarburización metalúrgica, reduciendo el efecto de sulfuros u óxidos presentes en el acero, (3) Ampollamiento por hidrógeno, definida como una subsuperficie vacía producida por la absorción de hidrógeno en aleaciones de baja resistencia, produciéndose un abultamiento en la superficie, esto resulta de la recombinación de los átomos de hidrógeno absorbido a hidrógeno molecular a presión elevada. El resultado del ataque por hidrógeno trae consigo una pérdida de ductilidad, fractura por esfuerzo y un agrietamiento o una falla por dilatación. Este fenómeno es llamado "fractura por hidrógeno", el efecto del hidrógeno se hace más pronunciado con el aumento de niveles de esfuerzos, por lo tanto, la selección de un acero de alta resistencia es para obtener una ventaja para altas presiones, diámetros grandes, peso mínimo del recipiente mereciendo consideraciones económicas y de ingeniería. Factores que incrementan tales esfuerzos son la presencia de muescas y otras fuentes de concentraciones de esfuerzos, el trabajo en frío hace los efectos del hidrógeno más pronunciados. Esta acción es retardada por la introducción de elementos de aleación, formadores de carburos estables, y los aceros cromo-molibdeno son usados frecuentemente para estos servicios. El incremento en el contenido de elementos de aleación en el acero incrementa la resistencia por fragilidad.

El mecanismo de daño en el acero por el hidrógeno, es la propagación de microagrietamientos bajo altos esfuerzos. Cuando se combina el hidrógeno con los esfuerzos, se hace crítica la propagación de agrietamientos procediendo lejos del punto de alta concentración de hidrógeno y es capturado en la región de baja concentración, el hidrógeno entonces emigra hacia la grieta a través del material por el gradiente de esfuerzos, para establecer una nueva concentración en la punta y este proceso se repite hasta la falla del acero. La difusión de hidrógeno contenido en la vieja grieta hacia la nueva grieta requiere de un rango de tiempo que va desde unos minutos hasta días, dependiendo del hidrógeno disponible, pudiendo ocasionar una fractura por dilatación.

La fragilidad es acelerada por las relaciones de bajos esfuerzos que permiten que el hidrógeno se acumule en la grieta, y a elevadas temperaturas el proceso de difusión se hace más alto. Sin embargo, si el hidrógeno y el esfuerzo están presentes en el material, más la acción residual hace mayor el valor del esfuerzo inferior conocido, esto posibilita a que ocurra una fractura. El tiempo puede variar desde unos minutos hasta unos días y el esfuerzo puede ser tan bajo como el 20% del esfuerzo de cedencia. Los materiales de alta resistencia y particularmente los aceros tratados térmicamente son muy susceptibles a este fenómeno.

Esto es debido al hecho de que el parámetro más significativo es la alta tensión cualquiera que sea, el aplicado o el residual, por lo tanto, el acero tratado en caliente, que generalmente es caracterizado por un esfuerzo residual alto, puede tener un esfuerzo total más marcado para la verdadera fractura por tensión que puede bajar la resistencia del acero.

La fragilidad por hidrógeno debe prevenirse si el material se va a usar a pleno esfuerzo, esto requiere prevenir que el hidrógeno entre en el material durante (1) fabricación y (2) durante el servicio. La eliminación durante la fabricación se debe a la calidad de los procedimientos de control; tales como, el precalentado de los electrodos para la soldadura y la parte que va a ser unida, para evitar humedad, cocimiento después de la galvanoplastia para expulsar fuera el gas. La eliminación durante el servicio no es siempre posible, ya que muchos recipientes son usados para almacenar hidrógeno a altas presiones. Mientras que otros son expuestos a medios corrosivos capaz de cargar el material con hidrógeno; por ejemplo aquellos que contienen sulfuros de hidrógeno en la industria del petróleo. El periodo de falla se incrementa con una disminución de la tensión, hay una tensión crítica inferior en el cual la fragilidad por hidrógeno no ocurre, junto con la selección de un material de composición compatible, forman la base de diseño sujetos al ataque por hidrógeno. El efecto de fragilidad por hidrógeno sobre la vida por fatiga es grandemente dependiente del medio de esfuerzo, porque un gradiente de esfuerzo debe mantenerse a una enorme distancia para evitar que el hidrógeno alcance la punta de la grieta.

# CAPITULO 2

## ALMACENAMIENTO

## *INTRODUCCIÓN*

Los procesos industriales, en donde se ve involucrado el ingeniero químico, se relacionan principalmente con la transformación de un compuesto a otro; por medios químicos o físicos. Estos procesos requieren del manejo y almacenamiento de grandes cantidades de materiales en contenedores o recipientes de construcción variada, dependiendo de la cantidad de material, de sus propiedades físicas y químicas, y de las operaciones a las que debe someterse.

El recipiente es la parte básica en la mayoría de los equipos de proceso, ya que la mayor parte de estos equipos de proceso pueden considerarse como recipientes con las modificaciones necesarias que les permitan llevar a cabo su función. Por ejemplo: un autoclave se debe considerar como un recipiente a alta presión equipado con medios de calentamiento y agitación, una columna de destilación o absorción se debe considerar como un recipiente con una serie de unidades de contacto líquido-vapor, un intercambiador de calor se debe considerar como un recipiente que contiene determinados elementos que permiten el intercambio de calor a través de las paredes de los tubos.

Para el diseño de un recipiente se deben de tomar en consideración varios factores. A menudo la consideración más importante es la selección del recipiente que satisficará mejor el servicio que se requiere.

En el desarrollo del diseño mecánico intervienen otros criterios como: propiedades del material de construcción, esfuerzos, estabilidad elástica, apariencia estética, costo del recipiente y tiempo de vida útil del recipiente.

Los recipientes se pueden clasificar de acuerdo al tipo de servicio funcional, temperatura y presión, materiales de construcción y geometría. Las clasificaciones más importantes son de acuerdo a la presión y geometría

## *ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS.*

### *Tanques atmosféricos.*

Se utiliza el término de tanque atmosférico para cualquier depósito diseñado para su utilización dentro de más o menos unas cuantas libras por pie cuadrado de diferencia con la presión atmosférica. Pueden estar abiertos a la atmósfera o cerrados. Por lo común, se obtiene el costo mínimo con una forma cilíndrica vertical y un fondo relativamente plano al nivel del terreno.

Los **tanques abiertos** se pueden utilizar para almacenar materiales que no se vean dañados por el agua, el clima o la contaminación atmosférica. De otro modo, se necesita un techo, ya sea fijo o flotante. Los **techos fijos** suelen ser escalonados o de cúpula. Los tanques grandes tienen techos escalonados con soportes intermedios. Puesto que las presiones son desdeñables, las principales cargas de diseño son la nieve y el viento. Con frecuencia se pueden encontrar los valores que requieren en los códigos locales de la construcción.

Los tanques atmosféricos de techo fijo requieren **ventilas** para evitar los cambios de presión, que se producirán de otro modo, debido a los cambios de temperatura y el retiro o la adición de líquidos. En el A.P.I. Standard 2000<sup>(18)</sup> (abril de 1998), guía para ventilación de tanques, se dan reglas prácticas para el diseño de las ventilas. Los principios de esta norma se pueden aplicar a líquidos distintos de los productos petroleros. En los tanques de techo fijo, la utilización de ventilas abiertas puede provocar pérdidas excesivas de líquidos volátiles, sobre todo los que tienen puntos de inflamación por debajo de 100°F. A veces, las ventilas llevan múltiples y conducen a un tanque de ventilación, o bien, se puede extraer el vapor mediante un sistema de recuperación.

Un medio eficiente de evitar las pérdidas por ventilación es el de utilizar uno de los muchos tipos existentes de **tanques de volumen variable**. Se construyen según A.P.I. Standard 650<sup>(19)</sup> (noviembre de 1998). Puede tener techos flotantes del tipo de cubierta doble o simple. Son tipos de techos elevador en los que la cubierta tiene un movimiento oscilante hacia arriba y hacia abajo en un sello líquido anular o se conecta al cuerpo del tanque mediante una membrana flexible. Una cámara de expansión de tela alojada en un compartimento sobre la parte superior del techo del tanque, permite también variaciones del volumen.

Los **techos flotantes** deben tener un sello entre el techo y el cuerpo del tanque. Si no se protegen mediante un techo fijo, deben tener drenes para la eliminación del agua y el cuarto del tanque debe tener un debe tener una abrazadera fuerte que sirve para reforzarla, con el fin de evitar las distorsiones. En los catálogos de los fabricantes aparecen muchos detalles sobre los diversos tipos de techos para tanques.

### *Tanques a presión*

Se pueden construir tanques cilíndricos verticales con techo escalonado o de cúpula, que funcionan a presiones por encima de unas cuantas libras por pie cuadrado; pero que se acercan todavía bastante a la presión atmosférica, según las especificaciones de la A.P.I. Standard 650. La fuerza de la presión que actúa contra el techo se transmite al cuerpo del tanque, que puede tener un peso suficiente para resistirla. Si no es así, la fuerza ascendente actuará sobre el fondo del tanque. Sin embargo, la resistencia del fondo es limitada y si no es suficiente, será preciso utilizar un anillo de anclaje o una cimentación fuerte. En los tamaños mayores, las fuerzas ascendentes limitan este tipo de tanque a las presiones muy bajas.

A medida que se incrementa la presión se hace necesaria la curvatura en toda la superficie. Se pueden construir tanques de esta categoría, hasta una presión de 15 lb/pulg<sup>2</sup>, según las especificaciones de la A.P.I. Standard 620<sup>(20)</sup> (febrero de 1997). Las formas utilizadas son esferas, elipsoides, estructuras toroidales y cilindros circulares con cabezas toriesféricas, elipsoidales o hemiesféricas. El A.S.M.E. Pressure Vessel Code (sección VIII del A.S.M.E. Boiler and Pressure Vessel Code), aunque no se requiere por debajo de 15 lb/pulg<sup>2</sup>, es también útil para el diseño de esos tanques.

### *Estanques y almacenamientos subterráneo*

Los materiales líquidos de bajo costo, si no se dañan debido a las lluvias o la contaminación atmosférica, se pueden almacenar en **estanques**. Se puede formar uno de estos últimos mediante la excavación o la construcción de presas en una barranca. Para evitar las pérdidas por filtración, el suelo puede requerir un tratamiento para hacerlo suficientemente impermeable. Esto se logra, recubriendo el estanque con concreto, películas de plástico o alguna otra barrera, la prevención de las filtraciones resulta especialmente necesaria cuando el estanque contiene materiales que puedan contaminar corrientes o almacenamientos de agua.

**Almacenamiento subterráneo.** La inversión tanto en instalaciones de almacenamiento como en terrenos se puede reducir con frecuencia mediante el almacenamiento subterráneo. También se usan medios porosos entre rocas impermeables. Se pueden formar cavidades en lechos y cúpulas de sal, mediante la disolución de esta última y su bombeo hacia el exterior. En numerosos lugares se pueden encontrar formaciones geológicas apropiadas para algunos de estos métodos. La aplicación más extensa ha sido la del almacenamiento de productos petroleros, tanto líquidos como gaseosos, en la parte del sudoeste de Estados Unidos. También se han manejado en esta forma productos químicos.

También se almacena agua en depósitos subterráneos, cuando se dispone de formaciones apropiadas. Cuando existe un exceso de agua superficial durante parte del tiempo, se trata el exceso, en caso necesario, y se bombea al interior del terreno, para su recuperación cuando se requiera.

También se construyen cámaras subterráneas en tierras congeladas. El almacenamiento en tanques o túneles subterráneos es con frecuencia el medio más práctico de conservar materiales peligrosos o radiactivos. Una cubierta de 100 pies de roca o tierra densa puede ejercer una presión de aproximadamente 100 lb/pulg<sup>2</sup>.

## ***ALMACENAMIENTO DE GASES***

**Recipientes para gases.** El gas se almacena a veces en recipientes dilatables ya sea del tipo de sello seco o sello líquido. Los recipientes de sello líquido son muy conocidos. Tienen un recipiente cilíndrico, cerrado en la parte superior y un volumen que varía mediante su ascenso y su descenso en un depósito anular, con sello lleno de agua. El tanque sellado se puede escalonar en diversas alturas (hasta cinco). Se han construido tanques sellados en tamaños de hasta diez millones de pies cúbicos. Los recipientes de sello seco tienen una parte superior rígida fija a las paredes laterales mediante un diafragma de tela flexible que le permite ascender y descender. No incluye el peso ni los costos de cimentación de los recipientes de sello líquido.

**Solución de gases en líquidos.** Algunos gases se disuelven con facilidad en los líquidos. En algunos casos en los que las cantidades no son grandes, éste puede constituir un procedimiento práctico de almacenamiento. Algunos de los ejemplos de gases que se pueden manejar en esta forma son el amoníaco en agua, el acetileno en acetona y el ácido clorhídrico en agua. Si se usa o no este método depende primordialmente de si la utilización final requiere el estado líquido o anhidro. La presión puede ser atmosférica o elevada. La solución de acetileno en acetona es también un rasgo de seguridad, debido a la inestabilidad del acetileno.

**Almacenamiento en recipientes de presión, botellas y líneas de tuberías.** La distinción entre recipientes de presión, botellas y tuberías es arbitraria. Todos ellos se pueden utilizar para el almacenamiento de gases a presión. Un recipiente de presión de almacenamiento suele ser casi siempre una instalación permanente. El almacenamiento de gas a presión no solo reduce su volumen, sino que, en muchos casos, lo licúa a temperatura ambiente. Algunos de los gases que se encuentran en esta categoría son el bióxido de carbono, varios gases del petróleo, el cloro, el amoníaco, el bióxido de azufre y algunos tipos de freón. Los tanques de presión se instalan con frecuencia subterráneos.

El gas licuado de petróleo (LPG) es el tema de la A.P.I. Standard 2510<sup>(21)</sup> (Edición, mayo 1995), Diseño y Construcción de Instalaciones de Gas Licuado de petróleo en Terminales Marinas y de Oleoductos, Plantas de Gasolina Natural, Refinerías y Tanques de patio. A su vez, esta norma se refiere a:

National Fire Protection Association (N.F.P.A.), standard 58<sup>(22)</sup> (Edition 1998), Standard for the Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases.

N.F.P.A. estándar 59<sup>(23)</sup> (Edición 1998), Standard for the Storage and Handling Petroleum Gases at Utility Gas Plants. La norma A.P.I., proporciona una información considerable sobre la construcción y las características de seguridad de esas instalaciones. También recomienda distancias mínimas de líneas. El usuario puede desear obtener una seguridad adicional mediante el incremento de esas distancias.

El término "botella" se aplica por lo común a un recipiente de presión suficientemente pequeño para ser convenientemente portátil. Las botellas van de aproximadamente 2 pies cúbicos a las cápsulas de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 1 pulg<sup>3</sup>. Las botellas son convenientes para cantidades pequeñas de muchos gases, incluyendo el aire, el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno, el argón, el acetileno, el freón y gas de petróleo. Algunos son recipientes utilizables una sola vez.

Una **línea de tuberías** no es por lo común un dispositivo de almacenamiento; sin embargo, se han enterrado tuberías en una serie de líneas paralelas conectadas y utilizadas para el almacenamiento. Esto evita la necesidad de proporcionar cimentaciones y la tierra protege a la tubería contra los extremos de temperatura. La economía de este tipo de instalación será dudosa si se diseñara para los mismos esfuerzos que un recipiente a presión. También se logra el almacenamiento mediante el incremento de la presión en líneas de tuberías operacionales y, en esa forma, se utiliza el volumen de tuberías como tanques.

Se emplea el **almacenamiento criogénico y a bajas temperaturas** para gases que se licúan a presión, a la temperatura atmosférica. En el almacenamiento criogénico, el gas está a la presión atmosférica o cerca de ella y permanece líquido debido a la baja temperatura. También puede funcionar un sistema con una combinación de presión y temperatura reducida. El término criogénico se refiere por lo común a temperaturas por debajo de -150°F. No obstante, algunos gases se licúan entre -150°F y la temperatura ambiente. El principio es el mismo; pero las temperaturas criogénicas crean diferentes problemas con los materiales de construcción y aislamiento.

El gas licuado se debe mantener en su punto de ebullición o por debajo de él. Es posible utilizar refrigeración; pero la práctica habitual consiste en enfriamiento por evaporación. La cantidad de líquido evaporado se minimiza mediante el aislamiento. El vapor se puede descargar a la atmósfera, comprimirse y volverse a licuar o utilizarse. A las temperaturas muy bajas con el aire líquido y sustancias similares, el tanque puede tener paredes dobles con el espacio intermedio evacuado. Como ejemplo se tiene el vaso Dewar, muy conocido. En la actualidad se construyen tanques grandes e incluso líneas de tuberías en esta forma.

Una buena alternativa es la de utilizar paredes dobles sin vacío; pero con un material de aislamiento en el espacio intermedio. La perlita y las espumas de plásticos son dos de los materiales de aislamiento que se usan de este modo. A veces, se usan tanto el aislamiento como el vacío. Los **materiales** para recipientes de gases licuados deben ser apropiados para las temperaturas y no quebradizos.

Se pueden utilizar algunos aceros al carbono hasta temperaturas de  $-75^{\circ}\text{F}$  y aceros de bajas aleaciones hasta  $-150^{\circ}\text{F}$  y, a veces,  $-200^{\circ}\text{F}$ . Por debajo de esas temperaturas, los principales materiales que se usan son los aceros inoxidable austeníticos y el aluminio.

**Las temperaturas bajas incluyen problemas de dilatación térmica diferencial.**

Con la pared exterior a la temperatura ambiente y la interior en el punto de ebullición del líquido, se debe absorber el movimiento relativo. Algunos sistemas para lograr esto se encuentran patentados. El "Gaz Transport" de Francia reduce el cambio dimensional mediante el uso de un recubrimiento interno y delgado de Invar. Otro sistema francés patentado absorbe este cambio mediante la flexibilidad de un metal delgado y plegado. Los pliegues van en dos direcciones y la forma de los cruces de los pliegues es una característica del sistema.

Los tanques para bajas temperaturas se pueden instalar subterráneos para aprovechar el valor de aislamiento de la tierra. También se usa el almacenamiento en tierra congelada. Esta tierra congelada forma el tanque. Algunas instalaciones que utilizan esta técnica no han tenido éxito, debido a la absorción excesiva de calor.

# CAPITULO 3

MATERIALES PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE RECIPIENTES  
DE PROCESO Y TANQUES

## ***INTRODUCCION***

Los metales tienen un conjunto común de propiedades que hacen que sean los más útiles de los materiales de ingeniería. No todos los metales tienen las mismas propiedades o propiedades al mismo grado. La mayor parte son sólidos a la temperatura ambiente, pero el mercurio es una excepción. En realidad, los puntos de fusión de diversos metales varían hasta más de 3300°C. Los metales son relativamente pesados, pero sus densidades varían dentro de amplios márgenes. Las superficies pulidas de metal muestran alto brillo, pero la mayoría se oxidan y corroen con rapidez.

La resistencia, dureza, resistencia al desgaste, resistencia al choque y la conductividad térmica y eléctrica son propiedades importantes de los metales. La mayoría de los metales son elásticos hasta cierto límite; se deforman en proporción al esfuerzo y regresan a su estado original cuando se elimina el esfuerzo. A esfuerzos elevados, se deforman de manera plástica. Algunos metales aceptarán una deformación plástica de alto grado antes de que fallen y otros muy poco.

## ***TRATAMIENTO TERMICO DE LOS METALES***

### ***PRINCIPIO DE TRATAMIENTO TERMICO***

El tratamiento térmico es un modo importante de cambiar la resistencia, dureza, ductilidad y otras propiedades de los metales. Es efectivo solo con ciertas aleaciones, ya que depende de que un elemento sea soluble en otro en el estado sólido en diferentes proporciones bajo ciertas circunstancias.

El endurecimiento (o aumento de la resistencia) se hace calentando una aleación a una temperatura suficientemente alta, dependiendo del material y enfriándolo con rapidez. Una solución sólida de los elementos de aleación se forma a la temperatura alta. Esta llega a ser sobresaturada por enfriamiento y se obtiene la dureza deseada controlando la descomposición de los constituyentes. En condiciones apropiadas, el soluto se dispersa en partículas finas en la malla de cristal y sirve para bloquear los movimientos de dislocación cuando se aplican esfuerzos. La resistencia añadida a los esfuerzos hace que el metal actúe con más fuerza y más dureza.

La cantidad de endurecimiento que tiene lugar en una aleación depende del tamaño, forma, distribución de las partículas y la cantidad de coherencia entre las partículas y la matriz. El tamaño, forma y distribución de las partículas resulta en forma principal por la dispersión del soluto en el material, la cual depende a su vez de la temperatura y del tiempo de calentamiento. En cada caso hay un tamaño óptimo de partícula que da el mejor resultado.

Las partículas grandes imponen obstáculos, pero están bastante separadas y las dislocaciones pasan entre ellas. Las partículas muy pequeñas no estorban mucho a los movimientos de las dislocaciones.

El grado de coherencia entre las partículas en la fase primaria tiene la mayor influencia en el endurecimiento. El endurecimiento se favorece si el límite entre las partículas y la matriz es coherente. Esto se denomina *endurecimiento por coherencia y es efectivo* dado que cada partícula distorsiona la malla espacial de la fase alrededor de ella misma y, por tanto, extiende su influencia en el bloqueo de movimientos de dislocaciones. Las zonas de influencia pueden superponerse. Hay *endurecimiento agregado* con partículas que tienen límites incoherentes con la fase primaria. Un ejemplo de ello son las placas (como en la perlita en acero) o partículas globulares. Las dislocaciones se impiden sólo parcialmente por partículas como estas y pasan fácilmente entre ellas.

Las aleaciones endurecidas por tratamiento térmico pueden dividirse en dos clases principales. Una clase es no *alotrópica* y se endurece con el tiempo o con tratamientos de precipitación. La otra es *alotrópica* (lo que significa que la estructura del cristal es diferente a temperaturas más altas que a temperaturas más bajas) y puede endurecer por la supresión de la descomposición de la estructura en el enfriamiento.

La primera clase contiene la mayor parte de las aleaciones no ferrosas y solo unas cuantas ferrosas; la segunda clase consta de los aceros y los hierros. Algunos metales, como ciertos aceros inoxidable, se tratan por calor mediante la combinación de los dos métodos. Lo inverso del endurecimiento, es el suavizado de los metales y se hace aplicando solo calor o por calentamiento y enfriamiento lento. Los efectos son juntar y hacer más gruesas las partículas dispersas, controlar el tamaño del grano y mejorar la ductilidad y la resistencia al impacto.

Los procesos comunes de esta clase son el recocido, normalizado y el revenido. Otros propósitos del tratamiento térmico son aliviar esfuerzos, modificar las propiedades eléctricas y magnéticas, aumentar la resistencia al calor y a la corrosión y cambiar la composición química de los metales (como por el carburizado del acero).

### *Tratamiento térmico de aleaciones no alotrópicas.*

Una aleación que no cambia la estructura de su malla cuando se calienta puede endurecerse si tiene una fase menor que es más soluble en la fase primaria a temperaturas mayores que a temperaturas inferiores. Dicha aleación se eleva a una temperatura que causa la disolución completa del soluto sin que se derrita ninguna fase o se provoque crecimiento excesivo del grano. Entonces, se enfría con suficiente rapidez para evitar la separación inmediata del soluto y se retiene la solución sólida, aun cuando la solubilidad sea mucho menor a temperaturas más bajas.

A continuación las partículas del soluto se precipitan en la aleación en lo que se llama *endurecimiento por precipitación*. En algunos casos esto puede ocurrir a temperatura ambiente en un periodo de tiempo y se denomina *envejecimiento natural* o *endurecimiento por edad*. Otras aleaciones pueden calentarse para lograr apresurar la precipitación en lo que se llama *envejecimiento artificial*.

Las aleaciones de aluminio-cobre por lo común son aleaciones endurecidas por precipitación. El aluminio y el cobre en combinación química forman aluminato de cobre,  $\text{CuAl}_2$ , que contiene cerca del 54% de cobre por peso. El cobre es soluble en el aluminio en la fase ( $\alpha$ ) que se muestra en la fig. 2-1. Algunos consideran que el aluminato de cobre está en solución. La proporción aumenta desde casi nada a temperaturas bajas hasta un máximo a  $548^\circ\text{C}$  de casi 5.5% de cobre. A temperaturas más bajas una porción se precipita como  $\text{CuAl}_2$ .

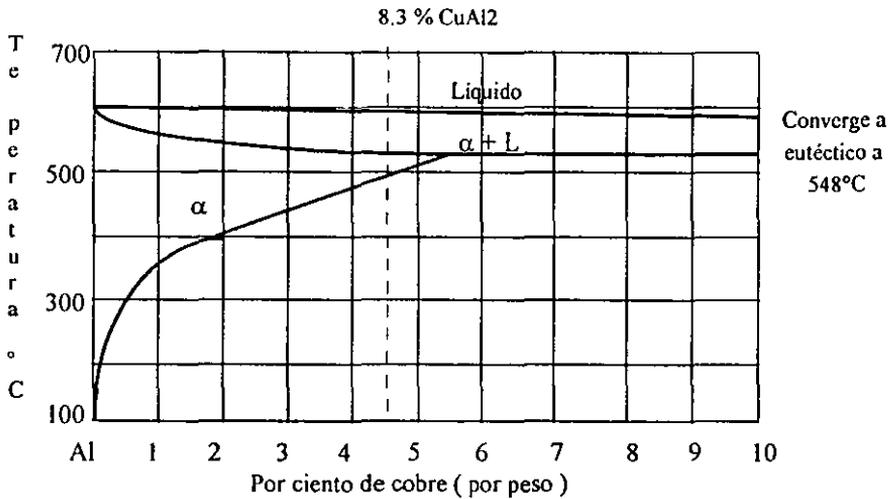


Figura 2-1. Diagrama de solubilidad del cobre en el aluminio

El aluminio 2024 es una aleación comercial importante que contiene 4.5% de cobre. Como primer paso en el endurecimiento recibe un tratamiento de solución al calentarse de  $490$  a  $500^\circ\text{C}$ . A esta temperatura casi todo el cobre está en solución en la fase  $\alpha$ . Para economía, el material se mantiene a la temperatura de solución no más de lo necesario para alcanzar la homogeneidad. El tiempo normal es una hora. Es importante que la temperatura se mantenga abajo de la temperatura de fusión eutéctica (en este caso  $502^\circ\text{C}$ ) que ocurre para una aleación de 33% de cobre en aluminio.

El aluminio tratado por solución se enfría rápidamente en agua clara limpia inmediatamente después del horneado. Mientras más rápida sea la velocidad de enfriamiento, más fuerte será el producto y resistirá más la corrosión después de la precipitación.

El aluminio 2024 envejece a prácticamente la resistencia máxima en 24 horas a 20°C después del enfriamiento rápido. Puede envejecerse a resistencia plena en dos horas a 175 °C. Otra aleación de aluminio (6061) toma 30 días a temperatura ambiente para envejecer por completo.

La mayoría de las aleaciones de aluminio son casi tan fáciles de formarse inmediatamente después del enfriamiento rápido como lo son en estado recocido; algunas son más susceptibles que otras. Por tanto, con frecuencia se doblan o enderezan en ese momento. El envejecimiento puede retardarse por refrigeración, y esto puede hacerse (como en los remaches) para mantener la facilidad de trabajar el material por más tiempo.

Una ventaja del endurecimiento por precipitación es que los costos son relativamente bajos. Muchos de los elementos de aleación son baratos, las temperaturas no son altas y los procedimientos son simples. Ya que las temperaturas no son altas, la distorsión, la formación de escamas y grietas se disminuye. Hasta la temperatura de precipitación la mayor parte de las aleaciones endurecidas retienen resistencia mejor que las aleaciones no tratadas.

Las aleaciones endurecidas por precipitación pueden recalentarse y enfriarse lentamente para suavizarlas. Las aleaciones de aluminio pueden recibir un *recocido para relevado de esfuerzos* o un *recocido completo*. En el primer caso, los efectos de endurecimiento por deformación pueden eliminarse en la mayoría de los casos por calentamiento a cerca de 345 °C. Para un recocido completo resulta un precipitado grueso y completamente espaciado por horneado durante dos horas de 415 a 440 °C seguido por enfriamiento lento.

## ***TRATAMIENTO TERMICO DE LOS ACEROS***

**Endurecimiento del acero.** El acero puede endurecerse debido a que el carbono es más soluble en la estructura cúbica de cara centrada a temperaturas altas (austenita) que en la estructura de cuerpo centrado (ferrita) a temperaturas bajas. Si el acero se calienta hasta la región austenita y se mantiene hasta que su carbono se disuelva y se enfría entonces con rapidez, el carbono no tiene oportunidad para escapar y queda atrapado como átomos dispersos o en partículas finas en una malla deformada a baja temperatura. Esto establece una estructura distorsionada (martensita) que es bastante dura y resistente, pero frágil.

Los cambios que ocurren cuando se enfría el acero desde los márgenes austeníticos pueden delinearse mediante los diagramas T-T o curvas S como las que se muestran en la figura 2-7. Estas son esquemáticas para un tipo de acero; cada análisis de acero tiene su propia curva S, y han sido publicadas muchas.

Muestran lo que sucede en el enfriamiento sin equilibrio, en contraste con los diagramas del hierro-carburo de hierro para condiciones de equilibrio. Cualquier tasa de enfriamiento puede denotarse con una línea como AB o AD en un diagrama.

En la figura 2-2 se ilustra una curva isotérmica de transformación para acero enfriado abajo de la temperatura crítica y sostenido por un periodo de tiempo mientras tiene lugar la transformación. No ocurren cambios en el área a la izquierda de la curva S. Por ejemplo, si el acero se enfría a una tasa denotada por AB y se sostiene a temperatura constante hasta el tiempo C, se transforma de una estructura austenítica a una perlita gruesa.

Si otra muestra se enfría con rapidez desde A hasta D, a la izquierda de la protuberancia de la curva S, no ocurre transformación. Entonces, si la muestra se mantiene a la temperatura D hasta el tiempo E, la estructura se transforma en bainita.

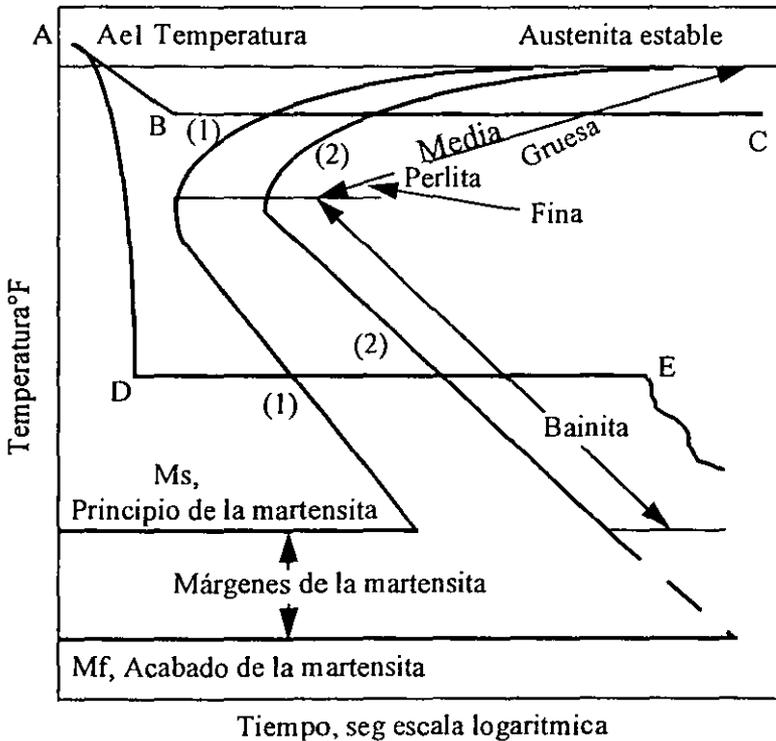


Figura 2-2. Diagrama de enfriamiento del hierro-carburo

Una *curva de transformación de enfriamiento continuo* como la que se ilustra en la figura 2-3. Es una curva S modificada. Muestra los cambios que ocurren cuando la austenita se transforma sobre una escala de temperatura y no a una temperatura. El diagrama isotérmico se dibuja líneas delgadas para comparación. La curva de enfriamiento continuo se representa por los límites de las áreas marcadas con sombra. Puede verse que la transformación principia después a temperaturas más bajas cuando el enfriamiento es continuo.

La formación de bainita puede no tomarse en cuenta para el enfriamiento continuo de los aceros al carbono y algunos aceros de aleación. Por tanto se omite la región de bainita en la figura 2-3. Se dan ejemplos de los cambios cuando el acero se enfría a diversas tasas para las líneas que se indican en la figura 2-3. El acero enfriado a la tasa indicada por AF está transformado todo en perlita de grueso medio.

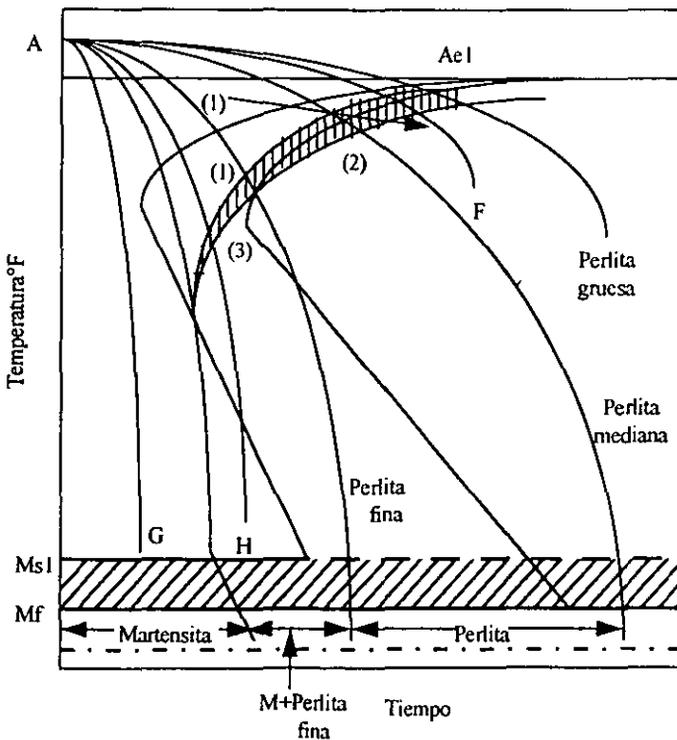


Figura 2-3. Curva de transformación de enfriamiento continuo.

Cualquier acero enfriado con rapidez a lo largo de una línea a la izquierda de la protuberancia de la curva, como la línea AG, se mantiene austenítico hasta que alcanza la temperatura  $M_s$ . Ahí principia a transformarse en martensita y la transformación es completa cuando se alcanza la temperatura  $M_f$ . La línea que pasa precisamente en la protuberancia de la curva representa la *tasa crítica de enfriamiento*. Si el enfriamiento tiene lugar a lo largo de la línea AH en la figura 2-3, la transformación en perlita fina puede ser completa sólo en forma parcial en el momento que se alcanza el límite designado (3).

Aquí es donde se detiene la transformación. La austenita restante cambia entonces a martensita abajo de la temperatura  $M_s$ . El resultado es una estructura mezclada martensítica y perlítica fina.

Mientras más baja sea la temperatura de transformación para un acero dado, más duro y resistente será el producto. Por tanto, la perlita media es más dura que la perlita gruesa, y la perlita fina es más dura que la perlita media. El espaciamiento más fino de la perlita ofrece más resistencia al flujo de las dislocaciones. Por la misma razón, la bainita es más dura que la perlita, y la martensita es la más dura. La bainita y la martensita contienen partículas diminutas y ampliamente dispersadas que representan aun más resistencia.

La máxima dureza obtenible en el acero enfriado bruscamente depende de la cantidad de carbono que contiene. Como se indica en la figura 2-4, no ocurre un endurecimiento apreciable con menos de 0.30% de carbono, y casi no hay aumento para más de 0.60% de carbono.

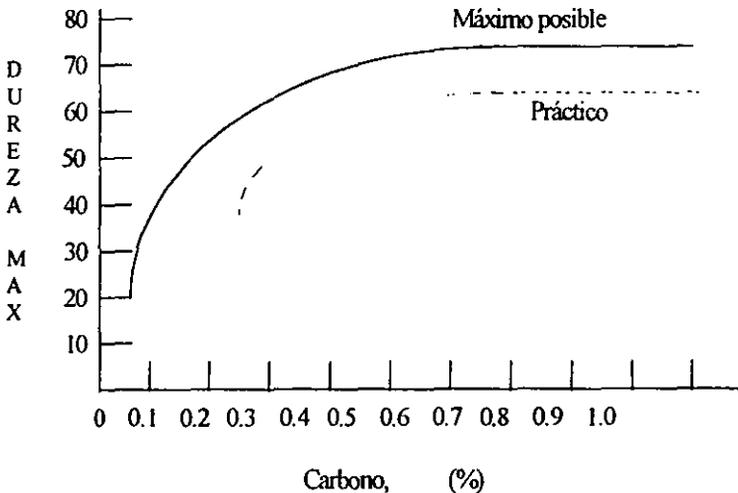


Figura 2-4. Diagrama de dureza del acero por enfriamiento brusco.

El acero al calentarse arriba de la línea  $A_3$  en la figura 2-4 y mantenerse ahí para disolver la cantidad deseada de carbono para el endurecimiento. Por lo común es suficiente no más de 30 a 50°C en la región de la austenita. Las temperaturas no deben ser más altas y hornearse más tiempo del necesario para evitar el engrosamiento excesivo del grano y quemar el acero. Una regla aproximada es permitir una hora de tiempo de calor a la temperatura final por pulgada de espesor en la sección más gruesa de una pieza de trabajo en acero.

**Enfriamiento rápido.** El calor puede eliminarse del metal caliente por inmersión en salmuera, agua, aceite o sales fundidas o plomo fundido, por exposición al aire o gases, o por contacto con masas metálicas sólidas. El agua y el aceite son los medios más usados para el enfriamiento rápido completo. Las piezas más grandes se enfrían con más lentitud, con más diferencias entre las velocidades de enfriamiento interior y exterior que en las piezas pequeñas. La severidad del enfriamiento brusco en agua agrieta algunas partes. El enfriamiento rápido en aceite es menos dañino, y el enfriamiento rápido al aire es aun mejor.

El enfriamiento en aceite y aire requiere aleaciones con facilidad de endurecimiento más alta, para hacer el acero tan duro como por el enfriamiento rápido en agua. En años recientes se han diseñado fluidos sintéticos libres de aceite en base de agua que dan resultados de enfriamiento rápido entre el agua y el aceite. El enfriamiento rápido establece esfuerzos que ondulan las piezas de trabajo, y es necesario tener precauciones para evitar las distorsiones.

Las partes de producción, como engranes con rayos delgados, pueden enfriarse bruscamente en dado. Esto significa que la pieza está sujeta con firmeza en un dado, en una prensa mientras se baja al medio de enfriamiento. El dado se hace para que tenga contacto y enfríe así áreas selectas y admita el enfriador a diferentes tasas en diversas secciones para regular la velocidad de enfriamiento y, de esta manera, la ondulación en toda la pieza. Las piezas de trabajo en caliente deben moverse con rapidez y con seguridad del dispositivo de calentamiento al medio de enfriamiento. Esto puede hacerse con tenazas de mano, una pieza a la vez, para trabajo de tarea. Para producción repetitiva, el trabajo puede movilizarse en transportador y las piezas grandes por grúas o carretillas. Las piezas pequeñas por lo común se manipulan en canastas de alambre o en sargas colgantes. El enfriador por lo común se agita o bate con vigor para lograr enfriamiento uniforme y puede circularse a través de serpentines de enfriamiento.

**Formas de endurecer el acero.** El enfriamiento rápido directo y completo como se ha descrito es la práctica más antigua y todavía es común. Es un procedimiento económico que da la más alta dureza inmediata. Las estructuras esenciales producidas son la martensita y la austenita retenida. Sus proporciones dependen del contenido de carbono y de la aleación, la temperatura de austenizado, el medio de enfriamiento rápido y la geometría de la parte. La práctica de algunos casos es congelar el acero a -70°C o más baja, para transformar la austenita retenida. Pocas partes se dejan en el estado como fueron enfriadas, ya que la *martensita fresca* es bastante frágil.

Cuando la martensita fresca se calienta abajo de la temperatura crítica, se vuelve más suave y más dúctil y se alivian los esfuerzos internos. Poco beneficio se obtiene abajo de 150°C. El cambio inicial es *martensita revenida*, en los márgenes de 150 a 175°C solo con cambios ligeros en las propiedades. La segunda etapa, aproximadamente de 175 a 370°C dependiendo del acero, se caracteriza por la transformación de la austenita retenida en bainita. El carbono de la martensita se supone que se combina en partículas finamente dispersadas de cementita. En la tercera etapa, desde cerca de 290 a 700°C, la cementita se aglomera y coalesce.

La estructura se convierte en agregado de perlita con cementita en esferas bastantes finas, referida como *martensita revenida* y *bainita revenida*. Las estructuras pueden llegar a ser más o menos esferoidizadas en forma uniforme por calentamiento prolongado en el margen superior del alcance. El recalentamiento después del enfriado brusco se llama *revenido*, pero algunos utilizan el nombre de alivio al recalentamiento abajo de 315°C.

La mejor combinación de resistencia, dureza, ductilidad y tenacidad para la mayoría de las aplicaciones puede obtenerse por el enfriamiento brusco del acero a martensita y revenido después como se desee. Esto debe hacerse sin retardo debido a que la martensita puede agrietarse. El revenido suaviza, pero tanto el tiempo como la temperatura determinan la dureza obtenida cuando el acero se reviene, como se muestra en la figura 2-5. Cada análisis de acero tiene su propio conjunto de curvas.

En este caso resulta cierta dureza por el calentamiento durante 5 horas a 205°C u 8 segundos de 370°C. La práctica recomendada es usar la temperatura más baja posible que dé los resultados requeridos dentro de un tiempo razonable.

La resistencia por lo común disminuye pero puede aumentarse a temperaturas bajas de revenido conforme se alivian los esfuerzos residuales. Mientras más alta sea la temperatura de revenido, se aliviarán más los esfuerzos del enfriamiento rápido, pero casi todo el beneficio se obtiene de 260 a 315°C. Conforme disminuye la dureza, aumenta la ductilidad, pero la tenacidad no mejora con uniformidad. Después de un aumento inicial conforme se eleva la temperatura, la tenacidad por impacto baja para la mayoría de los aceros antes de que empiece a elevarse otra vez. Esta baja tenacidad por lo común se obtiene del revenido de 200 a 370°C y se denomina *fragilidad azul* o *fenómeno de calor azul*, dado que ocurre a las temperaturas que dejan una película de óxido azul en el acero. Se adscribe a la precipitación de óxidos y nitruros. Si se desea tenacidad al impacto, el revenido debe hacerse a una temperatura más alta, y debe aceptarse una dureza menor.

La tenacidad de algunos aceros de aleación empeora si se enfría lentamente después del revenido en los márgenes de 450 a 600°C y se denomina *fragilidad de revenido*. Puede evitarse por enfriamiento brusco desde la temperatura de revenido. El *aumento de la tenacidad* es la denominación dada al revenido de 540 a 700°C cuando no se necesita alta dureza. Comúnmente, esto da la máxima tenacidad al impacto.

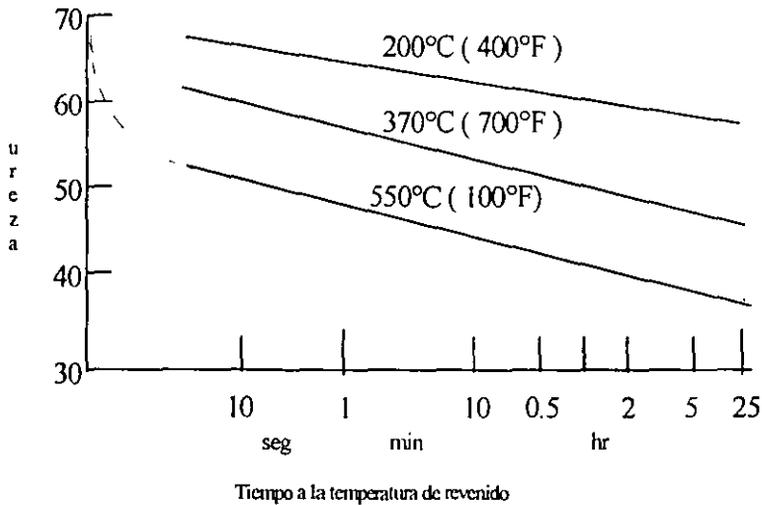


Figura 2-5. Revenido del acero.

El acero se trata térmicamente en otras formas además del enfriamiento brusco completo y revenido. En la práctica moderna se utilizan métodos de enfriamiento brusco interrumpido que mantiene el acero por un tiempo a temperaturas relativamente altas para igualar las temperaturas en el interior y el exterior. Esto ayuda a endurecer con uniformidad el trabajo por completo y elimina el agrietamiento y el alabéo.

El *revenido martensítico* o *enfriamiento martensítico* principia con el enfriamiento del acero austenizado en un baño de sales fundidas como se indica en la figura 2-6. Una pieza se mantiene en el baño precisamente arriba de la temperatura  $M_s$  (donde principia a formarse la martensita) hasta que la temperatura es por completo uniforme. Entonces se enfría la pieza en aire a través de la zonas de formación de la martensita. Esto en general es seguido por un tratamiento ordinario de revenido como se desee. El revenido martensítico se limita a secciones de acero al carbono menores de 6mm ( $\frac{1}{4}$  in) de espesor y funciona mejor con acero de aleación. Esto se debe a que la velocidad de enfriamiento del baño de sales es relativamente lenta, y no lleva al acero al carbono con facilidad más allá de la protuberancia de la curva S.

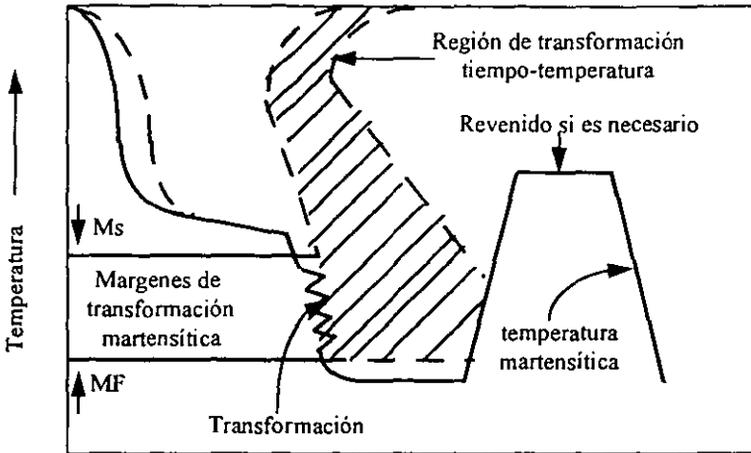


Figura 2-6. Enfriamiento del acero austenizado.

El acero se enfría en un baño calentado entre 150 y 425°C para el revenido austenítico, como se explica en la figura 2-7. El trabajo se sostiene entonces en el baño el tiempo suficiente para que la austenita se transforme en bainita en forma isotérmica. Entonces la pieza puede enfriarse a cualquier velocidad, no es necesario el revenido posterior. Puede obtenerse una dureza de 45 a 60 R<sub>c</sub> dependiendo del contenido de carbono y la temperatura de transformación.

Unos márgenes prácticos son de 50 a 55 R<sub>c</sub> con la ventaja de que en general se obtiene más tenacidad a esta dureza que por otros métodos.

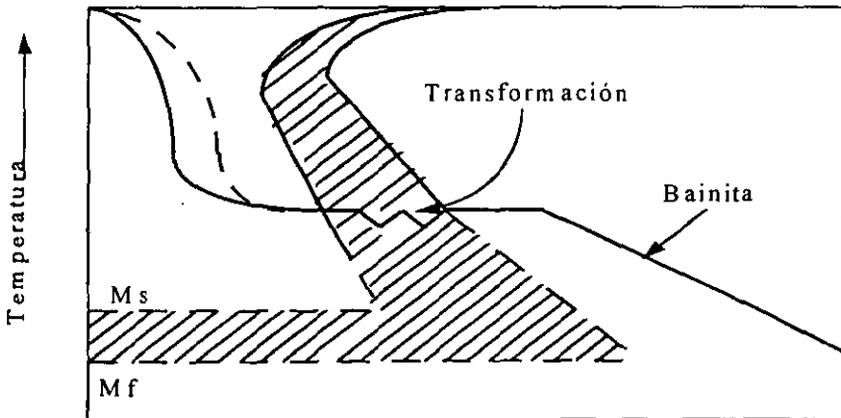


Figura 2-7. Diagrama revenido del acero austenizado

*Capacidad de endurecimiento del acero.* Varios aceros de composiciones diferentes pueden endurecerse por enfriamiento brusco en la misma forma exacta pero se encontrará que difieren tanto en intensidad como en profundidad de dureza. La *facilidad de endurecimiento* se requiere al grado y profundidad de la dureza obtenida en un tratamiento térmico. Cualquier austenita que se transforme en perlita se pierde en la transformación de martensita, y el endurecimiento disminuye por esa cantidad. La mayor facilidad de endurecimiento significa que más austenita se transforma en martensita y sus derivados. Los factores que están relacionados con la supresión de la perlita y, por tanto, con la facilidad de endurecimiento son:

1. Todos los elementos de aleación que se disuelven en la austenita (incluyendo el carbono a 0.9% pero no el cobalto) empujan la protuberancia de la curva S a la derecha (fig. 2-3) y hacen más fácil enfriar bruscamente los interiores lo mismo que los exteriores de las partes que pasan la zona de la perlita. En la figura 2-8 se muestra una comparación de facilidad de endurecimiento de un acero no aleado y uno aleado.
2. Una estructura homogénea de austenita aumenta la facilidad de endurecimiento al mantener uniforme la curva S.
3. Los granos austeníticos gruesos empujan la curva S a la derecha y aumentan la facilidad de endurecimiento.
4. Puede causar por el calentamiento del acero demasiado alto o demasiado tiempo antes del enfriamiento brusco, pero no son deseables granos gruesos debido a que se reduce la tenacidad del acero endurecido.
5. Los carbonos no disueltos y las inclusiones no metálicas en la austenita disminuyen la facilidad de endurecimiento ya que proporcionan núcleos para la formación de perlita fina.

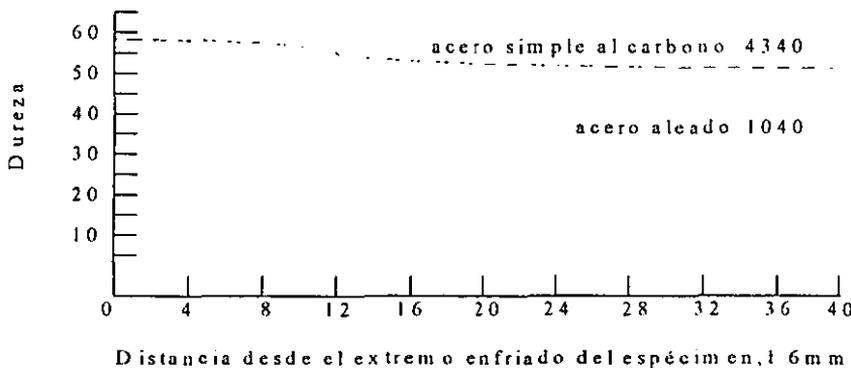


Figura 2-8. Diagrama de comparación de endurecimiento de un acero aleado y no aleado.

**Recocido del acero.** El recocido en su significado más amplio significa calentar un metal hasta donde ocurre un cambio y entonces se enfría lentamente. Una razón principal para el recocido es suavizar el acero, pero también sirve para aliviar esfuerzos, eliminar gases, alterar la ductilidad, la tenacidad o las propiedades magnéticas o eléctricas, o para refinar los granos. El propósito final puede ser preparar el acero para otro tratamiento térmico, trabajo mecánico o para cumplir las especificaciones del producto terminado. El papel del recocido en el tratamiento térmico se ilustra por el tratamiento lento a través de las regiones superiores de la curva S tal como a lo largo de la trayectoria AF que se muestra en la figura 2-3. Ya que son posibles muchas trayectorias y cada una da resultados algo diferentes, hay varias formas de realizar el recocido.

El *recocido pleno* consiste en calentar una aleación con base de hierro desde 30 a 55°C arriba de la temperatura crítica, manteniendo esta temperatura para calentamiento uniforme, y enfriamiento a una velocidad lenta controlada hasta la temperatura ambiente. El trabajo puede mantenerse en un horno perfectamente aislado con corte de calor o puede encerrarse en un material aislante como cenizas o asbestos.

El *normalizado* consiste en calentar cerca de 55°C arriba de la temperatura de transformación y enfriar en aire tranquilo. El propósito de normalizar un acero es obtener una estructura homogénea. Por lo común se imparte también dureza moderada y resistencia. El normalizado por lo general se hace para restablecer el acero dulce a su estado cercano al equilibrio después del trabajo en caliente, en frío o sobrecalentamiento. Las fundiciones de acero se normalizan para modificar la estructura del grano y aliviar esfuerzos. Las secciones delgadas pueden enfriarse con rapidez en esta forma y endurecerse en forma considerable.

El *recocido de proceso o comercial* consiste en mantener las aleaciones con base de hierro a una temperatura un poco abajo de la crítica de 2 a 4 horas y enfriar para obtener los resultados deseados. Se obtiene cierto suavizado, pero el beneficio principal es el alivio de *esfuerzos*. La operación algunas veces se denomina *alivio de esfuerzos*. La ventaja del proceso es que el alabeo de las secciones delgadas y la corrosión en la superficie y la formación de escamas son reducidas dado que pueden mantenerse bajas las temperaturas. El proceso tiene una amplia aplicación al preparar las láminas de acero y alambre para estirado o reembutido, para aliviar esfuerzos de soldaduras y fundiciones y para eliminar los efectos de fragilización del maquinado pesado y el corte con flama. Los trabajos grandes pueden calentarse localmente mediante soplete; las piezas más pequeñas en un horno.

El *ciclo de recocido* se realiza por el enfriamiento del acero austenizado a una velocidad para alcanzar una zona deseada de la curva S. El metal se mantiene a la temperatura escogida hasta que la transformación se completa. Entonces puede enfriarse el trabajo en cualquier forma práctica, por enfriamiento brusco o en aire, ya que no ocurre más transformación. La ventaja principal es el corto tiempo del ciclo; de 4 a 8 horas en comparación con 5 a 30 horas para el recocido convencional. La estructura final puede ser perlita o esferoidita (o mezcla de ambas), dependiendo de la selección de temperaturas y tiempo.

El *esferoidizado* es el nombre que se da al proceso cuando el carbón se colecta en partículas gruesas redondas de carburo, en especial en los aceros de alto carbono. Esta es una estructura deseable para maquinarse en vista de que las partículas duras de una matriz de ferrita suave se expulsan con facilidad por una herramienta cortante.

Tanto los aceros dulces como los colados se recosen esencialmente en las mismas formas y razones. Sin embargo hay una diferencia importante. Una fundición de acero solidifica con una estructura dendrítica gruesa y con segregación considerable. Esta estructura no se rompe ni se homogeniza como se logra trabajando un acero dulce. La estructura colada debe refinarse por tratamiento térmico.

Tanto el recocido completo como el normalizado pueden aplicarse. El primero da la máxima suavidad y ductilidad. El segundo proporciona subdivisión más fina de los granos dendríticos, más homogeneidad y más alta resistencia. Ciertos trabajos deben recocerse dos o más veces para corregir defectos (como gran falta de uniformidad) o para obtener resultados deseados. Un doble recocido típico consiste en calentar de 100 a 150°C arriba de la línea A<sub>3</sub> para difusión completa, entonces se enfría al aire abajo de la temperatura crítica para inhibir la separación de ferrita, seguido por recocido regular de 30 a 55°C arriba de la línea para refinar los granos y con enfriamiento lento final.

## ACEROS AL CARBONO

Los aceros al carbono son aquellos en los cuales el carbono es el elemento de aleación que controla en forma esencial las propiedades de las aleaciones y en los cuales la cantidad de manganeso no puede exceder de 1.65% y los contenidos de cobre y silicio deben ser cada uno menores de 0.60%. Los aceros al carbono pueden subdividirse en los que contienen entre 0.08 y 0.35% de carbono, los que tienen entre 0.35 y 0.50% de carbono y los que contienen más de 0.50% de carbono. Estos se conocen respectivamente como *aceros de bajo carbono*, *medio carbono* y *alto carbono*. El precio de los aceros depende de que el acero esté en barras, láminas, etc.

El *acero de bajo carbono* es relativamente suave y dúctil y no puede endurecerse en forma apreciable por tratamiento térmico. Representa el tonelaje más grande de todo el acero producido. Se usa para hoja de lata, láminas para carrocería de automóviles, alambre de cerca, elementos estructurales ligeros y pesados, y para barras acabadas en caliente y en frío que se utilizan para maquinarse partes. El acabado en frío mejora los acabados de superficie, las propiedades mecánicas y la facilidad de maquinado de esas composiciones.

El *acero al medio carbono* se usa para fundiciones de acero de alta resistencia y para forjas, como ejes de ferrocarril, cigueñales, engranes, ruedas de cangilones para turbina y brazos direccionales.

El acero al medio carbono puede endurecerse por tratamiento térmico, pero no puede endurecerse por completo en secciones cuyos espesores sean mayores de  $\frac{1}{2}$  in. El *acero de alto carbono* sirve para forjas como llaves de tuercas y ruedas de ferrocarril y para productos rolados en caliente, como rieles de ferrocarril y barras para refuerzo de concreto. Los productos de alambre de alta resistencia, como alambre de piano y cables de suspensión de puentes se hacen de acero al alto carbono. Las herramientas de acero al alto carbono están entre las herramientas más útiles de propósito general para aplicaciones como dados de estampados, martillos de forja, cinceles y hojas de rasurar.

## ACEROS DE ALEACIÓN

Los aceros de aleación contienen cantidades apreciables de elementos de aleación además del carbono. Incluyen (1) aceros estructurales de alta resistencia de baja aleación; (2) aceros de aleación para construcción de bajo carbono enfriados rápidamente y revenidos; (3) aceros de aleación AISI-SAE; (4) aceros de aleación para herramientas; (5) aceros inoxidables; (6) aceros resistentes al calor; y (7) aceros magnéticos.

Los *aceros estructurales de alta resistencia baja aleación* (HSLA) contiene elementos de aleación y carbono insuficiente para que puedan endurecerse con efectividad mediante enfriamiento rápido a martensita. Esto es ventajoso ya que posibilita que puedan soldarse sin que se vuelvan frágiles. Al mismo tiempo, los elementos de aleación que contienen, alteran la microestructura de modo que se asemeja a un acero al alto carbono enfriado a tasas moderadamente rápidas (enfriamiento rápido con soplo de aire). Además, estos aceros contienen ligeramente más fósforo y silicio que los aceros al carbono, por tanto refuerzan la red ferrita. Estos cambios en la microestructura elevan la resistencia a la cedencia a casi 40 a 50% arriba de la del acero estructural al carbono. Por tanto secciones más ligeras de costo más bajo pueden soportar una carga dada. Ya que la herrumbre y la corrosión aumentan su importancia conforme los tamaños de las secciones se vuelven más pequeños, particularmente en aplicaciones sin pinturas, los aceros HSLA pueden hacerse resistentes a la corrosión (hasta ocho veces más que el acero al carbono) mediante proporciones apropiadas de fósforo, cobre, silicio, cromo y molibdeno: en este papel, se conocen algunas veces como *aceros para intemperie*. Los aceros HSLA en forma típica se usan para vagones de ferrocarril, para ahorrar peso y para miembros estructurales de puentes y edificios, algunas veces para ahorrar pintura.

Una clase de aceros de baja aleación pero de alta resistencia es la de los *aceros de fase dual*. Estos tienen una microestructura de islas de alto carbono martensita-austenita (M-A) en una matriz de ferrita mucho más suave: se refuerzan en forma considerable cuando se trabajan y ofrecen reducción en peso en partes puesto que proporcionan alta resistencia con menos material. Por tanto, los aceros de fase dual han llegado a ser materiales importantes para láminas de metal en la industria automotriz.

Los *aceros de aleación para construcción de bajo carbono* para enfriamiento rápido y revenido también se conocen como *martensita de bajo carbono*.

Son similares a los aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación, excepto que su contenido de aleación permite el enfriamiento rápido a bainita o martensita. La martensita de bajo carbono de estos aceros retiene la tenacidad hasta -50°F, y estas composiciones producen juntas soldadas tan fuertes como el metal base sin soldar. Las martensitas de bajo carbono tienden a tener contenidos de aleación ligeramente más altos que los aceros de alta resistencia de baja aleación y además pueden contener elementos de aleación como B, V y Mo, todos los cuales contribuyen a la facilidad de endurecimiento y el V, Mo, y Ti forman carburos persistentes que resisten el suavizado bajo el revenido. Estos aceros se usan en formas de placas para construcción de recipientes a presión soldados y como elementos estructurales para estructuras grandes de acero y en equipo de minería.

Los *aceros de aleación* AISI-SAE son aceros cuyas composiciones se han estandarizado por el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE). Se usa un sistema de numeración con cinco dígitos para denotar las composiciones de la aleación: el contenido nominal de carbono se dan en centésimas de por ciento por las dos últimas cifras cuando se utilizan cuatro dígitos y por las últimas tres cifras cuando se emplean cinco dígitos.

Por tanto, 4140 y 52100 indican respectivamente contenidos de carbono de 0.40 y 1.00%. Los primeros dos números muestran que están presentes elementos de aleación, por ejemplo:

Metales ferrosos y aleaciones	
10xx	Acero simple al carbono
11xx	Acero resulturizado para maquinado libre
12xx	Acero refosforizados y resulturizados
13xx	Aceros al manganeso
2xxx	Aceros al níquel
3xxx	Aceros níquel cromo
4xxx, 8xxx, 43xx y 98xx	Aceros que contienen molibdeno solo o en combinación con níquel o cromo o tanto níquel como cromo
5xxx o 5xxxx	Aceros al cromo
6xxx	Aceros cromo y vanadio
92xx	Aceros manganeso y silicio
D0001-D9999	Especificación de propiedades mecánicas de aceros.
F0001-F9999	Hierro moldeado y acero moldeado
G0001-G9999	AISI y SAE aceros al carbón y de aleación
H0001-H9999	AISI H-aceros
J0001-J9999	Aceros moldeados (excepto aceros para herramientas)
K0001-K9999	Acero y misceláneo. Aleaciones ferrosas.
S0001-S9999	Acero resistente al calor y corrosión
T0001-T9999	Aceros para herramientas.

Tabla II. Sistema Numérico Unificado (UNS)<sup>(26)</sup>

Excepuados los aceros de bajo carbono, aceros simples al carbono, los aceros AISI-SAE se usan siempre en la condición de tratados térmicamente. Aunque los aceros de bajo carbono y acero simple al carbono se utilizan algunas veces en la condición sin endurecer, en otros casos se endurecen en la superficie por carburizado. Los aceros de aleación de bajo carbono AISI-SAE se usan para carburizar y se requieren algunas propiedades un poco mejores del núcleo y una mayor profundidad de endurecimiento. Los aceros que contienen más de 0.25% de carbono se utilizan con la condición de enfriamiento rápido y revenido. Los contenidos de alto carbono, hasta aproximadamente 0.60% de carbono, proporcionan martensita revenida de dureza mayor.

Los contenidos de alta aleación sirven para aumentar la profundidad a la cual se forma la martensita dura abajo de la superficie. En otras palabras, la máxima dureza que puede lograrse en función primaria del contenido de carbono y la proporción de la sección que puede endurecerse es una función principal del contenido de aleación, en particular del manganeso, molibdeno, cromo y níquel.

Los *aceros para trabajo en caliente* contienen cantidades apreciablemente grandes de formadores fuertes de carburos, los cuales resisten el suavizado a las temperaturas de operación. En estas composiciones se encuentran el cromo, tungsteno, molibdeno y vanadio. Sus contenidos de carbono están abajo de 0.65% , de modo que exhiben tenacidades buenas moderadas a niveles de altas resistencias. También se usan para dados de forja, dados de extrusión y dados para colado.

Los *aceros inoxidables* descansan principalmente en la presencia de cromo para lograr las cualidades de inoxidables. En general, mientras más alto sea el contenido de cromo, más resistente a la corrosión será el acero. Hay tres clases comunes de aceros inoxidables: (1) austenítico, (2) ferrítico y (3) martensítico, los nombres de estas clases reflejan la microestructura de la cual está compuesto en forma normal el acero.

Los elementos de aleación en el acero pueden clasificarse como estabilizadores de austenita y estabilizadores de ferrita. Los *estabilizadores de austenita* de importancia son el carbono, níquel, nitrógeno y manganeso.

Estos elementos mejoran la retención de la austenita conforme se enfria el acero. Cuando está presente 12% o más de manganeso, o cuando está presente 20% o más de níquel, es imposible enfriar el acero con la lentitud suficiente para permitir que la austenita se transforme en ferrita. Aun con contenidos mucho más bajos de níquel y manganeso la transformación es muy lenta y la austenita es estable a temperatura ambiente. Los *estabilizadores de ferrita* de importancia son el cromo y los formadores fuertes de carburos. Los estabilizadores de ferrita tienden a evitar la transformación del acero en austenita bajo el calentamiento. El que un acero sea austenítico, ferrítico o martensítico depende del balance entre las cantidades presentes de los estabilizadores de austenita y ferrita y el ciclo de calentamiento enfriamiento al cual se sujete el acero.

Los *aceros inoxidables austeníticos* se producen y usan en el tonelaje más grande. Aunque todos contienen níquel, en forma ocasional se usa el manganeso y el nitrógeno como sustitutos de níquel. Estos tres elementos son responsable de la estructura austenítica.

Los aceros inoxidables austeníticos contienen como todos los aceros inoxidables cromo, el cual es necesario para la resistencia de la corrosión. Con objeto de que el cromo sea efectivo para impartir resistencia a la corrosión, debe de estar en solución sólida en austenita. Estos aceros pierden su resistencia a la corrosión si el cromo existe en una segunda fase como el carburo de cromo.

El cromo tiende a precipitarse como carburo de la austenita en las fronteras de grano cuando los aceros inoxidables austeníticos se enfrían desde una temperatura cercana a 815°C. Esto empobrece la región de límite de grano del cromo necesario para la resistencia a la corrosión, y vuelve los límites de granos susceptibles a una forma de ataque conocida como *corrosión intergranular*. La resistencia a la corrosión puede restablecerse por calentamiento del acero por arriba de 815°C, seguido por enfriamiento rápido para evitar la formación de carburo de cromo, reteniendo por tanto el cromo en solución en la austenita. La soldadura da por resultados velocidades de enfriamiento cercanas a la soldadura que conduce a la sensibilización del acero inoxidable austenítico al ataque intergranular.

Si la estructura no se presta por sí misma al calentamiento subsecuente y al enfriamiento para la restauración de la resistencia a la corrosión, deberán usarse grados especiales de aceros inoxidables austeníticos. La modificación más simple es un grado más bajo de carbono, en el cual el máximo contenido permitido de carbono esté abajo de 0.03% de carbono. Habrá entonces precipitación de cromo insuficiente para ser dañina. El carbono también se vuelve inocuo por la adición de elementos de aleación que tengan tendencia mayor a formar carburos que el cromo, dejando por tanto el cromo en el estado sin combinar. Los elementos que logran esto incluyen el titanio, columbio y molibdeno. Los aceros inoxidables austeníticos que contienen esos elementos se conocen como *grados estabilizados*.

Los *aceros inoxidables ferríticos* contienen cromo, no tienen níquel y toleran pequeñas cantidades de carbono que estabiliza la austenita. Si se aumenta el contenido de carbono, debe aumentarse el contenido de cromo con objeto de mantener el balance y una estructura ferrítica. En esta condición balanceada esos aceros pueden calentarse al punto de fusión sin transformar la austenita. Por tanto es imposible endurecerlos por enfriamiento rápido y revenido.

Los *aceros inoxidables martensíticos* contienen cantidades balanceadas de cromo (estabilizador de ferrita), carbono y níquel (estabilizadores de la austenita), de modo que bajo calentamiento del acero se vuelve austenítico, pero bajo el enfriamiento tiende a revertir a ferrita. Estas composiciones pueden calentarse al alcance austenítico de temperatura y se transformaran a martensita al enfriarse a las velocidades adecuadas. El contenido de carbono es suficiente para producir una dureza martensítica la cual es adecuada para cuchillería e instrumentos quirúrgicos.

Los aceros austenicos inoxidables cuestan cerca de diez veces más que el acero ordinario y se usan donde son criticas la resistencia a la corrosión, la resistencia a alta temperatura y la resistencia a la oxidación. La maquinaria textil, el equipo químico, el equipo para procesos de alimentos y guarniciones arquitectónicas son ejemplos de las aplicaciones de los aceros inoxidables austenicos. Los aceros inoxidables ferriticos se usan en las aplicaciones donde puede tolerarse una resistencia más baja y resistencia a la corrosión, como en molduras para carrocerías de automóviles. Los aceros austenicos cuestan aproximadamente entre siete y ocho veces más que el acero al carbono.

## FORJA

La forja es el formado del metal, principalmente en caliente, por aplicaciones individuales e intermitentes de presión en lugar de aplicarle presión continua como en el rolado. Los productos generalmente son discontinuos también, tratados y entregados como piezas unitarias más bien que como flujo de masa. El proceso de forja puede trabajar metal comprimiendo su sección transversal y haciéndolo más largo, o apretándolo en sentido longitudinal y aumentando su sección transversal, o apretándolo en su parte interna y haciendo que se conforme a la forma de la cavidad (ver figura 2-9).

La forja puede hacerse en dados abiertos o cerrados. En forma nominal las forjas en dado abierto se comprimen entre dos superficies planas o en la práctica los dados algunas veces tienen la forma de V, semirredondos o semiovais.

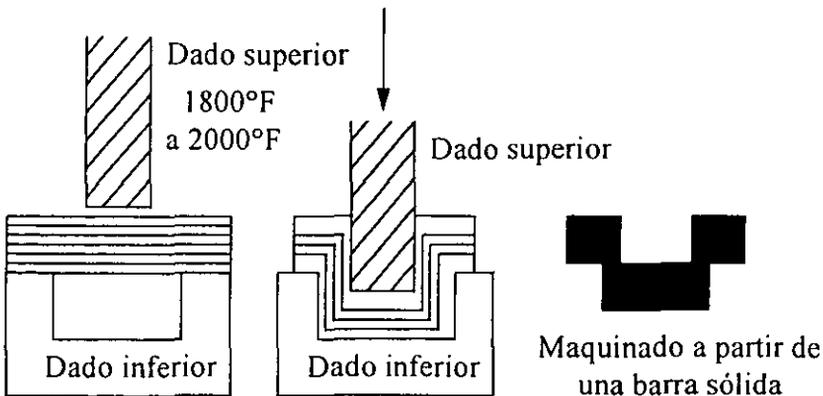


Figura 2-9. Proceso de forjado.

Las forjas en dado cerrado se forman en cavidades de dado. Todas las forjas requieren habilidad, pero se requieren más con los dados abiertos que con los cerrados. Con un dado cerrado se obtiene producción más rápida y tolerancias más estrechas. Los dados abiertos son, por supuesto, mucho menos costosos que los dados cerrados y son más económicos para unas pocas partes. En la mayoría de los martillos y prensas pueden hacerse forjas en dados ya sea abiertos o cerrados.

*Calentamiento del trabajo.* Es importante que una pieza de material se caliente de manera uniforme por completo y a la temperatura apropiada para la forja. Los márgenes de temperatura apropiada para el acero se han indicado en la figura 2-10. El calentamiento se hace en hornos de tamaños diversos adecuado a las necesidades específicas y en formas desde forja con llama abierta hasta hornos revestidos con refractarios controles y atmósferas, temperaturas, transportadores y hogares rotatorios. Un horno promedio cuesta aproximadamente \$20,000 dólares. Las líneas automatizadas para forja en grandes cantidades comúnmente emplean calentadores de inducción o por resistencia eléctrica.

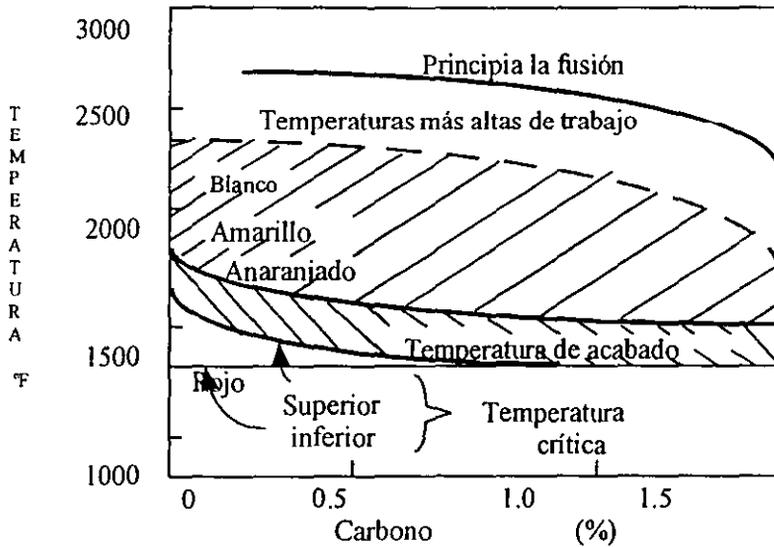


Figura 2-10. Diagrama de temperaturas apropiadas para el proceso de forjado.

*Forja en martinete.* Forja en martinete es el nombre dado a la operación de formar partes calientes en un martinete con dados de impresión o cavidad. Los productos se conocen como *forjas en martinete, forjas en dado cerrado o forjas en dado de impresión.* Se hacen de acero de aleación y al carbono y aleaciones de aluminio, cobre, magnesio, níquel y otros metales.

El material en la forma del extremo calentado de una barra, trozo, preforma o lupia individual se coloca en una cavidad en la parte central del fondo de un dado de forja en el yunque de un martinete. La mitad está fijada al martillo o ariete y cae en el material.

Generalmente, una forja terminada no puede formarse en un solo golpe debido a que las direcciones y la extensión a las cuales el metal puede forzarse en una sola pieza son limitadas. Por tanto la mayoría de los dados tienen varias impresiones, cada una es un paso hacia la forma final. La pieza del trabajo se transfiere de una impresión a otras entre golpes. Primero se forma el *sostén para tenaza* en la esquina frontal de la derecha del bloque dado. Entonces el material se gira entre un número de golpes y se alarga en la esquina y en el lado izquierdo del bloque. Este paso se llama *retacado*. La pieza puede aplanarse entre la superficie del dado antes de que sea *bloqueada* o darle la forma burda en la cavidad de la derecha.

Por último el metal preformado se golpea a la forma final en la cavidad de la izquierda en la operación de *terminado*. El metal en exceso está comprimido en una brida delgada alrededor de la forja llamada *rebaba*. Esta se corta de la forja en una operación subsecuente de recortado. En realidad, la rebaba es material de desperdicio y aumenta las fuerzas de forjado de 5 a 10 veces. Se han hecho esfuerzos para eliminarla, pero entonces el llenado del dado requiere control estrecho de la materia prima y esto usualmente es más costoso. La mayor parte de la forja se hace con dado sin calentar, pero algunas veces se usan dados calentados a 850°C. El trabajo se enfría menos, permanece plástico más tiempo. Por tanto puede forjarse a tolerancias más estrechas con secciones más delgadas. El dado establece la eficiencia de una operación y su diseño requiere un alto grado de habilidad. Algunos dados son colados, pero la mayoría están hechos con bloques pesados de acero de aleación forjado y sometido a tratamiento térmico a menos de la dureza máxima pero a una tenacidad que resiste el impacto. Las cavidades se cortan o se *hunden* para tolerar la contracción de la pieza de trabajo cuando se enfría.

Además del tamaño, un dado se diseña para producir una forja con un mínimo de esfuerzo residual y el máximo beneficio de las fibras originales de grano de la barra. Esto requiere estaciones suficientes pero no demasiadas, como se dicte con un estudio cuidadoso de caso. El dado está provisto de salidas y conicidades para liberar la pieza de trabajo con facilidad y con lotes generosos de radios y costillas para prolongar la vida del dado. En ocasiones se proporcionan superficies de cierre o pasadores para hacer que las dos mitades de un dado se hermanen en la misma forma cada vez que llegan a estar juntas. Pueden proporcionarse impresiones múltiples en dados en cada estación para forjar varias piezas en cada operación para producción en grandes cantidades.

## ***SOLDADURA DE LOS RECIPIENTES A PRESION***

La soldadura es el método más comúnmente usado para la unión de metales. En las pruebas de estallido se ha demostrado que la soldadura es más resistente que la placa misma de la cubierta. Sin embargo, el trabajo de soldadura deberá efectuarse con soldadores competentes. Se usan diferentes procesos de soldadura. Quizá la soldadura de arco es la más utilizada en la construcción de recipientes. El arco se produce entre el electrodo metálico y el metal de base.

El calor producido causa la fusión del electrodo y parte del metal de la base que está próximo al arco. Las varillas de soldadura (electrodo) son cubiertas con un fundente que cuando se calienta, produce un gas inerte alrededor del arco y deposita una cubierta protectora sobre el cordón de soldadura protegiéndolo contra la corrosión. La soldadura de arco puede hacerse en forma manual o automática. Las máquinas automáticas de soldar se usan con mucha ventaja cuando se tienen cordones de soldadura longitudinales y circunferencial de tamaño grande. Para cordones circunferenciales, el soplete permanece fijo y el cilindro tiene movimiento. Para cordones longitudinales se sigue el procedimiento contrario.

La soldadura oxiacetilénica es muy común, sobre todo para soldar placas de poco espesor y piezas pequeñas. Además, la soldadura con oxiacetileno es muy usada en el taller para fabricación de recipientes, usándola también para otros propósitos. Algunos de sus usos son: endurecimiento de partes pequeñas mediante el calentamiento de la flama, para hacer cortes y para el soldado por puntos de algunas secciones antes de la soldadura de arco automático. Se usa también la soldadura de gas con latón que consiste en la unión de metales con materiales no ferrosos, sin que ocurra la fusión del metal base. Hay otros procedimientos para la soldadura, tales como el de hidrógeno atómico, soldadura de latón por resistencia, soldadura aluminotérmica y de arco sumergido que se usa en ciertos trabajos especiales.

En la soldadura de recipientes, generalmente se requiere la aplicación de varios cordones superpuestos de soldadura. Esto debe hacerse con mucho cuidado. Después de haberse aplicado el primer cordón de soldadura, la superficie de éste deberá limpiarse y examinarse cuidadosamente antes de proceder a la aplicación del segundo cordón que va superpuesto, para estar seguro de que tenga buena penetración. Hay que evitar grietas e inclusión de escorias que pueden debilitar la unión. Por debajo de un buen cordón final de soldadura podrá ocultarse una falla del cordón inferior de soldadura.

***Metalurgia de la soldadura.*** El calor de la soldadura afecta la microestructura y composición tanto de la soldadura como del metal base, causa expansión y contracción y deja tensiones en el metal. Es necesario saber que es lo que sucede en el metal cuando se suelda para comprender la operación de soldadura.

En la figura 2-11, se muestra una sección transversal de una soldadura típica enfriada. La masa central, indicada por la letra A, está constituida por el metal fundido. Tiene una estructura ramificada característica del fundido, lo que es en esencia. Cuando el metal se solidifica, se enfría desde el exterior hacia adentro y los cristales crecen hacia el centro. Con una aleación ocurre cierta segregación de los constituyentes. La unión de las ramificaciones en el centro es débil, aunque no es lo tanto en un metal dúctil, como el acero. El enfriamiento lento o el recocido posterior mejoran la homogeneidad y fuerza. En una soldadura, el metal base adyacente al metal fundido se calienta arriba de la temperatura crítica. Esto se ve en la zona B de la figura 2-11. El acero así calentado se recristaliza en austenita alrededor de muchos núcleos y forma granos pequeños. Los granos crecen a temperaturas más altas y la estructura se vuelve basta. El metal más cercano al charco de metal fundido llega al punto de fusión y se vuelve muy burdo. La estructura es más fina mientras más alejada esté del centro. Más allá, en la zona C, no cambia el metal base.

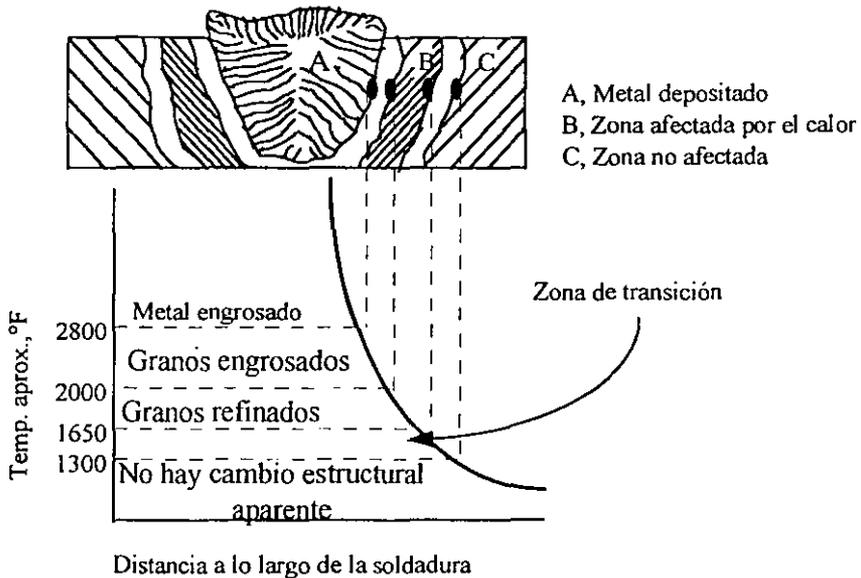


Figura 2-11. Proceso de soldadura.

El acero de grano burdo se endurece con mayor rapidez que una estructura más fina del mismo metal y composición. En la mayoría de los metales no ferrosos, una estructura fina es más dura y fuerte que una burda por que los granos finos presentan más puntos de resistencia al deslizamiento.

La soldadura tiende a endurecer los aceros al alto carbono y las aleaciones del mismo metal. En piezas gruesas, la soldadura de zona es normalmente un pequeño punto dentro de una gran masa de metal más frío. El calor sale rápidamente del metal a los alrededores. Cuando se retira la fuente de calor, resulta lo que se llama una *masa templada*.

Esto hace que se forme martensita dura en el acero endurecible en una parte o en toda la zona calentada arriba de la temperatura crítica. La formación de martensita causa agrietamiento y debe evitarse. Mientras más endurecible sea el acero, más lenta deberá de ser la velocidad de enfriamiento.

La velocidad a la que se dispersa el calor depende de la masa del metal, de los alrededores y de la diferencia de temperatura entre la zona soldada y la pieza de trabajo. Las secciones delgadas, con poca masa, tienen pocos problemas para enfriarse con rapidez. Es posible estimar la velocidad de enfriamiento para una sección gruesa a partir de un diagrama tiempo-temperatura del material. Se puede elevar la temperatura de la pieza de trabajo para retardar el enfriamiento si se precalienta la pieza de trabajo con calor medio pero penetrante como se hace la soldadura. La pieza de trabajo se puede calentar en su totalidad o sólo localmente; en cualquier caso, el precalentamiento aumenta substancialmente el costo de operación. Una autoridad prescribe que todas las secciones de acero que tengan más de 40 mm de grueso deben precalentarse.

Evítese el enfriamiento brusco de las piezas soldadas en los metales endurecibles, aunque con otros materiales resulte beneficioso. Durante un tiempo breve se expone el metal a la contaminación con gas, la zona afectada por el calor es más pequeña, la estructura del grano es más fina y con frecuencia resulta una soldadura con mayor fuerza.

Algunas aleaciones de aluminio y otros materiales no ferrosos se endurecen en presencia de agentes clave que se disuelven al calentarse. La estructura de esos metales puede quedar alterada en la vecindad de la soldadura y puede resultar necesario un tratamiento térmico posterior para lograr las propiedades deseadas en todo el material.

**Control de calidad de la soldadura.** Lo que se ha mostrado que sucede en una soldadura explica las fallas que puede tener la soldadura, así como sus correcciones. Estas fallas son distorsión y encogimiento, grietas, huecos e inclusiones, socavaciones y cráteres, así como corrosión.

El calentamiento y el enfriamiento causan expansión y contracción en diferentes lugares conforme se hace la soldadura a lo largo de la junta. El metal de la unión es más caliente y tiende a encogerse más al enfriarse que el resto de las piezas en ambos lados. Sin embargo, a lo largo el encogimiento se ve restringido por el metal adyacente a la junta, que induce una resistencia a la tracción residual a lo largo de la junta que puede exceder el punto de rendimiento de material.

Esto hace que algunas fibras paralelas del metal base se compriman ligeramente. Si las piezas que se sueldan están sujetas por un accesorio o por la estructura a la que pertenecen, la contracción del metal cuando se enfría en la zona de soldadura induce tensiones en cualquier dirección, causando con ello agrietamiento. Incluso si no ocurre el agrietamiento, las tensiones residuales pueden deteriorar significativamente la resistencia a la fatiga y es común que cause alabeamiento, en especial cuando quedan desequilibradas por el maquinado posterior.

El recocido, llamado *postcalentamiento*, es uno de los medios usados para disminuir esas tensiones, pero no siempre es deseable porque afecta las propiedades del metal base de las partes. Se encontró que el martilleado incrementa la resistencia a la fatiga de las soldaduras más que el tratamiento calorífico. En esta forma, la vida por fatiga puede devolverse al nivel de la vida del material no soldado.

En el diseño y práctica de la soldadura puede hacerse mucho para conseguir que rindan los componentes de una soldadura y sólo un poco menos para aliviar las tensiones y el alabeamiento. Entre las formas efectivas se encuentran el uso de un material delgado y de tan poco material o metal de aporte como sea posible, precalentar para minimizar las diferencias de temperaturas entre la soldadura y el material base y soldar desde el interior o desde una parte confinada de una estructura hacia el exterior o hacia los puntos de mayor libertad. La soldadura manual es inherentemente variable; la soldadura automática permite un mejor control de calidad.

**Grietas, huecos, socavamientos y cráteres.** Una soldadura agrietada es defectuosa y normalmente se rechaza. Las grietas pueden ocurrir tanto en el metal de la soldadura como en el metal base, a lo largo o normales con respecto a la soldadura. Se producen durante o después de la soldadura. En el acero soldado, la principal causa del agrietamiento es la martensita que se forma. La martensita es quebradiza y no cede sino que se rompe cuando las tensiones de la soldadura se vuelven demasiado elevadas. Más aún, la martensita aumenta los esfuerzos y tensiones resultantes. Tiene una densidad menor y ocupa mayor volumen que el acero más suave a partir del cual se forma. Las medidas que se describieron con anterioridad para prevenir el endurecimiento y minimizar las tensiones, también son eficaces para prevenir el agrietamiento.

La soldadura se encoge mientras se enfría. Si se impide que se muevan los miembros unidos, se inducen tensiones altas a través de la soldadura. Un reborde o costura cóncava tiene tensiones más altas, en particular en la superficie, y es menos deseable que un reborde convexo. Una soldadura profunda y estrecha en exceso también está sujeta a tensiones elevadas. Si las tensiones son altas, deterioran la resistencia a la fatiga y causan agrietamiento. Un reborde puede verse debilitado si se usa un metal de aporte diferente del metal base en el caso de que haya una diferencia en las velocidades de expansión. Esto suele suceder, por ejemplo, si se usa como aporte acero para soldar hierro fundido o colado.

Algunas aleaciones se debilitan y agrietan a las temperaturas de soldadura. Como ejemplo, las aleaciones de magnesio con más de un 0.15% de calcio tiene un constituyente límite de grano con un punto de fusión bajo. Esto causa con frecuencia agrietamientos de la soldadura. La solución consiste en cambiar y controlar el material en bruto. La formación de aleaciones intermedias promueve el agrietamiento si se sueldan metales no semejantes. En el acero, una de las causas principales del agrietamiento es el hidrógeno. El hidrógeno es muy soluble en el acero caliente pero al enfriarse este se ve expulsado en su mayoría. Si el gas no puede escapar ejerce presión y agrieta el metal. Es posible que esto suceda en las mismas condiciones que forman la martensita quebradiza, con lo que se agrava el agrietamiento de esta. Los electrodos y fundente con un poco de hidrógeno, la limpieza, el precalentamiento y el enfriamiento lento permiten que el hidrógeno escape y ayudan a eliminar el agrietamiento debido al mismo.

Los ensayos muestran que los huecos de hasta un 7% de sección transversal no cambia mucho la resistencia a la tracción o al impacto y la ductilidad de una soldadura. En más de esa cantidad, las inclusiones de materia extraña, los agujeros y las bolsas de gas debilitan apreciablemente la soldadura y actúan elevando la tensión, con lo que se difunden las grietas. De ordinario, las inclusiones son escoria, pero también pueden ser escamas y suciedad. La grasa, el aceite o la pintura que se dejan sobre las superficies liberan gases cuando se calientan. Para evitar la contaminación, deben limpiarse las superficies antes de soldar. La mayor parte de la soldadura se hace protegiéndola de los gases de la atmósfera.

*Un socavamiento* es una ranura fundida en el metal base a lo largo de un borde. Un *cráter* es la depresión que queda en el extremo de un reborde. Estas dos cosas pueden ser puntos débiles en soldadura altamente reforzada. Pueden impedir la aplicación de procedimientos apropiados de soldadura.

*Corrosión.* En diversas formas, la soldadura hace que los metales sean más susceptibles a la corrosión. En realidad, la corrosión ocurre desde el momento en que el aire ataca el metal caliente de la soldadura si la protección no es la adecuada. El intenso calor producido por la soldadura destruye los revestimientos protectores y de conversión de las superficies metálicas. Los metales enchapados habrán de soldarse con la misma composición que el metal de la superficie, al menos en la parte superior de la soldadura. Desde el punto de vista del diseño, las superficies internas de una junta traslapada son difíciles de proteger de la corrosión. Las muescas y grietas que vienen con la soldadura son focos de corrosión. El calor de la soldadura causa cambios en algunos metales y los hace más susceptibles a la corrosión. La soldadura puede hacer que el acero inoxidable pierda su resistencia a la corrosión.

*Inspección de las juntas soldadas.* Las juntas soldadas se someten a ensayos o pruebas destructivas o no destructivas. Las pruebas destructivas pueden hacerse sobre una base de muestreo o de espécimen. Con frecuencia, la inspección visual es la única forma de comprobar las soldaduras.

En esta forma se puede estimar o juzgar debido a que la buena calidad de la mano de obra destaca por sí sola en soldaduras uniformes, formadas y llenadas adecuadamente y con frecuencia esto es la mayor seguridad de calidad. La inspección debe comenzar en la sala de soldadura al detectar métodos y procedimientos imperfectos que causen defectos. Se ayuda a lograr esto si se diseñan los conjuntos de piezas soldadas de manera que las soldaduras sean accesibles tanto como sea posible para la inspección.

Existen varios sistemas que especifican cómo deben inspeccionarse las soldaduras y cuáles son los defectos permisibles (ver pág.73). Una de las ideas subyacentes es que la cantidad de tiempo y esfuerzo empleados en la soldadura de una pieza y en la inspección de los resultados dependerá de la severidad del servicio a la que se sujete el producto. La soldadura de una parte que va a resistir tensiones elevadas en condiciones críticas habrá de ser de mejor calidad que la de una parte a la que se va a sujetar en condiciones más ligeras.

## CORROSIÓN

En la selección de materiales de construcción para un sistema dado de fluido, es importante tomar en consideración primero *las características del sistema*, prestando atención especial a los factores que pueden influir en la corrosión. Puesto que esos factores serán peculiares para un sistema en particular, es importante tratar de ofrecer aquí un conjunto de reglas empíricas seguras que cubran todas las situaciones.

Los *materiales* con que se construirá el sistema son la segunda consideración más importante. Por consiguiente, es esencial tener conocimiento sobre las características y el comportamiento general de los materiales cuando se ponen en ciertos ambientes. A falta de información real sobre la corrosión, para un conjunto particular de condiciones de fluido, sería posible una selección razonablemente buena a partir de datos basados en la resistencia de materiales en un ambiente muy similar. No obstante, esos datos se tienen que utilizar con cierta reserva. Las buenas prácticas exigen la aplicación de esos datos a la selección preliminar. Los materiales escogidos de ese modo requerirán un estudio más amplio en el sistema de fluido que se esté tomando en consideración.

*Materiales metálicos.* Los metales puros y sus aleaciones tienden a unirse *químicamente* con los elementos de un medio corrosivo para formar compuestos estables similares a los que se encuentran en la naturaleza. Cuando se producen pérdidas de metales de este modo, el compuesto que se forma se denomina producto de corrosión y se dice que la superficie del metal está corroida. La corrosión es un fenómeno complejo que puede tomar una o varias formas. Por lo común, se limita a la superficie del metal y esto se conoce como corrosión general; pero hay veces en que tiene lugar a lo largo de límites de granos u otras líneas débiles, por diferencias en la resistencia a los ataques o una acción electrolítica local.

Según el concepto *electroquímico*, la reacción completa de corrosión se divide en una porción anódica y otra catódica, que se producen simultáneamente en puntos discretos sobre las superficies metálicas. Se puede generar un flujo de electricidad de las zonas anódicas a las catódicas, mediante celdas locales colocadas ya sea en una superficie metálica simple (por diferencia locales de punto a punto sobre la superficie) o entre metales distintos.

*Materiales no metálicos.* Como se indicó, la corrosión de los metales se aplica específicamente a los ataques químicos o electroquímicos. El deterioro de los plásticos y otros materiales no metálicos, propenso al hinchamiento, el resquebrajamiento, el destemplado, el ablandamiento, etc., es esencialmente *fisicoquímico* más que electroquímico. Los materiales no metálicos se pueden deteriorar con rapidez cuando se exponen a un ambiente dado, o bien en el otro extremo, se pueden ver prácticamente poco afectados.

En ciertas condiciones, un material no metálico puede tener evidencias de deterioro gradual; sin embargo, raramente resulta posible evaluar su resistencia química sólo con las mediciones de pérdida de peso, como se hace en general en los metales.

## **FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN**

**Acidez de la solución.** Puesto que la descarga de iones hidrógeno tiene lugar en la mayoría de las reacciones de la corrosión, un factor sumamente importante es la acidez de una solución representada por la concentración de iones hidrógeno (pH). Asimismo, por regla general, las soluciones ácidas son más corrosivas que las neutras o las alcalinas. En el caso del acero y el hierro ordinario, la línea divisoria entre la corrosión rápida en las soluciones ácidas y las moderada o lenta, en las soluciones casi neutras o alcalinas, se produce a, aproximadamente, un pH de 4.5. Con los metales anfotéricos como el aluminio y el zinc, las soluciones muy alcalinas pueden ser todavía más corrosivas que las ácidas. La tendencia que tienen los metales a corroerse mediante el desplazamiento de iones de hidrógeno de soluciones se indica de modo general por sus posiciones en la *serie electromotriz*.

**Agentes oxidantes.** En algunos procesos de corrosión, como la solución de zinc en ácido clorhídrico, puede evolucionar hidrógeno como gas. En otros, como la solución relativamente lenta de cobre en cloruro de sodio, la remoción de hidrógeno, que se tiene que producir para que se lleve a cabo la reacción entre el hidrógeno y algún producto químico oxidante, como el oxígeno, para formar agua. Debido a los índices elevados de corrosión que suelen acompañar a la evolución de hidrógeno, es raro que se usen metales en solución donde evoluciona hidrógeno a un índice apreciable. Como resultado, la mayor parte de la corrosión observada en la práctica se produce en condiciones en que la oxidación del hidrógeno para formar agua es una parte necesaria del proceso de corrosión.

Por esta razón, los agentes oxidantes son con frecuencia aceleradores poderosos de la corrosión y, en muchos casos, *el poder oxidante de una solución* es su propiedad simple más importante, en lo que se refiere a la corrosión. Los agentes oxidantes que aceleran la corrosión de algunos materiales pueden también retrasar la corrosión de otros, mediante la formación en su superficie de óxidos o capas de oxígeno adsorbidos, que los hacen más resistentes a los ataques químicos. Esta propiedad del cromo fue la base de las principales características de resistencia a la corrosión que tiene los aceros inoxidables.

De esto se desprende que las sustancias oxidantes, como el aire disuelto, pueden acelerar la corrosión de una clase de materiales y retrasar la de otros. En el último caso, la conducta del material representa por lo común un equilibrio entre el poder de los compuestos oxidantes para preservar una película de protección y su tendencia a acelerar la corrosión, cuando los agentes causantes de la rotura de la película de protección pueden destruir las películas.

**Temperatura.** El índice de corrosión tiende a aumentar conforme se eleva la temperatura. La temperatura tiene también efectos secundarios, mediante su influencia sobre la solubilidad del aire (oxígeno), que es la sustancia oxidante que influye más comúnmente en el proceso de corrosión.

El índice de corrosión de los aceros inoxidable aumentará mucho debido a la pérdida de sustancia oxidante (oxígeno disuelto), que se necesita para mantener la película protectora.

**Películas.** Una vez que se inicia la corrosión, su avance se ve controlado con mucha frecuencia por la naturaleza de las películas, como las pasivas, que se pueden formar o acumularse en la superficie metálica. El ejemplo clásico es la delgada *película de óxido* que se forma en los aceros inoxidable. Los productos insolubles de la corrosión pueden ser completamente impermeables al líquido corrosivo y, por tanto, ser completamente protectores, o bien, pueden ser totalmente permeables y permitir la corrosión local o general, sin obstáculos. Las películas no continuas o no uniformes pueden tener tendencia a localizar la corrosión en zonas dadas o a inducir una corrosión acelerada en algunos puntos, mediante la iniciación de efectos electrolíticos del tipo de celda de concentración. Las películas pueden tener tendencia a retener o absorber humedad y, en esa forma, a retrasar el tiempo de desecación, incrementar la amplitud de la corrosión resultante de la exposición a la atmósfera o los vapores corrosivos.

En general se acepta que las características de las *películas de herrumbre* que se forman en los aceros determinan su resistencia a la corrosión atmosférica. Las películas de herrumbre que se forman en los aceros de aleaciones bajas son más protectoras que los de los aceros sin aleación.

En lo que se refiere al efecto del *tiempo*, no hay ninguna ley universal que rijas la reacción para todos los metales. Algunos índices de corrosión permanecen constantes con el tiempo en gamas amplias; otros disminuyen con el tiempo y algunas aleaciones tienen índices distintos de corrosión con respecto al tiempo.

## **ATAQUE A ALTA TEMPERATURA**

**Propiedades físicas.** Lo adecuado de una aleación para servicios a altas temperaturas (800 a 2000°F) depende de las propiedades inherentes en la composición de la aleación y en las condiciones de aplicación.

La estructura cristalina, la densidad, la conductividad térmica, la resistividad eléctrica, la expansividad térmica, la estabilidad estructural, la gama de temperaturas de fusión y la presión de vapor son propiedades físicas básicas para las composiciones de aleaciones individuales e inherentes a ellas.

En este grupo de propiedades, la *expansividad* suele tener un importancia relativamente elevada. Un número sorprendentemente grande de fallas de metales a temperaturas elevadas es el resultado de esfuerzos térmicos excesivos que se deben a la constricción del metal durante el calentamiento o enfriamiento. Esa constricción, en el caso de la contracción obstaculizada, puede provocar una ruptura.

Otra propiedad física importante es la *estabilidad estructural* de la aleación. Esto significa libertad desde la formación de las nuevas fases, o un reacomodo drástico de aquellas que se encuentran presentes dentro de la estructura metálica, como resultado de la influencia térmica. Tales cambios pueden tener un efecto nocivo sobre la resistencia a los esfuerzos, o a la corrosión, o sobre ambas.

**Propiedades mecánicas.** Las propiedades mecánicas de interés amplio incluyen el corrimiento, la ruptura y las resistencias de corta duración, varias formas de ductibilidad, así como también la resistencia a los impactos y los esfuerzos de fatiga. La resistencia de corrimiento y la ruptura por esfuerzo suelen tener el mayor interés para los diseñadores de equipos estacionarios, como recipientes y hornos.

**Resistencia a la corrosión.** Quizá tenga mayor importancia que las propiedades mecánicas y físicas, la capacidad de una composición química de una aleación para resistir la acción corrosiva de diversos ambientes calientes. Las formas de corrosión a altas temperaturas en que se ha hecho hincapié son la *oxidación* y la *escamación*.

El cromo es un constituyente esencial en las aleaciones que se van a utilizar por encima de 1000°F. Se difunde con rapidez y se acumula en la superficie del acero, proporcionando una película de óxido sumamente adhesiva, que retrasa materialmente el proceso de oxidación. El silicio es un elemento útil para darle al acero resistencia a la oxidación. Realza los efectos convenientes del cromo. Asimismo, para un nivel dado de cromo, la experiencia ha demostrado que la resistencia a la oxidación mejora al incrementarse el contenido de níquel.

## CORROSIÓN LOCALIZADA

**Corrosión intergranular.** La corrosión selectiva en los límites de los granos de un metal o una aleación, sin ataques apreciables a los granos o a los cristales mismos, se denomina corrosión intergranular. Cuando es fuerte, este ataque produce una pérdida de resistencia y ductibilidad fuera de proporción con la cantidad de metal que destruye realmente la corrosión. Algunas aleaciones, como los aceros inoxidable austeníticos y algunas aleaciones de cobre y aluminio, cuando se calientan de modo inadecuado, son propensas a la corrosión intergranular, debido a la precipitación de compuestos intergranulares.

Los *aceros inoxidables austeníticos* no estabilizados o que no sean de los tipos de contenido extrabajo de carbono, cuando se calientan en la gama de temperaturas de 850 a 1550°F, tienen precipitaciones en los límites de los granos de compuestos ricos en cromo (carburos de cromo). Esto provoca el empobrecimiento de cromo en los límites de los granos y hace que el metal afectado sea propenso a la corrosión intergranular en muchos ambientes. Los aceros inoxidables austeníticos estabilizados con columbio o titanio para reducir la formación de carburos o que contengan menos de 0.03% de carbono, no suelen ser propensos al deterioro de los límites, al calentarse a las temperaturas de la gama anterior.

Los aceros inoxidables austeníticos no estabilizados o los tipos con un contenido normal de carbono, para que sean inmunes a la corrosión intergranular, deben recibir un recocido en solución. Cuando se aplica un tratamiento térmico inadecuado, algunas *aleaciones de aluminio y cobre* se hacen propensas a los ataques selectivos en los límites de granos. Esta forma de ataque se atribuye a la precipitación de partículas relativamente grandes del constituyente de  $CuAl_2$  en los límites de los granos, lo cual da como resultado el agotamiento del cobre en los límites de grano de los materiales adyacentes de solución sólida de aluminio y cobre.

**Fractura de corrosión por esfuerzo.** La corrosión se puede acelerar debido a los esfuerzos, ya sea el esfuerzo residual interno del metal o algún esfuerzo aplicado desde el exterior. Los esfuerzos internos se producen por la deformación no uniforme durante los trabajos en frío (doblado, cizallamiento, horadación, etc.), por el enfriamiento desigual a partir de temperaturas elevadas y por reasentamientos estructurales internos que implican un cambio de volumen. Los esfuerzos inducidos por remaches, pernos y por accesorios de prensas y compresión se pueden clasificar también entre los internos.

Para la fractura de corrosión por esfuerzos se requieren esfuerzos de tracción de magnitud igual, por lo común, al esfuerzo de cedencia; sin embargo, se han llegado a producir fallas de este tipo con esfuerzos menores.

Virtualmente todos los sistemas de aleaciones tienen sus condiciones ambientales específicas que producen fracturas de corrosión por esfuerzo y el tiempo necesario para que se produzca una falla variará de unos cuantos minutos a varios años.

**Corrosión por fatiga.** La corrosión por fatiga es una reducción (por corrosión) de la capacidad de un metal para soportar *esfuerzos cíclicos o repetidos*. La superficie del metal desempeña un papel muy importante en esta forma de daño, puesto que será la que soporte los mayores esfuerzos y, al mismo tiempo, estará sometida a los ataques de los medios corrosivos. La corrosión de la superficie metálica hará disminuir la resistencia a la fatiga y el esfuerzo sobre la superficie tenderá a hacer que se acelere la corrosión. En condiciones de esfuerzos cíclicos o repetidos, se produce la rotura de las películas protectoras de óxido que evitan la corrosión con una rapidez mayor que la formación de nuevas películas protectoras.

Con frecuencia, esta situación tiene como consecuencia la formación de zonas anódicas en los puntos de rotura; esas zonas producen picaduras que sirven como puntos de concentración del esfuerzo para el origen de grietas que provocan fallas finales.

**Fractura por Hidrógeno.** La pérdida de ductilidad de un metal provocada por la entrada o la absorción de hidrógeno al metal se denomina fractura por hidrógeno. En algunas condiciones, a temperaturas elevadas, la descarburización, la fisuración y el resquebrajamiento de los aceros al carbono se producirán cuando el hidrógeno se combine con el carbono del acero, para formar metano. Las aleaciones que forman carburos estables, como las de bajo contenido de cromo, proporcionan una solución para esta forma de ataque.

## ***CÓMO COMBATIR LA CORROSIÓN***

Es preciso tomar en cuenta los puntos que siguen como medios para combatir la corrosión:

**Selección del material apropiado.** La selección de materiales para los equipos de procesamiento se debe basar, de preferencia, en la experiencia de materiales en condiciones similares. Cuando no se disponga de esa información, será conveniente obtener ayuda y asesoramiento de personas experimentadas en trabajos de ingeniería de corrosión, que están familiarizados con las características de resistencia química y con las limitaciones de los materiales de construcción.

Se pueden necesitar **pruebas de corrosión** para desarrollar información que permita seleccionar materiales adecuados. Cuando se realizan esas pruebas, los procedimientos y las condiciones tienen que ser tan realistas como sea práctico, para simular las condiciones de exposición y funcionamiento con respecto a la temperatura, la aireación y la velocidad, así como también a la exposición química. Los efectos de paredes calientes o frías se deben tener en consideración cuando se trate de equipo de intercambio de calor. La posibilidad de que se presente una de las formas de corrosión distinta a la general debe tomarse en cuenta. En seguida, se deben diseñar pruebas que se apliquen para determinar la adecuación de los materiales que interesen, cuando se sepa o se sospeche que están propensos a un tipo particular de corrosión en condiciones ambientales similares. Al escoger los materiales de construcción para equipos que vayan a estar expuestos a ambientes corrosivos, es preciso tomar en cuenta con cuidado los aspectos prácticos y las *limitaciones* de diseño, fabricación, instalación y mantenimiento.

Por ejemplo, si es preciso efectuar soldadura sobre el terreno o trabajos en frío en los equipos, por razones de instalación o mantenimiento y no resulta práctico el tratamiento térmico, será necesario escoger un material de construcción que no sea propenso a ataques, tales como el de la corrosión intergranular o el agrietamiento por corrosión con esfuerzo en la condición sin tratamiento térmico.

Los índices tolerables de *corrosión* son un factor importante y difiere con los equipos. Se puede permitir una corrosión apreciable para los tanques y las líneas, si se prevé y se deja margen para ella, en el espesor de diseño; pero no se puede permitir esencialmente ninguna corrosión en las mallas de alambre finas, los orificios y otros puntos en que los cambios pequeños de dimensión sean críticos. En muchos casos, la utilización de *materiales no metálicos* resultará conveniente desde el punto de vista económico y de desempeño. Se deben tomar en cuenta cuando sus limitaciones de diseño, temperatura y resistencia sean satisfactorias.

**Diseño adecuado.** Las consideraciones de diseño respecto de la minimización de las dificultades de corrosión deben incluir la conveniencia de un drenaje libre y completo, la eliminación de hendiduras y la facilidad de limpieza e inspección.

La instalación de desviadores, atirantadores y boquillas de drenaje y la ubicación de las válvulas y las bombas se deben hacer de modo que se produzca un drenaje libre y que se pueda realizar el lavado sin retención.

Siempre que sea práctico se deberán proporcionar medios de acceso para la inspección y el mantenimiento. Cuando sea posible, convendrá utilizar juntas a tope. Si se usan juntas yuxtapuestas, utilizando soldaduras fileteadas, estas últimas deberán ser continuas en el lado de procesamiento.

En general, se debe evitar la utilización de metales diferentes en contacto entre sí, sobre todo si están muy separadas en sus posiciones nominales en la serie electromotriz. Si se van a utilizar juntos, será preciso tomar en consideración su aislamiento mutuo, o bien, el hacer que la zona del material anódico sea tan grande como sea posible.

Los equipos se deben sostener de tal modo que no reposen en pozas de líquido o en algún material aislantes húmedo. El aislamiento poroso debe ser a prueba del clima o estar protegido de otro modo contra la humedad y las salpicaduras, con el fin de evitar el contacto del material húmedo con el equipo. Las especificaciones tienen que estar suficientemente completas para asegurarse que se utilice el tipo de material o la composición que se desee y que se proporcione la condición correcta de acabado superficial y tratamiento térmico. Es conveniente la inspección durante la fabricación y antes de la aceptación.

**Modificación del ambiente.** Los cambios simples en el ambiente pueden introducir una diferencia apreciable en la corrosión de los metales y es preciso tomarlos en cuenta como medios para combatir la corrosión. El *oxígeno* es un factor importante y su retiro o adición puede provocar cambios importantes en la corrosión. Por ejemplo, el tratamiento de agua de alimentación de calderas para retirar oxígeno, reduce considerablemente la corrosividad del agua sobre el acero.

La purga de gases inertes y la interferencia de muchas soluciones, sobre todo los medios ácidos, reducen en general la corrosión de las aleaciones con base de cobre y níquel, al minimizar el contenido de aire u oxígeno.

Por otra parte, la corrosividad de los medios ácidos para las aleaciones inoxidables se puede reducir mediante la aireación, debido a la formación de películas de óxido pasivo.

La reducción de la temperatura será casi siempre provechosa en lo que se refiere a la reducción de la corrosión. En general, la disminución de la velocidad y la turbulencia darán como resultado una menor corrosión y una excepción es aquella en que los sólidos se pueden reunir en las superficies y provocar picaduras. Cuando los valores de pH se pueden modificar, será conveniente, en general, mantener el nivel de ácido retenido en un mínimo. Cuando se establecen condiciones ácidas en los procesos por lotes, puede ser conveniente agregarlos en último lugar, con el fin de obtener la dilución máxima y la concentración mínima de ácido, así como también el menor tiempo de exposición. Los valores alcalinos de pH son menos críticos que los ácidos, en lo que se refiere al control de la corrosión. La eliminación de humedad puede y frecuentemente minimiza, si no evita, la corrosión de los metales y esta posibilidad de la modificación ambiental se debe tomar en cuenta cuidadosamente.

**Inhibidores.** El uso de diversas sustancias o inhibidores como aditivos a los ambientes corrosivos, para reducir la corrosión de los metales en el ambiente, es un medio importante de combate para la corrosión. En general, resulta más atractivo en sistemas cerrados o de recirculación, cuando el costo anual de inhibidores sea bajo. Sin embargo, también resulta económicamente conveniente para muchos sistemas de una sola pasada, como los que se encuentran en las operaciones de procesamiento del petróleo. Los inhibidores son eficaces, debido a su influencia de control sobre las reacciones de las zonas anódicas y catódicas. Como ejemplos típicos de inhibidores utilizados para minimizar la corrosión del hierro y el acero en soluciones acuosas, se tienen los cromatos, los fosfatos y los silicatos. Estos materiales minimizan la corrosión, al hacer aumentar la polarización anódica y reciben el nombre de *inhibidores anódicos*. Los materiales de sulfuros orgánicos y amidas resultan con frecuencia eficaces para minimizar la corrosión del hierro y el acero en solución ácida. En este caso controlan la polarización catódica y reciben el nombre de *inhibidores catódicos*. El uso de inhibidores no se limita al control de la corrosión del hierro y el acero, sino que, con frecuencia, son eficientes con el acero inoxidable y otros materiales de aleación.

La eficiencia de un inhibidor dado aumenta generalmente con el incremento de la *concentración*; pero los que se consideran atractivos desde el punto de vista práctico y el económico se usan en cantidades de menos de 0.1% en peso.

**Protección catódica.** En la actualidad se usan dos métodos para proporcionar protección catódica para minimizar la corrosión de los metales. Se trata del método de ánodo de sacrificio y el de fem impresa. Los dos dependen de que se convierta el metal que se va a proteger en el cátodo del electrolito en cuestión. Una forma relativamente nueva de control de corrosión implica la pasivación de un metal aplicando una corriente exterior que los hace más anódicos. Esto recibe el nombre de *protección anódica*. El método es más aplicable a los metales y aleaciones que tienen un comportamiento activo-pasivo a varios potenciales de acero y el acero inoxidable.

**Recubrimientos y forros.** El uso de materiales no metálicos para forros y recubrimientos, en combinación con el acero u otros materiales ha sido y seguirá siendo un tipo importante de construcción para combatir la corrosión. Se utilizan *recubrimientos orgánicos* de muchos tipos como forros en equipos como tanques, tuberías, líneas de bombeo y recipientes importantes de embarque (contenedores) y constituyen a menudo un medio económico de control de la corrosión, sobre todo cuando el principal objetivo es la libertad de la contaminación del metal. Un principio que se acepta en general, en la actualidad, es que no se deben de utilizar recubrimientos delgados, del tipo de pintura, aplicados en aspersión o con brocha y de menos de 10 mils de espesor, en servicios en los que se requiere una protección completa, para evitar el ataque rápido al sustrato metálico. Esto se debe a que la mayoría de los recubrimientos delgados, tal como se aplican comercialmente, contienen defectos que conducen a fallas tempranas debido a la corrosión del sustrato metálico. Aun cuando el material de recubrimiento sea resistente. Los forros más seguros para servicios corrosivos son los que se adhieren directamente sobre el sustrato y se acumulan en efectos de capas múltiples o laminados hasta espesores de más de 100mils. Incluyen sistemas de vidrio-fibra-resinas reforzadas y sistemas plásticos elastoméricos y plastificados. Una buena preparación superficial y la inspección profunda del recubrimiento completo, se deben considerar como requisitos mínimos para cualquier aplicación de recubrimiento. Con frecuencia se usan recubrimientos de *cerámica o carbono y ladrillos como recubrimiento* exterior sobre forros de plástico o membranas, cuando la temperatura operacional sobrepase la que puede tolerar el material sin protección. Este tipo de construcción permite el procesamiento de materiales que son demasiado corrosivos para manejarlos en construcciones metálicas.

Ha existido desde hace tiempo *acero forrado o recubierto de metal o vidrio* como métodos para evitar el elevado costo de aleaciones sólidas. El *revestimiento* del acero con una aleación es otro método para abordar este problema. En la actualidad hay ciertos métodos de revestimiento que se usan comúnmente. En uno de ellos, se hace un emparedado con un metal resistente a la corrosión y acero al carbono. Esto se sella en torno a los bordes mediante soldadura y laminado en caliente para producir una *soldadura* a presión entre la placas.

**Recubrimientos de zinc.** Aplicados por diversos medios tienen una buena resistencia a la corrosión en muchas atmósferas. Esos recubrimientos se han utilizado ampliamente en acero. El zinc tiene la ventaja de ser anódico al acero y, por ende, protegerá las zonas expuestas al acero mediante una acción electroquímica.

El acero recubierto con estaño (estañado) se usa en recipientes para alimentos. Es más noble que el acero; por consiguiente, las soluciones bien aireadas acelerarán galvánicamente el ataque del acero en las zonas expuestas. La falta relativa de aire dentro de los recipiente para alimentos contribuye tanto a preservar el estaño y hierro, en ácidos orgánicos sirve para proteger el acero expuesto.

**Cadmio.** Puesto que es anódico hacia el acero, se comporta de modo muy similar al zinc para proporcionar protección contra la corrosión, cuando se aplica como recubrimiento sobre el acero. Se deben realizar pruebas de zinc y el cadmio cuando se hace necesario determinar la selección más económica para un ambiente.

El **plomo** tiene una buena resistencia general a varias atmósferas. Como recubrimiento, tuvo su mayor aplicación en la producción de chapa aplomada que se usa como material para tejados, cornisas y desagües.

Los **recubrimientos de aluminio** sobre acero tienen un desempeño similar al de los recubrimientos de zinc. El aluminio tiene buena resistencia a muchas atmósferas; además, puesto que es anódico al acero, protege galvánicamente las zonas expuestas. Los productos de acero recubierto de aluminio son muy útiles en condiciones a altas temperaturas, cuando se requiere una buena resistencia a la corrosión.

## **PINTURA**

**Pintura aplicada para superficies de acero.** El objeto principal de la pintura es la conservación de las superficies de acero. La pintura retarda la corrosión, 1) evitando el contacto de los agentes corrosivos con la superficie del recipiente y 2) por su acción inhibidora de la oxidación debido a las propiedades electroquímicas del material de pintura. Las pinturas deben ser adecuadas para resistir los efectos del medio, el calor, el impacto, la abrasión y la acción de las sustancias químicas.

**Preparación de la superficie.** El requisito principal para pintar con éxito una superficie es el desprendimiento de las escamas de laminación, la herrumbre, suciedad, grasa, aceite, y la materia extraña. La escama de laminación es la capa gruesa de óxido de hierro de color gris azulado que se forma sobre el acero estructural al terminar la operación de laminado en caliente. Si la escama de laminación está intacta y se adhiere perfectamente al metal, le proporciona protección; sin embargo, debido al laminado y al apilamiento de las placas, es raro encontrar en la práctica una escama de laminado completamente intacta.

**Consideraciones económicas.** La selección de pintura y la preparación de superficies que van más allá de los aspectos técnicos se convierten naturalmente en un problema de economía. El costo de la pintura está normalmente entre 25 y 30% o menos del costo que representa pintar una estructura, de donde se deriva la ventaja de utilizar pintura de alta calidad. El 60% o más del costo total de un trabajo de pintura se encuentra en la preparación de la superficie y el costo de preparación a diferentes grados varía en proporción de 1 a 10 ó 12. Por ejemplo, el costo de limpieza con chorro de arena es de alrededor de 10 a 12 veces mayor que el de limpieza manual con cepillo de alambre. El costo de preparación de la superficie debe equilibrarse con el incremento de la vida útil del recipiente.

**Condiciones especiales.** Cuando la pintura debe resistir a la abrasión, es importante que tenga buena adhesión. Para lograr la máxima adhesión, la mejor limpieza es la que se hace con chorro de arena (sandblast), aunque también es satisfactoria la limpieza por medio de productos químicos. Los pretratamientos tales como el de fosfato en caliente o el de primario de lavado son excelentes para limpiar químicamente y hacer rugosa la superficie.

Los recubrimientos de uretano, los epóxicos y las pinturas de vinilo tienen buena resistencia a la abrasión. También son buenos los recubrimientos ricos en zinc y las pinturas fenólicas. Las pinturas oleorresinosas pueden desarrollar una resistencia mucho mayor si se les agrega un refuerzo de arena.

**Alta temperatura.** A temperaturas inferiores a 500 o 600°F, para obtener una buena superficie de recubrimiento, es adecuado el tratamiento con fosfato caliente. Arriba de 500 a 600°F es conveniente limpiar la superficie con chorro de arena.

- Hasta 200 a 250°F Pinturas a base de aceite, periodo limitado
- 200 a 350°F Con vehículo alquídico o fenólico
- 300 a 400°F Alquídicos modificados especialmente
- 300 a 550°F Silicones coloreados
- 700 a 800°F Recubrimientos inorgánicos de zinc arriba de 550°F Silicones negro o de aluminio
- 800 a 1200°F Silicones de aluminio hasta 1600 o 1800°F Recubrimiento de cerámica de silicón

**Cantidad requerida de pintura.** Teóricamente, un galón de pintura cubre 1600 pies cuadrados de superficie con una película de 1 milésima de pulgada de espesor, estando húmeda.

El espesor seco se determina por el contenido sólido (no volátil) de la pintura, el cual puede hallarse en la especificación de la etiqueta o en las indicaciones del fabricante.

Si el contenido de sólidos por volumen es, por ejemplo de 60%, la cobertura máxima en seco (régimen extendido) estará teóricamente entre  $1600 * 0.60 = 960$  pies cuadrados.

**TABLA III. SISTEMA DE PINTURA**

Número de sistemas SSPC-PS	CONDICION	Preparación superficie Tabla IV	Pre-tratamiento, Tabla III	Espesor de la pintura seca, milésimas					
				1ª mano	2ª mano	3ª mano	4ª mano	5ª mano	Espesor total
1.01	No hay condensación, humos químicos, goteo de salmuera y demás condiciones en extremo corrosivas	2 o 3	No se requiere	14 (1.7)	104 (1.3)	104 (1.0)	104		4.0
1.02				14 (1.7)	14 (1.3)	104 (1.0)			
1.03				1 (1.7)	104 (1.3)	104 (1.0)			
1.05				2 (1.7)	104 (1.3)	104 (1.0)			
1.06				A (1.7)	104 (1.3)	104 (1.0)			
2.01				Superficies de acero expuestas a la intemperie, alta humedad, inmersión poco frecuente en agua fresca o atmósferas químicas benignas.	6 o 8	No se requiere			
2.02	D (1.5)	104 (1.5)	104 (1.0)				4.0		
2.03	B (1.5)	104 (1.5)	104 (1.0)				4.0		
2.04	E (1.5)	104 (1.5)	104 (1.0)				4.0		
3.00	Superficies de acero expuestas a inmersiones alternada, alta humedad y condensación o a la intemperie, o a atmósferas químicas moderadamente severas o inmersión en agua fresca	5, 6, 8, 6, 10	1, 2, 3, 6, 4				5 ó 6 (1.5)	5 ó 6 (1.5)	103 (1.0)
4.01	Inmersión en agua salada o en varias soluciones químicas, condensación, exposición muy severa a la intemperie o a atmósferas químicas	10	3	G (1.5)	G	9	9	5.5	
4.02	Inmersión en agua fresca, condensación, exposición a la intemperie o a atmósferas químicas muy severas	10	No se requiere	H (1.5)	H	H	H	6.0	

**TABLA III. SISTEMA DE PINTURA**

Número de sistemas SSPC-PS	CONDICION	Preparación superficie Tabla 11	Pre tratamiento, Tabla 111	Espesor de la pintura seca, milésimas					Espesor total
				1ª mano	2ª mano	3ª mano	4ª mano	5ª mano	
4.03	Inmersión completa o alternada en agua salada, alta humedad, condensación y exposición a la intemperie	6 o 8	3	G (1.5)	9	8			4.0
4.04	Condensación o exposición a intemperie muy severa o a atmósferas químicas	6 o 8	No se requiere	9 (1.2)	9	9	9		4.5
4.05	Condensación, intemperie severa, atmósferas químicas benignas	6 o 8	3	G (1.5)	F	F	F		4.0
6.01	Recipientes de acero y estructuras flotantes expuestas a agua fresca o salada, agua sucia y a la intemperie	10	3	G (1.5)	G	G	G	I (2.0)	7.0
6.02		6 o 8	3	G (1.5)	G	G	J	J	7.0
6.03		6 o 8	3	G (1.5)	G	G	L	K	6.25
7.01	Ambiente seco, no corrosivo, interior de edificios o protección temporal contra intemperie	Limpieza nominal	No se requiere	13 (1.0)					1.0
8.01	Protección a largo plazo en lugares cubiertos o inaccesibles, protección a corto plazo o temporal en medio corrosivo	1 y 2 o 3	No se requiere	M 31 (humedad)					13 (humedad)
9.01	Atmósferas corrosivas o químicas, pero no debe usarse en contacto con aceites, disolventes u otros agentes	6	No se requiere	12 63					63

<b>PINTURA</b>		
<b>TABLA IV. ESPECIFICACIONES PARA LA PREPARACION DE SUPERFICIES <sup>(6)</sup></b>		
Referencia a la tabla I	Titulo y objetivo	Número de especificación
	<b>LIMPIEZA CON DISOLVENTES</b>	
1	Eliminación de aceite, grasa, mugre, tierra natural, sales y contaminantes con disolventes, emulsiones, compuestos para limpieza o vapor de agua	SSPC-SP 1-63
	<b>LIMPIEZA CON HERRAMIENTAS DE MANO</b>	
2	Eliminación de escamas de laminación sueltas, herrumbre y pintura suelto cepillando, lijando, raspando o eliminando las rebabas a mano o con otras herramientas manuales de impacto, o por combinación de estos dos métodos.	SSPC-SP 2-63
	<b>LIMPIEZA CON MAQUINAS DE HERRAMIENTAS</b>	
3	Eliminación de escamas de laminación sueltas, herrumbre y pintura sueltos con cepillo de alambre, herramientas de impacto, esmeriles y lijadoras mecánicas o por combinación de ambos.	SSPC-SP 3-63
	<b>LIMPIEZA A LA FLAMA DEL ACERO NUEVO</b>	
4	Eliminación de escamas, herrumbre y otras materias extrañas perjudiciales por medio de llamas oxiacetilénicas de alta velocidad, seguida con limpieza con cepillo de alambre.	SSPC-SP 4-63
	<b>LIMPIEZA A METAL BLANCO CON CHORRO A PRESION</b>	
5	Eliminación de escamas de laminación, herrumbre, de oxidación, pintura o materia extraña por medio de chorro de arena, moyuelo o minución hasta obtener una superficie metálica de color uniforme blanco grisáceo	SSPC-SP 5-63
	<b>LIMPIEZA COMERCIAL CON CHORRO A PRESION</b>	
6	Eliminación completa de las escamas de laminación, herrumbre, escamas de oxidación, pintura o materia extraña, excepto las sombras, rayaduras o decoloraciones ligeras ocasionadas por la oxidación, el manchado, los óxidos de escamas de laminación y los residuos de pintura o recubrimientos que puedan quedar.	SSPC-SP 6-63
	<b>LIMPIEZA DE CEPILLADO PROFUNDO A CHORRO DE PRESION</b>	
7	Eliminación de todos los residuos, excepto los de alto grado de adherencia de las escamas de laminación, herrumbre y pintura mediante el impacto de abrasivos (Arena, moyuelo o munición)	SSPC-SP 7-63
	<b>LIMPIEZA QUIMICA</b>	
8	Eliminación completa de las escamas de laminación, herrumbre y escamas de oxidación por reacción química, electrólisis, o por ambos procesos. La superficie debe quedar sin restos de ácido, álcalis y lodos que no hayan reaccionado o sean perjudiciales	SSPC-SP 8-63
	<b>LIMPIEZA A CHORRO HASTA LOGRAR UNA SUPERFICIE CASI BLANCA</b>	
9	Eliminación de casi toda la escama de laminación, herrumbre y escamas de oxidación, pintura o materia extraña por medio de abrasivos. Pueden quedar las sombras, rayaduras o decoloraciones muy ligeras producidas por manchas de oxidación, óxidos de escamas de laminación o residuos ligeros muy adheridos de pintura o recubrimientos	SSPC-SP 10-63T

TABLA V. ESPECIFICACIONES PARA EL TRATAMIENTO PREVIO <sup>(6)</sup>

Referencia a la tabla I	Título y objetivo	Número de especificaciones
1	TRATAMIENTO POR MOJADO EN ACEITE Saturación de la capa superficial de acero oxidado y en escamas con aceite de mojado que sea compatible con la pintura primaria, mejorando así la adhesión y la calidad del sistema de pintura que haya de aplicarse.	SSPC-PT 1-64
2	TRATAMIENTO SUPERFICIAL CON FOSFATO EN FRIO Conversión de la superficie del acero a sales insolubles de ácido fosfórico con objeto de restringir la corrosión y mejorar la adhesión y la calidad de las pinturas por aplicar.	SSPC-PT 2-64
3	MANO DE LAVADO (Primario de lavado) BASICO DE CROMATO DE ZINC Y BUTIRAL VINILICO Pretratamiento que reacciona con el metal y, al mismo tiempo, forma una película protectora de vinilo que contiene un pigmento inhibidor para ayudar a evitar la oxidación.	SSPC-PT 3-64
4	TRATAMIENTO SUPERFICIAL CON FOSFATO EN CALIENTE Conversión de la superficie del acero a una capa gruesa cristalina de sales insolubles de ácido fosfórico con objeto de restringir la corrosión y mejorar la adhesión y la calidad de las pinturas por aplicar	SSPC-PT 4-64

TABLA VI. PINTURAS <sup>(6)</sup>

	Pintura; base plomo rojo, mezclada y lista para usarse	
A	Tipo I plomo rojo y aceite de linaza cruda y con cuerpo	TT-P86c
B	Tipo II, plomo rojo, aceite de linaza mezclada con pigmento y alquídico	TT-P86c
C	Tipo III, alquídico y plomo rojo	TT-P86c
D	Primario; pintura; cromato de zinc, óxido de hierro	TT-P645c
E	Pintura; base de amarillo de zinc-óxido de hierro premezclado, Tipo II-amarillo, alquídica	MIL- P-15929B
F	Pintura; tipo exterior, blanca, vinílica, alquídica.	MIL- P-16738B
G	Primario; tipo vinílico con plomo rojo	MIL- P-15929B
H	Pintura de resina vinílica	VR-3
I	Pintura; antiensuciable, tipo vinílico.	MIL- P-15931A
J	Pinturas; de acabado final, vinílica alquídica, rojo brillante. Mano de acabado con submano rojo de la india	MAP-44
K	Esmalte, para exteriores, gris No. 11 (vinílico-alquídico)	MIL- E-15935B
L	Esmalte, para exteriores, gris No. 27 (vinílico-alquídico)	MIL- E-15936B
M	Compuestos que previenen la oxidación	52-MA-602*
N	Esmalte y primarios de alquitrán de carbón	MIL- P-15147C
O	Recubrimiento con base de alquitrán de carbón	MIL- C-18480*
P	Recubrimiento, emulsión asfáltica	MIL- C-15203c

NOTA: MIL = MILITAR, TT = ESPEC. FEDERAL, MAP o MA = ADMON. DE TIEMPO MARÍTIMO, VR = OFICINA DE RECUPERACIONES.

# CAPITULO 4

## DISEÑO DE RECIPIENTES

## INTRODUCCIÓN

Todos los recipientes cilíndricos de una planta de proceso; reactores, calderines separadores y de reflujo, y torres de fraccionamiento, no se compran en tamaños normalizados sino que se diseñan especialmente para cada caso determinado. Las compañías de ingeniería poseen departamentos especializados cuyo trabajo es diseñar y hacer las especificaciones para este tipo de equipos.

El diseño mecánico de un recipiente a presión debe partir del conocimiento de la temperatura, presión y naturaleza química del fluido de proceso. Lógicamente un fluido que sea fuertemente ácido, bastante caliente y con alguna presión, no puede estar contenido en un recipiente de acero al carbono, mientras que por otro lado, el acero al carbono es aconsejable para hidrocarburos a temperaturas alrededor de 200°F y a presiones próximas a la atmosférica. Existen muchos materiales diferentes para la fabricación de recipientes (no todos ellos metales) y habrá uno que será el más aconsejable para el trabajo en cuestión.

En la selección de los materiales de construcción para una necesidad particular de almacenamiento, es importante tomar en consideración:

1. *Las características del sistema*, prestando atención especial a los factores que pueden influir en la corrosión.
2. *Los materiales* con que se construirá el sistema. Por consiguiente, es esencial tener conocimiento sobre las características y el comportamiento general de los materiales cuando se ponen en ciertos ambientes.

Además los recipientes a presión se pueden considerar como de pared delgada o de pared gruesa cuando se cumplen los siguientes criterios:

Se considera la pared delgada cuando:

1. La relación entre el espesor y el diámetro interior es igual o menor de 0.05

$$\frac{t}{D} \leq 0.05$$

2. La relación entre el diámetro exterior e interior es menor de 1.2

$$\frac{D_o}{D} < 1.2$$

3. Según código ASME Sección VIII División 1 parte UG-27 (c y d), para cilindros

$$t = \frac{R}{2}$$

o bien que

$$P \geq 0.385 * E * S$$

Para esferas  $t \leq 0.365 R$  o  $P \leq 0.665 SE$ .

Por lo tanto si el espesor de pared necesario calculado no cumple con alguno de los criterios anteriores se considera de pared gruesa. En el caso de recipientes de pared delgada se supone que los esfuerzos son prácticamente iguales, no así en los de pared gruesa, ya que se tiene una mayor área externa que interna, además de que los esfuerzos tangenciales comienzan a tomarse en cuenta. En el código A.S.M.E. Sección VIII División 2 Parte AD Artículo D-2, vienen las ecuaciones que deben emplearse para calcular el espesor de coraza o tapas por presión interna.

## ***ESFUERZOS EN RECIPIENTES A PRESIÓN.***

Los recipientes a presión están sujetos a diversas cargas, que causan esfuerzos de diferentes intensidades en los componentes del recipiente. El tipo e intensidad de los esfuerzos es una función de la naturaleza de las cargas, de la geometría del recipiente y de su construcción.

### ***CARGAS***

- a) Presión interna o externa.
- b) Peso del recipiente y su contenido.
- c) Reacciones estáticas del equipo auxiliar, tubería, revestimiento, aislamiento, piezas internas, apoyos.
- d) Reacciones cíclicas y dinámicas debidas a la presión o a las variaciones térmicas.
- e) Presión del viento y fuerzas sísmicas.
- f) Reacciones por impacto debido a choque hidráulico.
- g) Gradientes de temperatura y expansión térmica diferencial.

### ***ESFUERZOS***

- a) Esfuerzo a la tensión.
- b) Esfuerzo longitudinal a la compresión.
- c) Esfuerzo primario general de membrana inducido por cualquier combinación de cargas.
- d) Esfuerzo primario de membrana más esfuerzo primario de flexión inducido por combinación de cargas.
- e) Esfuerzo primario general de membrana inducido por la combinación de sismos o de la presión del viento con otras cargas.

## ***ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE***

- $S_s$
- El más pequeño de  $S_s$  o el valor del factor B determinado mediante el procedimiento en la norma UG 23 (b) (2).
- $1.5 S_s$ 
  - 1.2 veces el esfuerzo permitido en a, b, o c. Si la temperatura del metal no sobrepasa:  
700 °F para el acero al carbono y el acero con bajo contenido de elementos de aleación.
  - 800 °F para el acero con alto contenido de elementos de aleación (inoxidables).

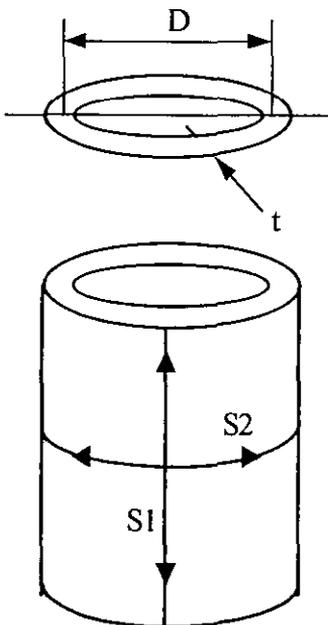
No se considera que la fuerza sísmica y la presión del aire actúen simultáneamente.

## ESFUERZOS EN CASCOS CILÍNDRICOS.

La presión uniforme, interna o externa, induce en la costura longitudinal un esfuerzo unitario igual al doble del que obra en la costura circunferencial, por la geometría misma del cilindro.

Cuando otras fuerzas (de viento, sísmicas, etc.) no son factores importantes, un recipiente sujeto a presión externa, debe diseñarse para resistir sólo la deformación circunferencial. Las normas establecen el método de diseño para llenar tales requisitos. Cuando actúan además otras cargas, la combinación de las mismas puede ser la que rija, y podrá requerirse una placa de mayor espesor que el necesario para resistir únicamente la deformación circunferencial.

El esfuerzo a la compresión debido a la presión externa y a la presión interna se determinarán mediante las fórmulas siguientes:



### FÓRMULAS

JUNTA CIRCUNFERENCIAL	JUNTA LONGITUDINAL
--------------------------	-----------------------

$$S1 = PD / 4t$$

$$S2 = PD / 2T$$

### NOTACIÓN

D = Diámetro medio del recipiente, pulg

P = Presión interna o externa, lb / pulg<sup>2</sup>

S1 = Esfuerzo longitudinal, lb / pulg<sup>2</sup>

S2 = Esfuerzo circunferencial, lb / pulg<sup>2</sup>

t = Espesor del casco, sin margen por corrosión

Figura 4-1. Esfuerzos en cascos cilíndricos.

## *DISEÑO DE RECIPIENTES DE ALMACENAMIENTO*

El diseño consiste básicamente en determinar el espesor necesario para que resista los esfuerzos a los que se ve sometido el recipiente.

En el cálculo del espesor ( t ) participan los siguientes parámetros:

- Presión de diseño (  $P_D$  )
- Temperatura de diseño (  $T_D$  )
- Esfuerzo (  $\delta$  )
- Factor de corrosión ( c )
- Eficiencia de la soldadura ( E )

Por lo que, se puede indicar que el espesor es función de estas variables:

$$t = t( P_D, T_D, \delta, c, E )$$

### *DEFINICIONES*

**Presión de operación.** Es la presión dentro del recipiente en operación normal, sin exceder la presión máxima de trabajo. La presión de ajuste del dispositivo de relevo se establece arriba de la presión de operación para evitar la abertura frecuente del dispositivo.

**Presión de diseño.** Es la presión que se obtiene a una temperatura especificada a las condiciones de operación predeterminadas más severas. Es la presión utilizada para calcular el espesor mínimo permisible o las características físicas de las diversas partes de un recipiente. Debido al escalamiento de los espesores de placas existentes comercialmente, un recipiente puede tener un espesor de pared un poco mayor que el necesario para soportar la presión de diseño. Por consiguiente, la presión de trabajo máxima permisible puede sobrepasar a la de diseño. Sin embargo, en la práctica para ahorrarse esfuerzos, la presión de diseño se considera por lo común como la presión máxima permisible de trabajo.

En cuanto a la presión de diseño se puede elegir entre:

$$\begin{array}{ll}
 P_D = P_{op} + 30 \text{ lb / in}^2 & \text{si } P_{op} \leq 300 \text{ lb / in}^2 \\
 P_D = 1.1 * P_{op} & \text{si } P_{op} > 300 \text{ lb / in}^2
 \end{array}$$

**Presión máxima permisible de trabajo.** Es la máxima presión manométrica permitida a una temperatura especificada durante la operación normal del recipiente. Esta presión estará fijada por los espesores nominales de cada elemento del recipiente, sin considerar los espesores adicionales por corrosión; así como, los valores de los esfuerzos máximos permisibles de los materiales, conforme a las reglas y fórmulas aplicables para el

diseño y construcción de estos recipientes. Esta presión es la base para el ajuste de los dispositivos de relevo de presión, instalados para la protección del recipiente.

**Temperatura de diseño.** Se calcula a la temperatura máxima de operación. Es una práctica usual en el intervalo de 32 a 750 °F aumentar 25 °F a la temperatura máxima de operación para calcular la temperatura de diseño. Queda excluido el caso de trabajos criogénicos, en cuyo diseño en lugar de sumar se restan los 25 °F. Arriba de los 750 °F no se acostumbra agregar un factor.

La temperatura de diseño se obtiene mediante:

$$T_D = T_{\max \text{ op}} + 25 \text{ °F}$$

**Esfuerzo máximo permisible ( S ).** Es el máximo esfuerzo unitario permitido para cualquier material específico que pueda ser usado en las fórmulas para el diseño del recipiente. La forma de calcular el esfuerzo máximo permisible es utilizando el valor del esfuerzo último y dividiéndolo entre un factor de seguridad:

$$S = \frac{\delta}{\text{factor de seguridad}}$$

TIPO DE RECIPIENTE (PRESIÓN)	FACTOR DE SEGURIDAD
Atmosférico	3
Presión interna	4
Presión externa	4

Tabla VII. Factores de seguridad.

Las tablas de esfuerzo máximo permisible que reporta el código ASME utilizan un factor de seguridad de 4. Este esfuerzo último es el mismo para un material determinado, sin influir en el proceso de tratamiento al que ha sido sometido el material de construcción. No así para el esfuerzo de cedencia, el cual depende del tratamiento previo del material, en este caso el factor de seguridad a emplear es de 1.5 y la ecuación para el esfuerzo máximo permisible queda de la siguiente manera:

$$S = \frac{\delta}{1.5}$$

Esta forma de obtener  $S$  nos arroja un valor más real, por lo que se recomienda que de preferencia se utilice este valor siempre y cuando se cuente con él. De lo contrario, el valor de  $S$  a partir del esfuerzo último es muy aceptable.

**Eficiencia de la junta soldada.** Se expresa como un porcentaje en forma decimal y se utiliza en el diseño de juntas como un factor por el que hay que multiplicar el esfuerzo máximo permisible, para obtener el esfuerzo permisible apropiado. Su valor es de uno y depende del tipo de prueba al que se someta la soldadura. Entre más rigurosa sea la prueba, la eficiencia se acerca más al uno. Cuando vale uno es porque se ha realizado una prueba de radiografiado en toda la costura.

**Factor de corrosión.** Espesor necesario con el cual se pretende contrarrestar los efectos de desgaste por corrosión o erosión que ocasionan las propiedades físicas y químicas del fluido que toca la pared del recipiente. El desgaste por corrosión puede encontrarse reportado de forma muy general (Wallas, 1992) o en tablas muy específicas como Chuse<sup>(2)</sup> (1977) y Perry<sup>(8)</sup> (1986).

**Espesor de pared requerido.** Es el espesor calculado por las fórmulas antes de adicionarle el espesor necesario para corrosión.

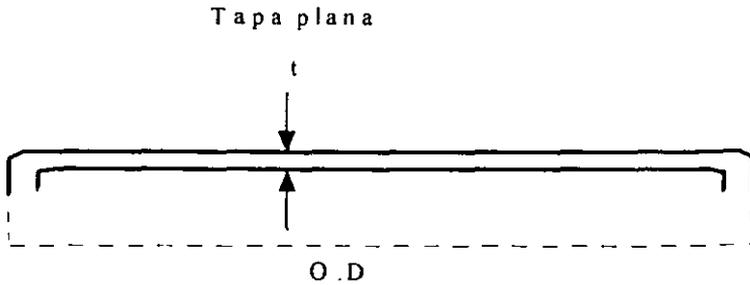
**Espesor de diseño.** Es la suma del espesor requerido más el espesor necesario para corrosión.

**Espesor nominal.** Es el espesor seleccionado entre los espesores comerciales disponibles.

## ***TIPO DE TAPAS***

**Tapa Plana.** Se utilizan para "cerrar" tanques sujetos a presión atmosférica generalmente, aunque en algunos casos se usan también en recipientes a presión manométrica muy baja. Su costo entre las tapas es el más bajo, se utilizan también como fondos de tanques de almacenamiento de grandes dimensiones y como tapas de registros mano o registro hombre. Se recomienda en los siguientes casos:

1. Recipientes con diámetro menor de 4 ft (48 in) y presiones de 10 lb / in<sup>2</sup>.
2. Recipientes con diámetro de 4 a 10 ft, siempre y cuando la presión no sobrepase las 2 lb / in<sup>2</sup>.
3. Recipientes con diámetro mayor de 10 ft no es recomendable, pues al calcular el espesor se obtienen valores muy grandes. Aunque se pueden encontrar disponibles en diámetros de 20 ft.



$t$  = espesor  
 O.D = Diámetro exterior

Figura 4-2. Tapa-plana

Los diámetros disponibles, basados en el diámetro externo del recipiente, tienen incrementos de 2 in en el intervalo de 12 a 42 in, y 6 in de 42 a 144 in y 12 de 144 a 240 in. El incremento en el espesor de la placa es de 1/16 in hasta 1 in, y de 1/8 in de 1 a 2 in.

**Tapa Toriesféricas.** Son las que mayor aceptación tienen en la industria, debido a su bajo costo y a que soportan altas presiones manométricas (presión interna de 15 a 200 lb/in<sup>2</sup>). Estos límites son flexibles y quedan determinados por los costos del material, formación y construcción de la tapa, etc. Su característica principal es que el radio del abombado es aproximadamente igual al diámetro.

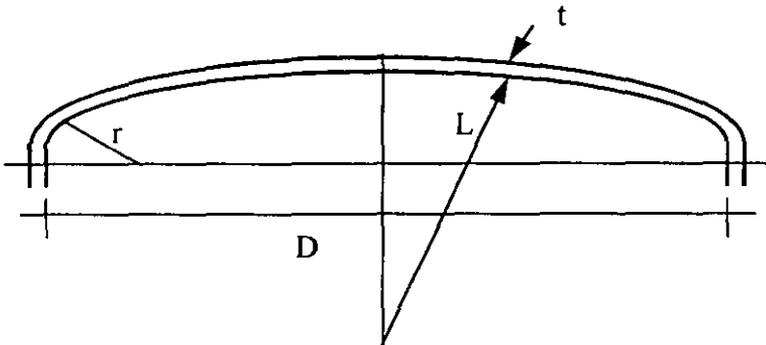


Figura 4-3. Tapa Toriesférica

Los diámetros disponibles, basados en el diámetro externo del recipiente, tienen incrementos de 2 in en el intervalo de 12 a 42 in, de 6 in en el intervalo de 42 a 144 in y de 12 in en el intervalo de 144 a 240 in.

**Tapas Elípticas.** Son empleadas cuando el espesor calculado de una tapa toriesférica es relativamente alto, ya que las tapas semielípticas soportan mayores presiones que las toriesféricas (de 100 lb/in<sup>2</sup> en adelante). Su silueta describe una elipse relación 2:1, su costo es alto. Si la relación de ejes de la elipse es 2:1, el esfuerzo de la tapa es similar al esfuerzo de un cilindro, para la misma presión.

Los diámetros disponibles, basados en diámetro externo del recipiente, tienen incrementos de 2 in en el intervalo de 12 a 42 in, y de 6 en el intervalo de 42 a 216 in.

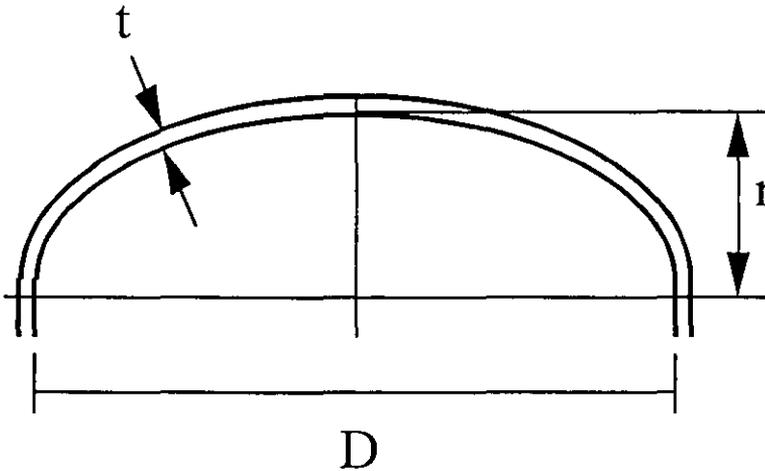


Figura 4-4. Tapa Elíptica

**Tapas Hemisféricas.** Utilizadas exclusivamente para soportar presiones críticas. Como su nombre lo indica, su silueta describe una media circunferencia perfecta.

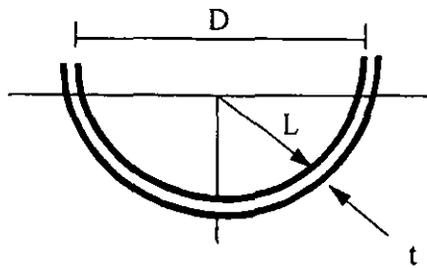


Figura 4-5. Tapa hemisférica.

Su costo es alto y no hay límite dimensional para su fabricación. Para un espesor dado, las tapas hemisféricas son las más resistentes de todas las tapas moldeadas. Resisten aproximadamente dos veces más que una tapa elíptica.

**Tapas Cónicas.** Se usan para cerrar recipientes como tolvas, evaporadores, separadores, cristalizadores, etc. También aparecen secciones cónicas para efectuar cambios de diámetro en torres de destilación, vaporizadores, rehervidores, etc. No hay límites en cuanto a dimensiones para su fabricación y su única limitación consiste en el ángulo del vértice no debe ser mayor de  $60^\circ$ .

Las tapas cónicas con ángulo mayor de  $60^\circ$  en el vértice, deberán ser calculadas como tapas planas.

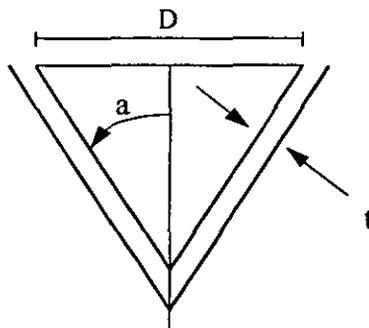


Figura 4-6. Tapa Cónica.

*Tapas Toricónicas.* A diferencia de las tapas cónicas este tipo de tapas tiene en su diámetro mayor un radio de transición que no deberá ser menor del 6% del diámetro mayor o tres veces del espesor. Tiene las mismas restricciones que la tapa cónica a excepción de que en México no se pueden fabricar con un diámetro mayor de 6 metros.

### ECUACIONES DE DISEÑO.

DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	
Casco cilíndrico	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$
Casco Esférico	$t = \frac{PR}{2SE - 0.6P}$	$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$
Tapa Hemisférica	$t = \frac{PL}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{L + 0.2t}$
Tapa Elipsoidal	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$
Tapa Toriesférica	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$
Tapa Cónica	$t = \frac{PD}{2\cos\alpha(SE - 0.6P)}$	$P = \frac{2SEt \cos\alpha}{D + 1.2T \cos\alpha}$

Tabla. VIII. Ecuaciones de diseño.

### RECIPIENTES DE CONSTRUCCIÓN ESPECIAL

Las presiones elevadas crean problemas de diseño. La Sección VIII, División I del Código de la ASME se aplica a recipientes clasificados para presiones de hasta de 3000 lb/in<sup>2</sup>. La División 2 es ilimitada. A presiones elevadas, se utilizan diseños especiales que no se conformen necesariamente al Código. A esas presiones, un recipiente diseñado para placas ordinarias de acero con bajo contenido de carbono, sobre todo en diámetros grandes, sería demasiado grueso para la fabricación práctica mediante los métodos ordinarios. Las alternativas son las de hacer el recipiente de placa de alta resistencia, utilizar una forja sólida o una construcción de capas múltiples. De entre todas esas alternativas, sólo la forja satisface los requerimientos del Código.

*Los aceros de alta resistencia* con resistencia a la tensión de más de 200,000 lb/in<sup>2</sup> se limitan en gran parte a aplicaciones en las que el peso es importante. Los procedimientos de soldadura están cuidadosamente controlados y se utiliza el precalentamiento.

Esos materiales son quebradizos casi a cualquier temperatura y se deben diseñar los recipientes para evitar las fracturas quebradizas. Se evitan los puntos planos y las variaciones de curvatura. Las aberturas y los cambios de forma requieren un diseño apropiado.

El tamaño máximo permisible de las fallas se determina por la mecánica de fracturas y el método de examen debe asegurar hasta donde sea posibles que no haya fallas grandes. Se pueden usar todos los métodos de pruebas no destructivas. Estos recipientes requieren las técnicas más elaboradas de diseño, fabricación y funcionamiento.

Se utilizan con frecuencia *piezas sólidas de forja* en la construcción de recipientes a presión por encima de 3000 lb/in<sup>2</sup> (e incluso inferiores). Aun cuando se puede obtener cualquier espesor del cuerpo, la mayoría de ellos se encuentran entre 2 y 12 in. El Código de la ASME da una lista de materiales de forja con resistencia a la tensión de 60,000 a 120,000 lb/in<sup>2</sup>. La fractura quebradiza es una posibilidad y el riesgo aumenta con el espesor. Además, algunas aleaciones de forja tienen temperaturas de ductilidad nula de hasta 250°F. Un recipiente de forja tendrá una temperatura de ductilidad nula de al menos 30°F por debajo de la temperatura de diseño. En funcionamiento, se deberá calentar en forma lenta y uniforme al menos hasta la temperatura de ductilidad nula, antes de someterse a presión. Durante la construcción, se deben utilizar pruebas no destructivas para detectar las fallas o las grietas peligrosas. La sección VIII del Código de la ASME y, sobre todo, la división 2, proporciona técnicas de diseño y verificación.

Conforme aumenta el tamaño de un recipiente forjado, los tamaños de los lingotes y los equipos de manejo se hacen mayores. El costo puede aumentar con mayor rapidez que el peso. También se hacen más difíciles los problemas de obtención de materiales sanos para evitar las fracturas quebradizas. Algunos de esos problemas se evitan mediante la utilización de una *construcción en capas múltiples*. Este tipo de recipientes, las cabezas y las bridas se hacen de piezas de forja y la porción cilíndrica se construye mediante una serie de capas de material delgado. El espesor de esas capas puede ser de entre 1/8 y 2 in, dependiendo del tipo de construcción. Hay un recubrimiento interno que puede ser diferente de las capas externas.

Aun cuando hay recipientes de capas múltiples de sólo 15 in de diámetro exterior y 8 pies de longitud, su ventaja principal se aplica a tamaños mayores. Cuando se fabrica adecuadamente, un recipiente de capas múltiples es quizá más seguro que otro de paredes sólidas. Las capas de materiales delgados son más resistentes y menos propensos a las fracturas quebradizas, tienen menos probabilidades de defectos y la ventaja estadística de cierto número de elementos pequeños en lugar de uno solo grande. Por supuesto, las cabezas, las bridas y las soldaduras tienen los mismos riesgos que en otros miembros gruesos. Se necesita una atención adecuada para evitar las grietas en esos miembros.

Existen varias técnicas de montaje. Una de las que se utiliza con mayor frecuencia es la de formar capas sucesivas en semicilindros y soldarlas por ensamble sobre las capas anteriores. Al realizar esto las soldaduras se escalonan con el fin de que no puedan fallar todas juntas.

Por lo común, en este tipo de construcción se utilizan placas de un espesor de  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  de pulgada. Otro método consiste en soldar cada tapa por separado para formar un cilindro y, luego, contraerlo sobre las capas previas.

Las capas de hasta 2 in de espesor se montan de este modo. Un tercer método de fabricación consiste en enrollar las capas como láminas continuas. Esta técnica se utiliza en Japón. La construcción Wickel fabricada en Alemania, utiliza devanados helicoidales de flejes metálicos entrelazados. Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes y la elección dependerá de las circunstancias. Debido a la posibilidad que haya vacíos entre las capas, es preferible no utilizar recipientes de capas múltiples en aplicaciones en las que se vean sometidos a la fatiga. Tampoco son convenientes los gradientes térmicos hacia el interior (temperatura interna más baja que la externa).

## ***LA SEGURIDAD EN EL DISEÑO***

En la mayoría de las circunstancias, el diseño de un recipiente de presión según el Código proporciona una seguridad adecuada. No obstante, según las mismas palabras del Código, las reglas "cubren los requisitos mínimos de construcción para el diseño, la fabricación, la inspección y la certificación de recipientes de presión". La palabra más importante es "mínimos". La responsabilidad final por la seguridad reposa en el usuario y el diseñador. Deben decidir si se necesita algo que vaya más allá que los requisitos del Código. Este último no puede prever y cubrir todas las condiciones desacostumbradas a las que se puede ver sometido un recipiente de presión. Si tratara de hacerlo así, la mayoría de los recipientes tendrían restricciones innecesarias. Algunas de las condiciones a las que se puede enfrentar un recipiente son las siguientes: temperaturas anormalmente bajas, esfuerzos térmicos especiales, esfuerzos de retén causados por ciclos térmicos, vibración de los recipientes altos excitados por vértices de Karmán provocados por el viento, presiones muy elevadas, reacciones químicas desencadenadas, recalentamientos locales repetidos, explosiones, exposición al fuego, exposiciones a materiales que atacan con rapidez al metal, contenido de materiales extremadamente tóxicos y tamaños muy grande de recipientes. Los recipientes grandes, aunque pueden tener materiales no peligrosos, podrían, por su tamaño mismo, crear un peligro grave si se rompieran. La falla del tanque de melazas de Boston en 1919 mató a 12 personas. Para recipientes de presión que se encuentran fuera de jurisdicción del código, hay a veces riesgos especiales en los plásticos y los materiales de resistencia muy elevada.

## PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

La mayoría de los métodos de pruebas no destructivas tienen el propósito de detectar defectos internos capaces de causar fallas a la fatiga o a cargas estáticas. Estas pruebas se llevan a cabo en el trabajo en proceso de modo que puedan rechazarse en forma oportuna las partes defectuosas, ahorrando por lo mismo gastos adicionales de esfuerzos.

Las pruebas también se realizan en componentes usados durante el desensamblado del equipo que ha estado en servicio, con la intención de detectar el inicio de grietas de fatiga. En forma breve se describen los métodos de uso común de pruebas no destructivas.

La *radiografía de rayos X, rayos gamma y neutrones* actúa sobre papel o película fotográfica sensitiva. Los neutrones chocan primero en una pantalla de transferencia que produce una imagen radiada después que han pasado a través del material. La radiación se pasa, absorbe y dispersa sobre objetos opacos. Cuanto más grueso y denso sea el objeto, menor será la proporción de irradiación incidente que pasa. Por tanto, si un objeto tiene un defecto interno pasará más radiación a través del área defectuosa que a través de la región sólida, y el efecto se mostrará como una área oscura en la película. Desafortunadamente, la dispersión tiende a oscurecer el defecto, de modo que no pueden detectarse los defectos pequeños. Los defectos planos, tales como las superficies producidas por una grieta, no se detectan por rayos X, pero los defectos en tres dimensiones, como porosidad por gas en fundición, se disciernen con facilidad. La escoria y arena, que son mucho menos densas que el metal, también se encuentran con facilidad mediante rayos X en las fundiciones.

Aunque el equipo de rayos X viene en muchos tamaños y capacidades y da los mejores resultados para la mayoría de las aplicaciones, en algunos casos otros métodos son superiores. Las fuentes de rayos gamma pueden ser pequeñas y de uso conveniente, ya sea para inspeccionar desde el interior de un tubo. Las longitudes de ondas cortas de los rayos gamma son efectivas para las secciones gruesas de material. La absorción de neutrones es, en forma figurada, la inversa de los rayos X o rayos gamma. Por ejemplo, los neutrones se absorben más fácilmente por el hidrógeno que por el plomo. Por tanto, la radiografía por neutrones puede mostrar condiciones no reveladas por otros. En cualquier evento, deben tomarse precauciones para evitar los riesgos de la radiación en los seres humanos.

Los *métodos magnéticos* para la detección de defectos se basan en el principio de que los defectos o discontinuidades distorsionan un campo magnético inducido en un material ferroso. Hay varios métodos para detectar las irregularidades. El más común es el método de *prueba con partículas magnéticas o magnaflux*, el cual implica espolvorear la pieza magnetizada con partículas magnéticas finas o revestirlo con una suspensión líquida de tales partículas. Las partículas magnéticas se sostienen marcando las fugas del campo magnético en los bordes de las grietas.

Las partículas magnéticas fluorescentes y la luz ultravioleta sirven como refinamiento del proceso al resaltar la apariencia de la grieta. La prueba con partículas magnéticas detecta sólo grietas en o cerca de la superficie.

Algunos *métodos electromagnéticos* actúan induciendo corrientes parásitas en un espécimen y detectando irregularidades o sus formas en las corrientes inducidas o en campos magnéticos en los materiales ferrosos. En un método, la respuesta se compara con la de una pieza estándar. Estas técnicas pueden aplicarse para detectar defectos (aún los internos profundos), para separar materiales mezclados de aleación o de tamaño calibrado, forma, espesores de revestimiento electrolítico o de aislamiento, o profundidad de la capa endurecida del acero.

Las *pruebas ultrasónicas* pueden aplicarse a una amplia variedad de materiales y formas: metales, plásticos, cerámica, vidrio, laminado, fundiciones, soldadura, forjas, etc. Una onda ultrasónica se transmite a través de una sustancia y su acción se interpreta en tres formas para mostrar defectos. En la *técnica de pulso-eco*, las ondas se reflejan de la superficie lejana y desde las superficies internas de defectos.

Un osciloscopio traza las reflexiones (picos) indicando las posiciones y tamaños de los defectos. El sonido se pasa a través del material y se capta en el otro lado en el *método de transmisión*. La energía perdida en el tránsito debido a las reflexiones indica los tamaños y posiciones de los defectos. La *técnica de resonancia* aplica frecuencias dentro de ciertos márgenes. La energía retirada por el transductor aumenta a la frecuencia resonante del espécimen. Si esta frecuencia es diferente de la observada en una parte estándar del mismo tamaño, indica un defecto. La prueba ultrasónica es útil para revelar grietas, vacíos y defectos bastante profundos lo mismo que cercanos a la superficie. Se requiere habilidad y cuidado para su aplicación e interpretación.

Los *métodos de inspección visual* han sido mejorados con la invención de tintes y líquidos penetrantes fluorescentes. Las partes se sumergen en uno de esos fluidos y entonces se limpian para secar cualquier exceso. Entonces el fluido absorbido tiende a salir de las grietas que llegan a la superficie cuando el miembro se espolvorea con un polvo absorbedor. Los tintes penetrantes pueden verse con luz ordinaria, en tanto que los aceites fluorescentes se ven mejor bajo luz ultravioleta. El método no se restringe a las aleaciones ferrosas, pero está limitado a la detección de grietas delgadas que intersecan a la superficie.

## ***CUIDADO DE LOS RECIPIENTES A PRESIÓN***

La protección contra la presión excesiva entra en gran parte en los requisitos del Código sobre los dispositivos de purga. La exposición al fuego se cubre también en el Código; sin embargo, en éste no hay disposiciones para la posibilidad de sobrecalentamientos locales y debilitamiento de cualquier recipiente en un incendio. El aislamiento reduce la capacidad de purga que se requiere y también la posibilidad de sobrecalentamientos locales.

Una válvula reductora de la presión en una línea que conduzca a un recipiente de presión no será una adecuada protección contra la presión excesiva. Su falla someterá al recipiente a la presión completa de la línea, a menos que el dispositivo de purga de presión pueda mantener una presión segura en esas condiciones.

Los recipientes que tengan un ciclo operacional que implique la solidificación de materiales podrá desarrollar presiones excesivas. Si se aplica calor a ese extremo para provocar la fusión, la expansión del líquido podrá hacer que se acumule una presión elevada y dará como resultado la cedencia o la ruptura. La solidificación en las tuberías de conexión puede crear problemas similares.

Algunos recipientes se pueden exponer a una explosión o a una reacción química continua. Esto requiere de válvulas de purga, discos de ruptura o, en casos extremos, una barricada. Un recipiente con un disco de ruptura grande necesita anclajes diseñados para el impulso del chorro al saltar el disco.

Es preciso tomar en consideración el vacío. Casi siempre es posible que el contenido de un recipiente se contraiga o se condense lo suficiente para provocar un vacío interno. Si el recipiente no puede soportar el vacío, deberá tener válvulas de interrupción de vacío.

Las operaciones inadecuadas en un proceso pueden dar como resultado que el *recipiente sobrepase la temperatura de diseño*. La única solución para este problema es el control adecuado. Los procedimientos de mantenimiento pueden provocar temperaturas excesivas. A veces, el contenido de un recipiente se puede quemar con sopletes. Si la llama llega al cuerpo del recipiente, pueden producirse daños y sobrecalentamientos.

Las *temperaturas excesivamente bajas* pueden implicar un riesgo de fractura por fragilidad. Un recipiente que no se utilice en climas fríos, podrá estar a una temperatura inferior a cero y muy por debajo de ductilidad nula. Al poner en servicio, el recipiente se deberá calentar lentamente y de manera uniforme, hasta que esté por encima del punto de ductilidad nula. Un valor seguro para una placa, si no se conoce su temperatura de ductilidad nula, es el de 100°F. El recipiente no se deberá someter a presión hasta sobrepasar esa temperatura. Incluso por encima de la temperatura de ductilidad nula, el enfriamiento o calentamiento con una rapidez excesiva pueden provocar esfuerzos térmicos.

La *corrosión* es quizá la mayor amenaza para la vida de un recipiente. Los recipientes llenos en forma parcial tienen con frecuencia picaduras importantes en la interfaz líquido-vapor. Por lo común, los recipientes no tienen un margen de corrosión en la parte exterior. La falta de protección contra el medio o el derramamiento de productos químicos corrosivos puede reducir la vida de un recipiente. El aislamiento puede contener sustancias dañinas. Los cloruros en los materiales pueden provocar grietas en los aceros inoxidables.

Hay muchos modos en los que un recipiente de presión pueda sufrir *daños mecánicos*. Las corazas se pueden abollar o incluso perforar, pueden caerse o verse atacados por cables de grúas fijas, se pueden romper los pernos, se doblan las bridas mediante el aprietamiento excesivo de los pernos, las caras de contacto de los empaques pueden rasparse o abrirse, las paletas giratorias pueden raspar las corazas y provocar desgastes y se puede colocar una brida con un empaque que esté a mitad de la ranura y a mitad fuera de ella.

La mayor parte de esos tipos de daños se pueden evitar mediante la utilización del sentido común y mucho cuidado. Si se reparan los daños mediante la rectificación, como en el caso de las conchas con abolladuras, puede ser necesario aliviar de esfuerzos la zona raspada. Algunos aceros son propensos a volverse quebradizos mediante el envejecimiento, después de deformaciones importantes.

Uno de los procedimientos más seguros es el de cortar y retirar la zona dañada y reemplazarla. Es útil consultar, de la National Boards, *Recommended Rules of Repairs of Power Boilers and Unfired pressure vessels by Riveting and Welding*, National Board of Boiler and pressure Vessel Inspectors. No obstante, cualquier reparación es aceptable si se hace de acuerdo con las reglas del Código de recipientes a presión.

Los recipientes de presión *se deben inspeccionar periódicamente*. No se puede dar una regla sobre la frecuencia de esas inspecciones. Depende de las condiciones operacionales. Si las primeras inspecciones de un recipiente indican un índice bajo de corrosión, se podrán alargar los intervalos entre inspecciones. Algunos recipientes se examinan a intervalos de cinco años y otros, hasta una vez por año. La medición de la corrosión es un concepto importante de inspección.

Uno de los modos más convenientes de medir el espesor (y la corrosión) es el de utilizar un medidor ultrasónico. Es preciso observar y señalar la ubicación de la corrosión y si es uniforme o se localiza en socavamientos profundos. Se deben examinar las grietas, las fugas y todos los tipos de distorsiones.

Las grietas son particularmente peligrosas, porque pueden provocar fallas repentinas. Casi siempre se deja el aislamiento en su lugar durante la inspección de los recipientes aislados; sin embargo, si se sospecha que hay fuerte corrosión externa, será preciso retirar el aislamiento. Para los exámenes son útiles todas las pruebas no destructivas.

# CAPITULO 5

## MEMORIA DE CALCULO

**MEMORIA DE CALCULO**

Cantidad de Hidrógeno requerido (Q):

Calor de combustión del hidrógeno = 120 MJ / Kg = 120000000 J/s

Cantidad deseada de electricidad = 100 Kw = 100000 J/s

$Q = \text{Calor de combustión} / \text{Cantidad de electricidad}$

$Q = 8.333e-04 \text{ Kg/s} = 2,160,000 \text{ g/mes}$

Condiciones de almacenamiento:

Temperatura de operación = 25°C

Presión de operación = 150 atm.

Calculo del volumen molar del hidrógeno empleando las ecuaciones de estado de:

- Gas ideal.
- Soave.
- Modificación de Graboski.

**GAS IDEAL.**

*Datos*

*Ecuación*

*Donde:*

P = 150 atm.

n =  $1.08 \times 10^6$  gmol

T = 25°C = 298°K

PV = nRT

$V = (nRT / P)$

n = g / w

w = Peso molecular

R = Constante Universal

*Operaciones:*

$$V = \frac{(1.08 \times 10^6 \text{ gmol} * 0.082 [ (\text{lbs} - \text{atm}) / (\text{gmol} \text{ } ^\circ\text{K}) ] * 298^\circ\text{K})}{150 \text{ atm}}$$

$$V = 175940 \text{ lts} \approx 176000 \text{ lts.}$$

$$V = 176 \text{ m}^3$$

**ESTA TESIS NO DEBE  
CALIR DE LA BIBLIOTECA**

**SOAVE.****Datos**

$T = 298^{\circ}\text{K}$   
 $P = 150 \text{ atm}$   
 $T_c = 33.2^{\circ}\text{K}$   
 $P_c = 12.8 \text{ atm}$   
 $w = -0.22$

**Ecuación**

$$V^3 - V^2 (RT / P) - V(a\alpha/P - bRT/P - Pb^2/P) - a\alpha b/P = 0$$

**Donde:**

$$\alpha = [1 + m(1 - T_r^{1/2})]^2$$

$$m = 0.48508 + 1.5517w - 0.15613w^2$$

$$a = 0.42747 (R^2 T_c^2 / P_c)$$

$$b = 0.08664 (R T_c / P_c)$$

$$T_r = T / T_c$$

$$P_r = P / P_c$$

**Operaciones:**

$$m = 0.48508 + [1.5517 * (-0.22)] - [0.15613 * (-0.22)]^2$$

$$m = 0.136149$$

$$\alpha = [1 + 0.136149 * \{1 - (0.97)^{1/2}\}]^2$$

$$\alpha = 0.53054$$

$$a = \frac{0.42747 * (0.082 \text{ lts atm gmol}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1})^2 * (33.2^{\circ}\text{K})^2}{12.8 \text{ atm}}$$

$$a = 0.247513 \text{ lts}^2 \text{ atm mol}^{-2}$$

$$b = \frac{0.08664 * (0.082 \text{ lts atm gmol}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}) * (33.2^{\circ}\text{K})}{12.8 \text{ atm}}$$

$$b = 0.018427 \text{ lts mol}^{-1}$$

$$\frac{a\alpha}{P} = \frac{(0.247513 \text{ lts}^2 \text{ atm gmol}^{-2}) * (0.53054)}{150 \text{ atm}}$$

$$\frac{a\alpha}{P} = 8.7543 \times 10^{-4} \text{ lts}^2 \text{ gmol}^{-2}$$

$$\frac{bRT}{P} = \frac{(0.018427 \text{ lts gmol}^{-1}) * (0.082 \text{ lts atm gmol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}) * (298^\circ\text{K})}{150 \text{ atm}}$$

$$\frac{bRT}{P} = 3.0018 \times 10^{-3} \text{ lts}^2 \text{ gmol}^{-2}$$

$$b^2 = (0.018427 \text{ lts gmol}^{-1})^2$$

$$b^2 = 3.3955 \times 10^{-4} \text{ lts}^2 \text{ gmol}^{-2}$$

$$\frac{a\alpha b}{P} = \frac{(0.247513 \text{ lts}^2 \text{ atm gmol}^{-2}) * (0.53054) * (0.018427 \text{ lts gmol}^{-1})}{150 \text{ atm}}$$

$$\frac{a\alpha b}{P} = 1.6131 \times 10^{-5} \text{ lts}^3 \text{ gmol}^{-3}$$

$$\frac{RT}{P} = \frac{(0.082 \text{ lts atm gmol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}) * (298^\circ\text{K})}{150 \text{ atm}}$$

$$\frac{RT}{P} = 0.162906 \text{ lts gmol}^{-1}$$

$$V^3 - V^2(0.162906) + V(8.7542 \times 10^{-4} - 3.0018 \times 10^{-3} - 3.3955 \times 10^{-4}) - 1.6131 \times 10^{-5} = 0$$

$$V = 0.1773325 \text{ lts gmol}^{-1}$$

$$V = 191,511 \text{ lts} \approx 192,000 \text{ lts} = 192 \text{ m}^3$$

## MODIFICACIÓN DE GRABOSKI.

**Datos****Ecuación**

$$T = 298^{\circ}\text{K}$$

$$P = 150 \text{ atm}$$

$$T_c = 33.2^{\circ}\text{K}$$

$$P_c = 12.8 \text{ atm}$$

$$w = -0.22$$

$$V^3 - V^2 (RT/P) - V(\alpha/P - bRT/P - Pb^2/P) - \alpha b/P = 0$$

**Donde:**

$$\alpha = 1.202 \text{ EXP } (-0.3028 T_r)$$

$$a = 0.42747 (R^2 T_c^2 / P_c)$$

$$b = 0.08664 (R T_c / P_c)$$

$$T_r = T / T_c$$

$$P_r = P / P_c$$

$$\alpha = 1.202 \text{ EXP } [-0.3028 * (8.97)]$$

$$\alpha = 7.9432 \times 10^{-2}$$

$$a = \frac{0.42747 * (0.082 \text{ lts atm gmol}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1})^2 * (33.2^{\circ}\text{K})^2}{12.8 \text{ atm}}$$

$$a = 0.247513 \text{ lts}^2 \text{ atm mol}^{-2}$$

$$b = \frac{0.08664 * (0.082 \text{ lts atm gmol}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}) * (33.2^{\circ}\text{K})}{12.8 \text{ atm}}$$

$$b = 0.018427 \text{ lts mol}^{-1}$$

$$\frac{\alpha}{P} = \frac{(0.247513 \text{ lts}^2 \text{ atm gmol}^{-2}) * (7.9432 \times 10^{-2})}{150 \text{ atm}}$$

$$\frac{a\alpha}{P} = 1.3106 \times 10^{-4} \text{ lts}^2 \text{ gmol}^{-2}$$

$$\frac{bRT}{P} = \frac{(0.018427 \text{ lts gmol}^{-1}) * (0.082 \text{ lts atm gmol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}) * (298^\circ\text{K})}{150 \text{ atm}}$$

$$\frac{bRT}{P} = 3.0018 \times 10^{-3} \text{ lts}^2 \text{ gmol}^{-2}$$

$$b^2 = (0.018427 \text{ lts gmol}^{-1})^2$$

$$b^2 = 3.3955 \times 10^{-4} \text{ lts}^2 \text{ gmol}^{-2}$$

$$\frac{a\alpha b}{P} = \frac{(0.247513 \text{ lts}^2 \text{ atm gmol}^{-2}) * (7.9432 \times 10^{-2}) * (0.018427 \text{ lts gmol}^{-1})}{150 \text{ atm}}$$

$$\frac{a\alpha b}{P} = 2.415 \times 10^{-6} \text{ lts}^3 \text{ gmol}^{-3}$$

$$\frac{RT}{P} = \frac{(0.082 \text{ lts atm gmol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}) * (298^\circ\text{K})}{150 \text{ atm}}$$

$$\frac{RT}{P} = 0.162906 \text{ lts gmol}^{-1}$$

$$V^3 - V^2(0.162906) + V(1.3106 \times 10^{-4} - 3.0018 \times 10^{-3} - 3.3955 \times 10^{-4}) - 2.415 \times 10^{-6} = 0$$

$$V = 0.180742 \text{ lts gmol}^{-1}$$

$$V = 195201.36 \text{ lts} \approx 195,000 \text{ lts} = 195 \text{ m}^3$$

<i>Ecuación de estado</i>	<i>Modelo matemático</i>	<i>Volumen</i>
<i>Gas Ideal</i>	$PV = nRT$	175,940 Lts.
<i>Soave</i>	$V^3 - V^2 (RT/P) - V(a\alpha/P - bRT/P - Pb^2/P) - a\alpha b/P = 0$	191,511 Lts.
<i>Modificación de Graboski</i>	$V^3 - V^2 (RT/P) - V(a\alpha/P - bRT/P - Pb^2/P) - a\alpha b/P = 0$	195,201 Lts.

**Tabla IX.** Volumen obtenido con diferentes ecuaciones de estado.

A presiones elevadas el volumen del gas no solo disminuye, también puede licuarse, por lo tanto se realizó el cálculo de la temperatura de rocío empleando la ecuación de Antonie. Si la temperatura especificada es mayor que la temperatura de rocío entonces solo existe el estado gaseoso.

<i>Datos</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Despejando T</i>
A = 13.6333 B = 164.9 C = 3.19 P = 150 atm = 114000 mmHg	$\ln P = A - B/(T + C)$	$T = B/(A - \ln P) - C$

*Operaciones:*

$$T = \frac{164.9}{13.6333 - \ln(114000)} - 3.19$$

$$T = 79.24^\circ\text{K}$$

$$T = -193.44^\circ\text{C} \therefore \text{solo existe el estado gaseoso.}$$

## ***GEOMETRIA PROPUESTA Y DIMENSIONES.***

Se selecciona la esfera, ya que a esta presión de operación la esfera distribuye mejor el esfuerzo, además de almacenar grandes volúmenes.

$$\text{Volumen de la esfera: } V = (4/3)\pi r^3$$

Despejando el radio tenemos:

$$r = (3V/4\pi)^{1/3}$$

Obteniendo el radio con los volúmenes obtenidos por medio de las ecuaciones de estado empleadas tenemos:

**IDEAL**

$$r = [ 3 (176 \text{ m}^3) / 4\pi ]^{1/3}$$

$$r = 3.476 \text{ m}; D = 6.9529 \text{ m} \approx 7 \text{ m}$$

**SOAVE.**

$$r = [ 3 (192 \text{ m}^3) / 4\pi ]^{1/3}$$

$$r = 3.5788 \text{ m}; D = 7.1576 \text{ m} \approx 7.5 \text{ m}$$

**MODIFICACIÓN DE GRABOSKI.**

$$r = [ 3 (195 \text{ m}^3) / 4\pi ]^{1/3}$$

$$r = 3.5973 \text{ m}; D = 7.1946 \text{ m} \approx 7.5 \text{ m}$$

Sabiendo el volumen del gas a almacenar, condiciones de operación y el radio, se realizó calculo del espesor del casco haciendo referencia al código A.S.M.E div. I parte UG-27.

**- Cálculo del espesor de la pared:**

$$t = t(P_D, T_D, E, S, C)$$

$$T_D = \text{Temp. Operación} + 25^\circ\text{F}$$

$$T_D = 77^\circ\text{F} + 25^\circ\text{F} = 102^\circ\text{F}$$

$$P_D = \text{Presión de operación} * 1.1$$

$$P_D = (2205 \text{ psi}) * (1.1) = 2425.5 \text{ psi} \approx 2426 \text{ psi}$$

Material seleccionado acero al carbón SA-285C

$$S = 13700 \text{ psi}$$

$$E = 1$$

**- Operaciones:**

$$t = \frac{P_D r}{SE + 0.4P_D}$$

$$t = \frac{(2426 \text{ psi}) * (148 \text{ in})}{(13700 \text{ psi}) * (1) + (0.4 * 2426 \text{ psi})}$$

$$t = \underline{24.47 \text{ in}; 62.16 \text{ cm} \approx 62.5 \text{ cm}}$$

- Material seleccionado acero austenítico SA-266

$$S = 23900 \text{ psi}$$

$$E = 1$$

$$t = \frac{P_D r}{SE + 0.4P_D}$$

$$t = \frac{(2426 \text{ psi}) * (148 \text{ in})}{(23900 \text{ psi}) * (1) + (0.4 * 2426 \text{ psi})}$$

$$t = \underline{14.43 \text{ in}; 36.67 \text{ cm} \approx 37 \text{ cm}}$$

El espesor de la pared obtenido en los cálculos anteriores es demasiado grande para la construcción de placas soldadas, por lo tanto, la alternativa es construir un recipiente integralmente forjado, apoyándose para el dimensionamiento en el apéndice 22 y su parte UF.

## APENDICE 22 (VASIJA INTEGRALMENTE FORJADO).

### OPCION I

#### ALCANCE.

Este apéndice cubre los requerimientos mínimos para el diseño, fabricación, e inspección de vasijas a presión integralmente forjados, los materiales empleados tienen un elevado esfuerzo permisible que está regidos por la parte UF, además de proveer requerimientos adicionales.

#### MATERIALES.

El material forjado debe satisfacerse con los aceros SA-372 tipo I, II, III, IV y V grados 1, 2, 3, 4 y 5 clase A y B.

#### DISEÑO.

1. Para un esfuerzo máximo permisible dado, el valor mínimo de resistencia a la tensión será de  $1/3$ .
2. El diámetro interior máximo de la vasija no debe de exceder de 24 in.
3. La temperatura de diseño debe de estar entre  $-20^{\circ}\text{F}$  y  $200^{\circ}\text{F}$ .
4. La vasija debe ser un diseño fácil y fluido, con las siguientes características:
  - La porción del casco no debe tener productores de esfuerzos tales como aberturas, orificios, uniones soldadas o estampados excepto para el estampado de identificación en el material del forjado previo al tratamiento térmico.
  - Las tapas se deben de conformar en caliente, deben de ser cóncava para soportar la presión, se deben de proveer detalles de diseño y construcción de las aberturas del centro que deben ser tan seguros como aquellos que proporcionan las reglas de esta división, la abertura central no debe de exceder del 50% del diámetro del casco o de 3 in. Del tamaño del tubo la otra abertura en la tapa no debe de exceder de  $3/4$  de in. del tamaño del tubo, la abertura debe de colocarse en un punto donde el esfuerzo sea calculado, se deben de evitar cavidades, no debe de ser superior de  $1/6$  el esfuerzo mínimo a la tensión.
  - El casco no debe estar sujeto interna o externamente a la corrosión.
  - El casco no debe someterse a golpes, operaciones cíclicas y choques.
  - El casco no debe de ser soldado.

**TRATAMIENTO EN CALOR**

- Después de haber concluido la operación de forjado, el casco completo debe de ser tratado térmicamente por uno de los métodos de contorno a los materiales SA-372.
- Las propiedades de tensión deben determinarse por el método de prueba de perfil para los materiales SA-372.
- Después de haber terminado la prueba del líquido penetrante y templador, el recipiente se someterá a la prueba de endurecimiento como lo indica la parte UF-31 (b), (1).
- Después del tratamiento térmico, la superficie exterior de todo el recipiente, (independientemente del tipo de tratamiento térmico) debe de ser sometido a la prueba de partículas magnéticas o a la prueba de líquido penetrante de acuerdo a la parte UF-31 (b), (1), (a).

**REQUISITOS PARA CASCOS A PRESION  
FABRICADOS POR FORJADO  
(PARTE UF)**

Las reglas en la parte UF son aplicables a cascos a presión forjados, quedando excluidas las juntas longitudinales, incluyendo aquellas partes del componente que son fabricados de acero al carbón y aceros de baja aleación o los aceros de alta aleación dentro de las limitaciones de la parte UHA. Estas reglas deben de usarse en conjunto con los requerimientos aplicables en la subsección A y con los requerimientos especificados de la subsección C, que pertenecen a la clase respectiva de todos los materiales empleados.

**MATERIALES**

- a). Los materiales usados en la construcción de cascos forjados a presión, se deben complementar con los requisitos para los materiales dados en la parte UG-4 a UG-14, excepto a aquellos específicamente limitados o extendidos en b) y c) y en la parte UF-6.
- b). El contenido de carbono no debe de exceder del 0.35% si el forjado en caliente se debe de realizar por soldadura. Sin embargo cuando la soldadura involucra solo una pequeña unión estos se refieren a la parte UF-32. El contenido de carbono no debe exceder del 0.50%, para las reparaciones que se limitan a la parte UF-37 y para el sello de soldadura para conexiones de rosca, limitados por la parte UF-43. Para un contenido de carbono superior al 0.50% la soldadura no es permitida.
- c). Esta parte contiene requerimientos especiales aplicables a los materiales SA-372 que están sujetos a líquido penetrante y al ajuste por tratamiento térmico. Donde tales requerimientos no aplican a aceros austeníticos o materiales que no tengan una resistencia

mínima a la tensión superior a los 95000 psi. Los materiales SA-372 deben de ser enfriados rápidamente para lograr las propiedades mínimas especificadas para proporcionar.

1. Después del tratamiento térmico, inspeccionar el recipiente para detectar daños perjudiciales, realizarlo acorde a la parte UF-31 (b), (1), (a).
2. La resistencia a la tensión no debe de ser mayor de 20ksi sobre la resistencia a la tensión mínima especificada.

d). Para recipientes construidos del material SA-372 clase VIII, se debe realizar la prueba de impacto transversal a la temperatura mínima permitida, acorde con la parte UHT de esta división, excepto en el caso donde la temperatura no debe de ser mayor de -20°F. La certificación es requerida. La inspección ultrasónica se debe realizar acorde con la parte UF-55.

Una vez conocido el método de construcción del recipiente y del material para su construcción, se realizó el cálculo del espesor del casco empleando la fórmula de la parte UG-27 del código A.S.M.E. Div 1.

El código señala que el diámetro máximo interior debe de ser de 24 pulgadas, sabiendo este dato y el volumen a almacenar que es de 62.9 ft<sup>3</sup> se obtendrá la longitud del cilindro.

- Dos tapas hemisféricas con capacidad  $H/D = 1$

$V_0 =$  Volumen total de la tapa

$$V_0(V/V_0) = (D^3\pi/12)[2(H/D)^2(1.5-(H/D))]$$

$$V_0(V/V_0) = 0.5235D^3$$

- Capacidad del casco con  $H/D = 1$

$$\theta = 2 \arccos [1-2(H/D)]$$

$$\theta = 6.2831 \text{ rad}$$

$$V_s = V_0(V/V_0) = (\pi/4)D^2L(1/2\pi)(\theta - \text{sen } \theta)$$

$$V_s = 0.7853D^2L$$

$$V_T = 0.5235D^3 + 0.7853D^2L$$

$$63 \text{ ft}^3 = 0.5235D^3 + 0.7853D^2L$$

$$L = [(63 - 0.5235(2 \text{ ft})^3) / 0.7853(2 \text{ ft})^2]$$

$$L = 18.7 \text{ ft} \approx 19 \text{ ft}$$

**- Espesor del casco:**

$$t = t(P_D, T_D, E, S, C)$$

$$T_D = \text{Temp. Operación} + 25^\circ\text{F}$$

$$T_D = 77^\circ\text{F} + 25^\circ\text{F} = 102^\circ\text{F}$$

$$P_D = \text{Presión de operación} * 1.1$$

$$P_D = (2205 \text{ psi}) * (1.1) = 2425.5 \text{ psi} \approx 2426 \text{ psi}$$

$$E = 1$$

$$S = 105000 \text{ psi}$$

$$SF = 3$$

Diámetro = 24 in (apéndice 22; parte 22.3 diseño)

Material acero SA-372 tipo V, grado 5, clase 65

$$t = \frac{P_D r}{SE + 0.4P_D}$$

$$t = \frac{(2426 \text{ psi}) * (12 \text{ in})}{(35000 \text{ psi}) * (1) + (0.4 * 2426 \text{ psi})}$$

$$t = \underline{0.809 \text{ in} = 2.05 \text{ cm}}$$

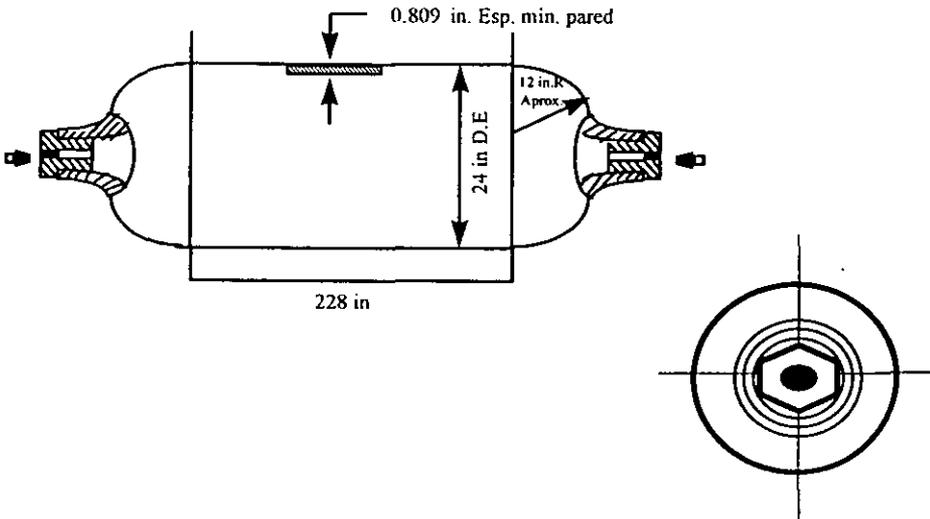


Figura 5-1. Recipiente integralmente forjado. (Opción No. 1). Diseño especial.

## ***PESO DEL RECIPIENTE.***

El peso del recipiente se realizó por medio de la tabla que presenta el manual de recipientes a presión<sup>(6)</sup>, con el conocimiento del diámetro del recipiente, espesor del casco y longitud del mismo:

Peso total del recipiente = Peso de la parte Cilíndrica + Peso de la parte Esférica  
 Peso de la parte cilíndrica =  $(186 \text{ lb/ft}) * (25 \text{ ft}) = 4650 \text{ lb}$   
 Peso de la parte esférica =  $(252 \text{ lb/ft}) * (2 \text{ ft}) = 504 \text{ lb}$   
 Peso total del recipiente = 5154 lb

## ***OPCION 2***

Reduciendo el requerimiento de hidrógeno mensual a uno quincenal y reduciendo la presión de operación a 10 atm, el tamaño del recipiente que almacenará al hidrógeno será aproximadamente semejante a un recipiente de gas estacionario doméstico con un volumen de 300 litros. Teniendo en cuenta que el hidrógeno a esta nueva condición de presión no causa problema de descarburización y fractura del acero seleccionado.

Se ha observado que aumentando el endurecimiento, el trabajo en frío y la presencia de muescas u otras regiones concentradoras de esfuerzos acentúan el efecto del hidrógeno a temperatura del medio, por lo que deben de ser evitadas en el diseño, el material de construcción del recipiente debe de ser un acero de baja aleación, ya que estos aceros son menos propensos al ataque por hidrógeno.

**- Condiciones de operación:**

$$V = 0.3 \text{ m}^3 = 11 \text{ ft}^3$$

$$P_{OP} = 147 \text{ lb/in}^2$$

$$P_D = 147 \text{ lb/in}^2 + 30 \text{ lb/in}^2 = 177 \text{ lb/in}^2$$

$$T_{OP} = 77^\circ\text{F}$$

$$T_D = 77^\circ\text{F} + 25^\circ\text{F} = 102^\circ\text{F}$$

Material seleccionado: Acero baja aleación SA-202 Grado A

Eficiencia de junta: 0.85

Esfuerzo permisible: 18700 psi

Tipos de tapas: Toriesféricas

Con  $L/D = 3$

**-Cálculos:**

*Volumen de las tapas:*

- Dos tapas con capacidad  $H/D = 1$

$$V_N = V_o (V/V_o) = 2[0.0778D^3(2)(H/D)^2(1.5 - H/D)]$$

$$V_N = 0.1556D^3$$

- Capacidad del casco con  $H/D = 1$

$$\theta = 2 \text{ arc cos } [1 - 2(H/D)]$$

$$\theta = 6.28 \text{ rad}$$

$$V_C = V_o (V/V_o) = (\pi/4)D^2L(1/2\pi)(\theta - \text{sen}\theta)$$

$$V_c = 0.7853D^2L$$

$$V_T = 11 \text{ ft}^3 = 0.1556D^3 + 0.7853D^2L$$

$$\text{Con } L/D = 3$$

$$11 = 2.5115D^3$$

$$D = (11/2.5115)^{(1/3)}$$

$$D = 1.6361 \text{ ft} = 49.86 \text{ cm} \approx 50 \text{ cm}$$

$$L = (11 - 0.1556D^3) / 0.7853D^2$$

$$L = (11 - 0.1556(1.64)^3) / 0.7853(1.64)^2$$

$$L = 4.90 \text{ ft} = 149.6 \text{ cm} \approx 150 \text{ cm}$$

**-Espesor del casco:**

$$t_{\text{COR}} = PR/SE - 0.6P$$

$$t_{\text{COR}} = (177 \text{ psi})(9.84 \text{ in}) / (18638 \text{ psi})(0.85) - 0.6(177 \text{ psi})$$

$$t_{\text{COR}} = \underline{0.1124 \text{ in}} = \underline{0.2854 \text{ cm}}$$

$$t_{\text{NOM}} = \underline{1/4''}$$

**-Espesor de las tapas:**

$$\text{Tapa con } L = D \text{ y } r/L = 0.06$$

$$t_{\text{TAPA}} = 0.885(177 \text{ psi})(20 \text{ in}) / 0.85(18638 \text{ psi}) - 0.1(177 \text{ psi})$$

$$t_{\text{TAPA}} = 0.1980 \text{ in} = 0.50 \text{ cm}$$

$$t_{\text{NOM}} = \underline{1/4''}$$

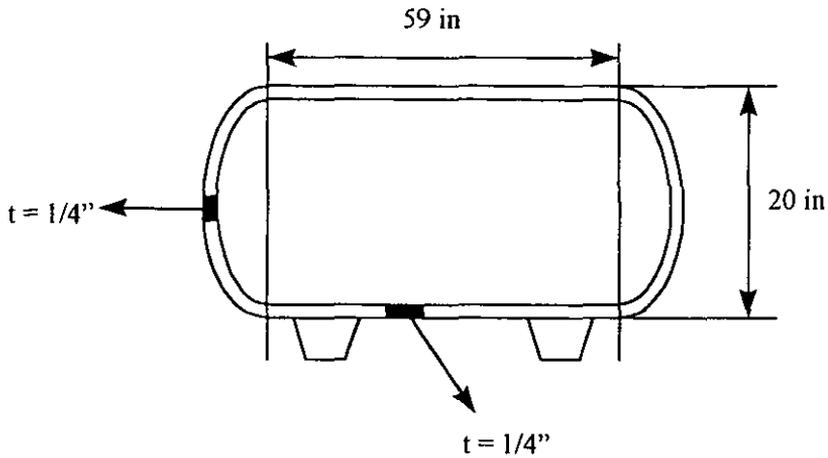


Figura 5-2. Recipiente fabricado por método ordinario (Opción No. 2)

### ***EVALUACION DE COSTO OPCION 1***

Cotización proporcionada por Cryoinfra:

<b><i>DESCRIPCION</i></b>	<b><i>USD</i></b>
Estación reductora de presión	6,884.60
Estación de descarga de hidrógeno	4,816.74
Emsamble completo montado horizontalmen-mente con seis recipientes	92,950
Stand de Aluminio	488.12

Tabla X. Evaluación de costo del equipo, opción 1.

### ***EVALUACION DE COSTO OPCION 2***

Cotización proporcionada por Industrias FASE, S.A. de C.V.

<b><i>DESCRIPCION</i></b>	<b><i>USD</i></b>
Tanque de almacenamiento	1,700

Tabla XI. Evaluación de costo del equipo, opción 2

## *CONCLUSIONES*

El deterioro a la naturaleza que ha originado el uso excesivo de combustibles fósiles en la "generación" de energía, ha tomado niveles alarmantes, y no solo esto, se ha entrado en un periodo caracterizado por la escasez de energía. Estos enormes problemas nos hacen pensar en otras formas de energía más limpias y que sean una fuente de energía. Esto promueve a emplear al hidrógeno como combustible, el cual promete tres ventajas:

1. Empleando al hidrógeno como combustible estamos lejos de depender de los combustibles fósiles.
2. El entubamiento del hidrógeno es más económico que la transmisión de energía, además de que el hidrógeno se puede almacenar.
3. El hidrógeno se quema limpiamente, lo que permitiría ser bienvenido por la sociedad y esto se debe a que el producto de combustión es agua, además de ser completamente reciclable.

El hidrógeno puede ser utilizado en máquinas de combustión interna, puede emplearse en aeronaves supersónicas, puede quemarse para producir energía eléctrica, como se hace en las turbinas-generadores.

Pero no todo es tan sencillo como se describió anteriormente, por ejemplo, en la generación de electricidad a partir de la combustión química del hidrógeno, se necesita almacenar al hidrógeno como un gas comprimido, pero su almacenamiento es complicado debido a las elevadas presiones requeridas para su confinamiento y a las propiedades del mismo hidrógeno.

La construcción del recipiente donde se confinará el hidrógeno requiere de una construcción especial llamado forjado, requiere de una gran cantidad de energía en forma de calor y de presión para su conformación, además, el material empleado para su construcción es especial, se requiere durante la construcción del recipiente el ensayo de pruebas no destructivas para detectar las fallas o grietas peligrosas, a medida que aumenta el tamaño del recipiente forjado, los tamaños de los lingotes y equipos se hacen mayores, por lo que el costo para el almacenamiento del hidrógeno se eleva.

Se puede observar que se requiere de una gran cantidad de energía para poder almacenar al hidrógeno, esto es una fuerte limitante que se traduce en un elevado costo como se dijo anteriormente. La evaluación del costo para la opción 1, nos muestra, que no es práctico realizarlo, considerando que su costo es muy elevado.

La evaluación de costo de la opción 2 nos muestra que la construcción de un recipiente de este tipo es elevada, ahora si tomamos en cuenta que lo que se pretende es que cada familia cuente con un recipiente de este tipo para almacenar el hidrógeno y hacer uso del mismo para satisfacer sus necesidades básicas de energía (cocimiento de alimentos, aseo personal, alumbrado, etc.) y si se cuenta con un total de 100 familias, el resultado de este estudio muestra lo impráctico que resulta esta opción.

Comparando los dos casos de estudio se puede llegar a la conclusión que la opción 1 es más posible, ya que algunos estudios realizados por Gregori en la reunión de la Sociedad de Ingenieros del Petróleo en San Antonio Texas, han revelado que el costo de transportación y distribución del hidrógeno por tuberías puede ser menor que el costo y transmisión de la energía eléctrica. Se presume que las tuberías existentes de gas natural y sistemas de distribución pueden ser adaptados para el uso de hidrógeno. Aunque el hidrógeno tiene un valor de calentamiento de solo  $10 \times 10^6 \text{ J/m}^3$  ( $275 \text{ BTU/ft}^3$ ) comparado con  $34 \times 10^6 \text{ J/m}^3$  ( $913 \text{ BTU/ft}^3$ ) del metano, la baja densidad y viscosidad del hidrógeno hace posible su abastecimiento por tuberías, pero el costo de compresión del hidrógeno será elevado.

Desgraciadamente esta idea de cambiar al hidrógeno como combustible tardará de 20 a 50 años antes de que la economía cambie hacia esta alternativa, él porque de esto, radica en que este sistema de distribución de energía no está lo suficientemente desarrollado, además que las sociedades se han adaptado a la energía obtenida de los combustibles fósiles (tales como petróleo, carbón y gas natural), de hecho, el crecimiento y el desarrollo urbano basado en estos combustibles sigue prevaleciendo en el mundo

Pero no debemos desalentarnos y debemos trabajar con más entusiasmo buscando una forma más eficaz y menos costosa en la utilización de dicha alternativa ya que nos estaremos preparando para un futuro en el cual la crisis energética promete ser desastrosa.

Octubre 23, 1997

ING. JORGE ESPINOZA CANO  
SUBDIRECTOR COMERCIAL

P R E S E N T E

**ASUNTO: SOLICITUD DE PRESUPUESTO PARA ESTACIONES  
DE HIDROGENO Y PLATAFORMA DE 6 TUBOS**

De acuerdo a su solicitud del día de ayer, a continuación encontrará la información solicitada:

PRESSURE REDUCTION STATION P/N 274-2115	PZA	2	6,884.60
ALUMINUM STAND P/N 274-412130	PZA	2	488.12
HYDROGEN DISCHARGE STATION P/N 274-411486	PZA	2	4,816.74
ONE COMPLETE 6 VESSEL ASME ASSEMBLY MOUNTED HORIZONTALLY IN 1-BEARNS 3 WIDE X 2 HIGH	PZA	1	92,950.00

Estos costos son LAB en planta del fabricante, por lo que se deberán agregar los gastos de importación que se estiman del 14% del valor del equipo.

Sin más por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda y/o comentario.

A T E N T A M E N T E

  
ING. ROGELIO SIERRA M.  
GERENTE GENERAL DE INSTALACIONES

CCP.- ING. ENRIQUE HERNANDEZ M.

ING. LUIS MORALES M.

FILE



# INDUSTRIAS FASE, S.A. DE C.V.

AV. R-1 NO. 72 SAN. FCO. XALOSTOC, EDO. DE MEX.

TEL/FAX: 6 69 51 33; 7 88 91 67; 7 88 92 82.

FECHA : 2-Feb-99

## COTIZACION

SEÑOR: Ing. Miguel A. Cornelio H.

COMPANIA: Industrias Fase, S.A. de C.V.

RECIBIÓ: 

PARA: Ing. Andres Aquino Canchoa

COMPANIA: UNAM (Ciencias Quimicas)

CIUDAD: Mexico, D.F.

No FAX: 773 0026

NUESTRA REF. P-010/99

DESCRIPCION: Por medio de la presente nos permitimos presentar a su consideración, nuestra propuesta para la fabricación de un tanque para almacenamiento de nitrógeno de 300 lts. de capacidad en acero inoxidable SA-240-316 de acuerdo a la información que nos proporciona

TIEMPO DE ENTREGA: 4 Semanas con días a partir de recibir su orden y anticipo correspondiente

PRECIO DE VENTA: 3 1700 00 (UN MIL SETECIENTOS DOLARES AMERICANOS 00:100 U S D)

IMPUESTO: A los precios se les cargará el IVA vigente al momento de facturar.

CONDICIONES DE PAGO: 50 00 % de anticipo con su pedido.

50 00 % Contra entrega

VALIDEZ DE LA OFERTA: 30 días calendario a partir de esta fecha

NOTAS GENERALES: La entrega de los bienes será en nuestra planta de Xalostoc, Edo. Mex

Cop. Ing. Francisco Vieyra C.

Fie

SI NO SE RECIBEN TODAS LAS PAGINAS INDICADAS, O SI HAY ALGUN PROBLEMA EN LA TRANSMISION DEL FAX,  
FAVOR DE LLAMAR A LOS TELEFONOS 6 69 51 33 7 88 92 82

## ***BIBLIOGRAFIA.***

- 1.- A.S.M.E., **Boiler and Pressure Vessel Code. SEC VIII, DIV. 1, U.S.A., 1989.**
- 2.- Chuse R., **Pressure Vessel, the A.S.M.E code simplified.** 5a de., McGraw-Hill, U.S.A.
- 3.- Brownell L. E y Young R. H., **Process equipment Design.** John Wiley Sons, Nueva York, 1967.
- 4.- Doyle E Lawrence., **Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros.** Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., 3a ed., México, 1988.
- 5.- J. F. Harvey., **Theory and Design of Modern Pressure Vessel.** 2a ed., Van Nostrand Reinhold Co., Nueva York, 1974.
- 6.- Magyesi Eugene F., **Manual de Recipientes a Presión.** Limusa, México, 1a Reimpresión, 1992.
- 7.- Moore d Harry y Kibbey R. Donald., **Materiales y Procesos de Fabricación.** Limusa S.A. de C.V., México, 1996.
- 8.- Perry R. H. y Chilton C.H., **Biblioteca del Ingeniero Químico.** 5a de., McGraw-Hill. México, 1986.
- 9.- **Handbook of Compressed Gases.** 3a ed., Van Nostrand Reinhold Co., Nueva York, 1981.
- 10.- Keyser A. Carl., **Ciencia de Materiales para Ingeniería,** 3a de., Limusa S.A., México, 1982.
- 11.- C.G. Interrante, G. A. Nelson, C. M. Hudgins, **Interpretive Report on Effect of Hydrogen in Pressure-Vessel Steels.** Welding Research Council Bulletin 145, October, 1969.
- 12.- W. Beck and others, **Hydrogen Stress Cracking of High Strength Steels,** Scientific Technical Aerospace Reports, vol.10, No. 20, October 23, 1972.
- 13.- J. W. Coombs, R.E. Allen and F. H. Vitovec, **Creep and Rupture Behavior of Low Alloy Steels in High Pressure Hydrogen Embrittlement,** ASME Publication Paper No. 64-Met-5, 1964.
- 14.- J. B. Greer and others, **Effect of temperature ans State of Stress on Hydrogen Embrittlement of High Strength Steel,** Corrosion, vol. 28, No. 10, October, 1972.

- 15.- Coopeer M., Cecil, **Hydrogen Attack**. Hydrocarbon Processing, p. 69, August 1972.
- 16.- Blakey Philip., **Cryogenic Gases, In-plant Gas Handling**. Chemical Engineering, p.113, October 5, 1981.
- 17.- J. Heinze A., **Pressure Vessel Desing for Process Engineers**, Hydrocarbon Processing, p. 183, May, 1979.
18. A.P.I. Standard 2000, **Venting atmospheric and low-presure storage tanks**, fifth edition, April 1998.
19. A.P.I. Standard 650, **Welded Steel Tanks For Oil Storage**, Tenth Edition, November 1998.
20. A.P.I. Standard 620, **Desing and Construction of Large Welded Low-pressure Storage tanks**, Ninth Edition, November 1998.
21. A.P.I. Standard 2510, **Desing and Construction of LPG Installations**, Seventh Edition, May 1995
22. NFPA 58, **Liquefied Petroleum Gas Code**, (National Fire Codes), vol. 2, Edition 1998
23. NFPA 59, **Standard for the Storage and Handling of liquefied Petroleum Gases At Utility Gas Plants** , (National Fire Codes), vol. 2, Edition 1998
24. NFPA 50A, **Standard for Gases Hydrogen Systems at Consumer Sities**, (National Fire Codes), vol. 2, Edition 1999.
25. NFPA 50B, **Standard for Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sities**, (National Fire Codes), vol. 2, Edition 1999.
26. ASTM E 527-83, **Standard Practice for Numbering Metals and Alloys (UNS)**, edition: 1981, pag. 763.

## DEFINICIONES

### *Ferrita:*

El hierro puro, al calentarse, experimenta dos cambios de la estructura cristalina antes de fundir. A temperatura ambiente la forma estable se llama ferrita o hierro y tiene la estructura cúbica centrada en el espacio. El hierro por debajo de  $768^{\circ}\text{C}$  es la única forma magnética pudiendo contener algunas centésimas por ciento de carbono; como componente de textura, este hierro, prácticamente puro, es la *ferrita*, blanda y maleable.

### *Austenita:*

El hierro de estructura cúbica centrada en las caras permite incorporar, como cristal mixto de interposición, hasta 1.7% de carbono, dependiendo de la temperatura; como componente textural se le denomina *austenita*. La *austenita* es no magnética además las transformaciones de fases de la austenita son muy importantes en el tratamiento térmico de los aceros.

### *Bainita:*

En la transformación de la austenita se forma además de la perlita, un constituyente denominado *bainita*. La microestructura *bainítica* consta de las fases ferrita y cementita y en su formación intervienen procesos de difusión. La *bainita* forma agujas o placas, dependiendo de la temperatura de transformación; los detalles microestructurales de la *bainita* son tan finos que su resolución solo es posible mediante el microscopio electrónico.

### *Cementita:*

La mezcla de hierro con carbono forma el compuesto llamado *carburo de hierro o cementita*. La cementita pura contiene 6.67% en peso de carbono, por lo que una aleación de ambos componentes nunca contendrá mayor proporción de este elemento. La *cementita* forma pequeñas agujas claras, es dura y frágil. El acero con alta proporción de cementita es, por lo tanto, difícil de forjar y de laminar.

### *Perlita:*

Acero con alta proporción de cementita es, por lo tanto, difícil de forjar y de laminar. Un acero no aleado es una mezcla de ferrita y cementita. Sin embargo, el acero forjado o recocido, con una proporción de carbono menor de 0.83%, no contiene cementita pura alguna, sino que en él se forma una mezcla eutectoide de cristalitas de ferrita y cementita de textura laminar o granulada y brillo de madreperla, por cuya razón este componente se denomina *perlita*.

### ***Aceros Inoxidables:***

Los aceros inoxidables resisten la corrosión (herrumbre) en muchos ambientes especialmente a la atmósfera. El cromo es el principal elemento de aleación en una concentración mínima del 11%. La resistencia a la corrosión mejora con la adición de níquel y molibdeno. Los aceros inoxidables se clasifican en función de la microestructura constituyente: ***Martensítica, ferrita o austenita.***

### ***Aceros inoxidables ferríticos***

Estos aceros ferríticos contienen como constituyente fundamental de aleación el cromo. Con altos porcentajes de este metal son frágiles, sensibles al choque y difíciles de trabajar con arranque de viruta; además son magnéticos. La resistencia a la oxidación se hace mayor agregando molibdeno, con lo que se mejora también al mismo tiempo la resistencia mecánica en caliente.

### ***Aceros inoxidables martensíticos***

Los aceros inoxidables martensíticos se diferencian, de los ferríticos, por una mayor proporción de carbono. Tienen la propiedad de ser endurecibles (templables). Con un enfriamiento suficientemente rápido desde la temperatura de temple se consigue el endurecimiento del acero y con ello aumento de la resistencia a la tracción. A los aceros austeníticos se acude, por lo tanto, frecuentemente cuando se necesitan materiales de alta resistencia a la abrasión y determinadas propiedades mecánicas.

### ***Aceros inoxidables austeníticos***

Los aceros inoxidables austeníticos se producen y usan en el tonelaje más grande. Aunque todos contienen níquel, en forma ocasional se usa el manganeso y el nitrógeno como sustitutos del níquel. Estos aceros contienen como todos los aceros inoxidables cromo, el cual es necesario para la resistencia a la corrosión. Sus ventajas son la buena resistencia en caliente de la aleación obtenida, una mayor estabilización, comparada con los aceros ferríticos, en la conformación en frío, y a una temperatura de recristalización.

## ***Deformación***

Una cualidad de valor práctico de los materiales metálicos es su capacidad de deformación en estado sólido mediante trabajos mecánicos como martilleo, forja, prensa, estirado, laminado o doblado, sin que por ello se rompan o desgarren. Los metales tienen, por lo tanto, la facultad de la ***plasticidad***. Cuando un material experimenta una sollicitación mecánica, su forma varía. La deformación es ***elástica***, si al concluir aquella el material recupera la forma primitiva y ***plástica***, si esta perdura. Una transformación plástica va precedida siempre de otra elástica.

## ***Dureza ( $R_c$ Dureza Máxima Rockwell)***

Propiedad mecánica, la cual es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada.

## ***Resistencia***

La resistencia de un cuerpo es la máxima oposición que puede presentarse a su destrucción.

## ***Ductilidad***

Es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil.

## ***Resilencia***

La ***resilencia*** es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar.

## ***Tenacidad***

La ***tenacidad*** de un material, es una medida de la capacidad de un material para absorber energía antes de la fractura.

## ***Fractura***

La ***fractura*** simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión aplicada estática (es decir, constante o que cambia lentamente con el tiempo) y a temperatura que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del metal.

## ***Tensiones***

Las ***tensiones*** existentes en una pieza sollicitada mecánicamente son las fuerzas que en cualquier sección de la pieza están en equilibrio con la fuerza que opera desde el exterior.

Según el tipo de estas fuerzas tenemos, por ejemplo, *tensiones por tracción*, *tensiones por compresión* y *tensiones por cizalladura*, que se expresan en kilogramos por unidad de superficie ( $\text{Kg/cm}^2$ ). La *tensión de tracción* que se aplica perpendicularmente a un plano imaginario a través de la pieza es una tensión normal; si se aplica en la dirección del mismo, se trata de una *tensión tangencial o transversal*. La que ocasiona la destrucción del material es la *tensión de rotura*.

### ***Esfuerzo Máximo Permisible (S)***

Es el máximo esfuerzo unitario permitido para cualquier material específico que pueda ser usado en las fórmulas para determinar el espesor del recipiente.

### ***Tolerancia por Corrosión (C)***

Dependiendo del uso del recipiente dentro del proceso será el tipo de corrosión a que este expuesto, y por lo tanto, la reducción o adelgazamiento que sufra el material de construcción. La tolerancia consiste en adicionar, tanto al cuerpo como a las tapas del recipiente, una pequeña fracción de tal forma que el espesor final es mayor al necesario, calculado a partir de las condiciones iniciales.

### ***Temperatura de Diseño***

Se calcula a la temperatura de operación. Es una práctica usual en el intervalo de 32 a 750°F aumentar 25°F a la temperatura máxima de operación para calcular la temperatura de diseño. Queda excluido el caso de trabajos criogénicos, en cuyo diseño en lugar de sumar se resta los 25°F. Arriba de lo 750°F no se acostumbra agregar un factor.

### ***Presión de Diseño ( $P_D$ )***

Es la presión que se obtiene una temperatura especificada a las condiciones de operación más severas. Es la presión utilizada para calcular el espesor mínimo permisible o las características físicas de las diversas partes de un recipiente. Debido al escalamiento de los espesores de placas existentes comercialmente, un recipiente puede tener un espesor de pared un poco mayor del necesario para soportar la presión de diseño

### ***Eficiencia de Soldadura (E)***

Es la expresada por una parte decimal y se utiliza en el diseño de juntas como un factor por el que hay que multiplicar el valor del esfuerzo máximo permisible, para calcular el espesor permisible apropiado.

### ***Espesor de Diseño (t)***

Es la suma del espesor de pared requerido más el necesario para corrosión.

### ***Espesor Nominal***

Es el espesor seleccionado entre los comercialmente disponibles.