



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Capacitación para técnicos aspirantes a operadores de una refinería de petróleo 2021

**MODULO 9 – RECIPIENTES
A PRESIÓN – TANQUES DE
ALMACENAMIENTO**



INDICE

1. Introducción	4
2. Código ASME	5
2.1 Organización del Código ASME.....	6
2.2 Características del Código ASME.....	7
3. Otros códigos internacionales para el diseño y la fabricación de recipientes sometidos a presión	10
3.1 Código CECT.....	10
3.2 Código AD-Merkblatter	10
3.3 Comparación entre los códigos.....	10
4 Materiales usados en recipientes.....	11
5 Diseño	11
5.1 Diseño de Recipientes Sometidos a Presión Interna	12
5.2 Diseño de Recipientes Sometidos a Presión Externa	13
5.3 Diseño de Recipientes Cilíndricos y Esféricos.....	13
6 Evaluación económica.....	13
7 Recipientes sometidos a presión interna	14
7.1 Cabezales	14
7.2 Esfuerzos soportados por un recipiente sometido a presión interna.....	15
7.2.1 Tensión circunferencial (σ_{θ})	15
7.2.2 Tensión longitudinal (σ_l)	16
7.3 Procedimiento de cálculo de Recipientes Sometidos a Presión Interna según el Código ASME.....	16
7.3.1 Tensión admisible del material (S):.....	17
7.3.2 Factor de eficiencia de la junta (E):	18
7.3.3 Cálculo del espesor de la envolvente	18
7.3.4 Cálculo del espesor de los cabezales.....	19
8 RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN EXTERNA	21
8.1 Procedimiento de cálculo de Recipientes Sometidos a Presión externa según el Código ASME.....	23
8.1.1 Calculo del espesor de la envolvente.	24
8.1.2 Calculo del espesor de cabezales	28
9 Anillos de refuerzo	30
9.1 Calculo de anillos de refuerzo:	30
9.2 Aberturas de los anillos de refuerzo:	31
9.3 Unión de los anillos de refuerzo y la envolvente: Norma UG-30.	32
10 Fabricación de Recipientes Sometidos a Presión	32
10.1 Proceso de fabricación	33



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

11	<i>Cálculo de recipientes por el método de los elementos finitos:</i>	46
11.1	<i>Casos en que es conveniente realizar un análisis por este método:</i>	47
11.2	<i>Pasos a seguir en la aplicación del método:</i>	47
11.3	<i>Conclusiones:</i>	47



1. Introducción

Se llama recipiente a un depósito cerrado de longitud limitada que contiene o puede contener una sustancia, en nuestro caso fluidos sometidos a presión. No serán sometidos a la acción del fuego, aunque sí podrán utilizarse a altas temperaturas.

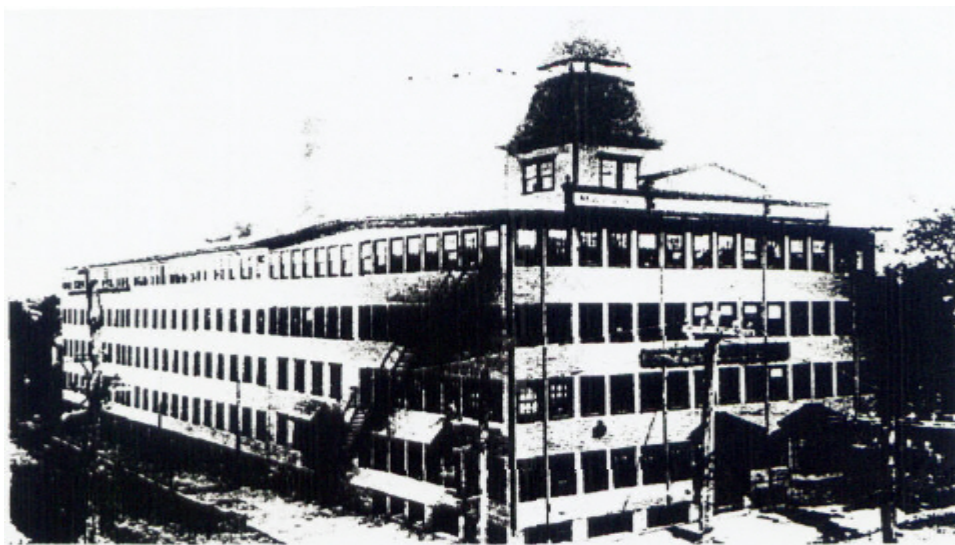
El tema de recipientes incluye tanto cilindros o tanques como tuberías, válvulas, calderas, etc.. Normalmente son de acero, pero se está utilizando otros materiales como el aluminio, la fibra de vidrio, etc.

Estos equipos se clasifican en dos grupos:

- Recipientes sometidos a presión interna (**RSPI**).
- Recipientes sometidos a presión externa (**RSPE**).

Un ejemplo puede ser: - una caldera o una garrafa de gas (RSPI).
- un submarino (RSPE).

En marzo de 1905 ocurrió una explosión de una caldera en una fábrica de zapatos en Massachussets, matando 58 personas e hiriendo otras 117 y provocando una pérdida de un cuarto de millón de dolares. Este desastre hizo a la gente ver la necesidad de poner regulaciones en la construcción de calderas para aumentar la seguridad. Después de dos años, el estado dictó el primer código legal para la construcción de calderas. Así otros estados empezaron a darse cuenta de la necesidad de ésta regulación y comenzaron a realizar regulaciones similares. Por la diferencia en las regulaciones en los diferentes estados las productoras de recipientes pidieron que se uniformaran las reglas y así el Congreso apuntó un comité que en 1913 hicieron las primeras copias borradores; y en 1915 se imprimió la primer copia del código ASME.



vista parcial de la fabrica antes de la explosión



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión



vista parcial de la fabrica después de la explosión

En buenas industrias no se aceptan recipientes que no estén calculados bajo normas. Las más conocidas son las del **código ASME** (American Society of Mechanical Engineers). Otros códigos muy utilizados, especialmente en Europa, son: el código **CECT** (Comité Europeo de Constructores de Tuberías) o el código **AD-Merkblatter** (Alemania). Los códigos europeos son más ahorrativos porque los espesores tienden a ser menores.

2. Código ASME

Es el código más importante y popular, ya que es hermano de las Normas ASTM. Es muy completo pero tiene el inconveniente de ser muy conservador y muy difícil de seguir ya que los artículos no cierran en si mismo, esto es que tienen muchas derivaciones.

Este código es un conjunto de normas, agrupadas en once secciones, que trata todo tipo de recipientes, uniones, soldaduras, materiales, condiciones de diseño, test, tratamientos térmicos, y todo lo necesario para lograr el mejor recipiente al menor costo. Es muy importante solo utilizar las formulas mandadas por el código y no otras de libros de texto, por ejemplo.

También especifica el proceso de fabricación, el cual incluye: cortado de la chapa, biselado, prensado, rolado, soldado, ensamblado, aliviado de tensiones, ensayos de presión, pintado, transporte, montaje y finalmente la puesta en operación. Es un proceso muy largo y que depende de muchos factores. Muchas veces surge el problema de llevar trabajo a la obra por diferentes razones, como puede ser la imposibilidad de transporte, por lo que se encarecen los costos.

En Estados Unidos y Canadá, se han promulgado legislaciones que convierten al código ASME o algunas de sus partes en requisitos legales. Se emplean inspectores para aplicar las disposiciones del código.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

El logotipo de ASME es un trébol que sólo puede ser colocado en recipientes fabricados por grandes empresas autorizadas por ASME.



El aumento en el tamaño del código se debe al progreso sufrido en la industria, como por ejemplo el surgimiento de nuevos materiales. Para seguir éste progreso se realizan revisiones constantes del código. Anualmente aparecen ediciones de las modificaciones hechas hasta ese año, denominadas “adendas”, éstas vienen en otro color para distinguirlas y forman las modificaciones para la próxima edición. Debe intentarse trabajar con la última edición del código, ya que éste se renueva cada tres años.

Código	Material / Tipo	Tensión de Fluencia (Kg / mm²)	Tensión de Rotura (Kg / mm²)
ASTM	A 516 Gr. 70	26,6	49,0
ASTM	A 537 Cl. 1	35,0	49,0
DIN 17102	TstE 355	35,5	49,0
USIMINAS	USI-SAR 50 A	33,0	50,0
USIMINAS	USI-SAR 80 T	70,0	80,0

En la práctica nos encontramos con dos niveles de exigencia solicitados por los clientes: el cliente puede exigir sólo que la fabricación sea bajo el código ASME, o que la empresa tenga la certificación de ASME. Para esto último, una comisión calificadora viene a la empresa y la certifica. La renovación de esta certificación es cada tres años y prácticamente no existen beneficios por haber tenido la certificación con anterioridad.

Poseer esta certificación tiene muchas exigencias en cuanto a equipos, espacios de trabajo, tolerancias, y hasta reclama entrenamiento de los obreros (por ejemplo los soldadores).

2.1 Organización del Código ASME

El código se divide en varias secciones que abordan distintos temas. Cada sección del código tiene divisiones, y cada división tiene subdivisiones.

Las secciones del código son:

- I. Calderas de potencia.
- II. Especificaciones de materiales.
- III. Componentes de plantas de energía nuclear.
- IV. Calderas de calefacción.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

- V. Ensayos no destructivos.
- VI. Reglas recomendadas para el cuidado y funcionamiento de calderas de calefacción.
- VII. Reglas recomendadas para el cuidado de calderas de potencia.
- VIII. Recipientes a presión.
- IX. Condiciones de soldadura.
- X. Recipientes a presión de plástico reforzado con fibra de vidrio.
- XI. Reglas para la inspección de componentes en plantas nucleoelectricas.

Existe una división en **Códigos de Fabricación** (secciones I, III, IV, VI, VII, VIII y X) y **Códigos de Referencia** (secciones II, V y IX). Éstos últimos son nombrados en los Códigos de Fabricación.

En general ASME primero da una serie de reglas y luego hace excepciones que pueden modificar en gran medida lo dicho anteriormente. Por esta razón se aconseja leer toda la sección y no abandonar la lectura una vez encontrado lo que buscábamos, ya que pueden existir excepciones importantes.

2.2 Características del Código ASME

Para nuestro caso interesa la **sección VIII** referidas a recipientes sometidos a presión, cuenta con tres divisiones: *División 1*, *División 2* y *División 3*

Sección VIII - División 1

Es para recipientes de caldera, no sometidos a la acción del fuego. Esta es la más utilizada.

Está constituida por subsecciones: A, B y C

Introducción:

Contiene los alcances de la división y define las responsabilidades de los usuarios, el fabricante y el inspector.

Establece el rango de presiones para esta división: esta debe encontrarse entre 15 lb/in² y 3000 lb/in².

Características de la certificación de recipientes que cumplan con esta división (sello "U").

Subsección A:

PARTE UG: Contiene los requisitos aplicables a todos los materiales y métodos de construcción. También define la temperatura y presión de diseño. Establece las especificaciones de las cargas consideradas en el diseño (tabulación de esfuerzos máximos admisibles). Definición de factores de seguridad según el esfuerzo. Consideración de las reparaciones de los defectos durante la fabricación. Detalles para los requisitos de pruebas e inspección (prueba hidráulica). Definición de los requisitos de los dispositivos de alivio de presión.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Subsección B:

Contiene reglas concernientes a los métodos de fabricación de los recipientes a presión.

PARTE UW: Aplicable a recipientes soldados. Se definen las restricciones del servicio. El servicio letal es para “sustancias letales”, definidas como gases o líquidos venenosos, de naturaleza tal que una pequeña cantidad de gas o vapor del líquido, es peligroso para la vida cuando se inhala. Se especifica que es responsabilidad del usuario advertir al diseñador o fabricante del uso de sustancias letales; todos los recipientes para servicio letal tendrán juntas soldadas a tope completamente radiografiadas. Se tendrá en cuenta las reglas de soldadura, registro histórico del fabricante sobre los procesos de soldadura, calificación de los soldadores, reparación de defectos de soldadura, etc.

PARTE UF: Aplicable a aquellos recipientes fabricados con materiales forjados. Incluye los requisitos únicos de diseño, particularmente en lo referente a aumento de esfuerzos, fabricación, tratamientos térmicos, reparación de defectos e inspección.

PARTE UB: Recipientes fabricados por soldado con latón. Los recipientes soldados con latón no pueden ser utilizados para el servicio de fluidos letales, ni para generadores de vapor. Los procesos de soldadura permitidos, al igual que las pruebas para esfuerzos de las juntas con latón son cubiertas en esta sección, que también incluye las reglas de fabricación e inspección.

Subsección C:

Esta subsección contiene requisitos concernientes a las clases de materiales. Cada una de estas partes incluye tablas de valores de esfuerzos máximos permisibles para todos los materiales del código en un intervalo de temperatura del metal. Estos valores de esfuerzos incluyen factores apropiados de seguridad. Las reglas que rigen la aplicación, fabricación y tratamientos térmicos de los recipientes se incluyen en cada parte.

PARTE UCS: Aceros al carbono y de baja aleación.

PARTE UNF: Materiales no ferrosos.

PARTE UHA: Aceros de alta aleación.

PARTE UHT: Aceros con propiedades de tensión mejoradas por tratamientos térmicos.

PARTE UCI: Recipientes de hierro colado.

PARTE UCL: Recipientes soldados de placas revestidas.

PARTE UCD: Recipientes de hierro dúctil.

PARTE ULW: Recipientes fabricados por construcción en varias capas.

PARTE ULT: Recipientes que poseen alta resistencia a baja temperatura

Sección VIII - División 2

Es para alternativas especiales y formas no usuales, por ejemplo ni cilíndricos ni esféricos, permite esfuerzos más elevados de diseño. Estos recipientes tendrán condiciones de trabajo severas, reclaman mayor cantidad de ensayos ya que permite fabricar recipientes de menor espesor para iguales presiones de trabajo.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

A su vez, en esta sección se hace referencia a otras secciones como son: sección II de materiales; sección V de ensayos no destructivos y sección IX de distintos tipos de soldadura debido a lo mencionado de Códigos de Referencia.

En relación con las reglas de la división 1, las reglas de la división 2 son más restrictivas en lo que se refiere al proceso de diseño, la selección de materiales que pueden ser utilizados, y a los ensayos no destructivos que deben ser realizados, aunque permiten valores más altos de intensidad de esfuerzos de diseño. También permiten llegar a diseñar recipientes con un factor de seguridad igual a 3, cuando según la división 1 deben emplearse factores de entre 4 y 5. El uso de esta división está limitado a recipientes fijos.

Lo anterior lleva a que para una misma presión, se puedan construir recipientes de menor espesor, y por lo tanto mas livianos y económicos. Sin embargo, los costos de diseño y de control que adicionan las reglas esta división suelen superar el ahorro en material.

La división 2 está dividida en las siguientes partes:

PARTE AG: Aquí se proporciona el alcance de la división y se establecen su jurisdicción y las responsabilidades del usuario y del fabricante. Es de particular importancia el hecho de no especificar un límite superior de presión y que, a cambio de eso, se requiere contar con las especificaciones del usuario. El usuario o su representante deben proporcionar los requisitos que debe cumplir el recipiente de acuerdo con las condiciones de operación a que será destinado, en una forma muy detallada que sirva como base a la adecuada selección de materiales y diseño, fabricación e inspección del recipiente. En las especificaciones del usuario debe incluirse el método de soporte del recipiente y cualquier requisito para el análisis de fatiga.

PARTE AM: En esta parte se listan los materiales de construcción permitidos, especificaciones aplicables, requisitos especiales, valores de intensidad de esfuerzo de diseño y cualquier otra información especial. Son de importancia especial los requisitos de prueba ultrasónica y de dureza.

PARTE AD: En esta parte se incluyen los requisitos para diseño de recipientes. Se basa en los diseños de la división 1, pero se basa en los valores de elasticidad o falla de la teoría del máximo corte. Se permiten esfuerzos mayores cuando se considera el efecto del viento y de los terremotos. Se establecen todas las reglas para determinar si es necesario un análisis de fatiga.

PARTE AF: Contiene los requisitos para la fabricación de recipientes y partes de recipientes.

PARTE AR: Contiene las reglas para los dispositivos de alivio de presión.

PARTE AI: Aquí se consideran los requisitos para la inspección de recipientes.

PARTE AT: Se refiere a los requisitos y procedimientos de pruebas.

PARTE AS: Comprende los requisitos para el sellado y certificación de recipientes y partes de recipientes.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Como conclusión la mayor parte de los recipientes a presión para ser utilizados en la industria química se diseñarán y construirán con base en las reglas de la sección VIII, división 1, mientras que las reglas de la sección VIII, división 2, se utilizará solo en casos donde a pesar del mayor costo, sea necesario fabricar recipientes mas delgados por razones de peso o espacio.

Sección VIII - División

Es para alternativas de recipientes sometidos a presiones superiores a las 10000 psi, por lo que es de muy difícil su aplicación en la industria normal y aparece sólo en casos especiales y equipos de laboratorio.

3. Otros códigos internacionales para el diseño y la fabricación de recipientes sometidos a presión

3.1 Código CECT

Es un código referido especialmente para tuberías, muy utilizado en Europa. Nos brinda recomendaciones para diseño, fabricación y montaje de tuberías de acero soldadas para instalaciones hidroeléctricas.

3.2 Código AD-Merkblatter

La razón por la que se utiliza mucho es porque esta asociado con las normas DIN. Es un código muy completo ya que sirve para construir recipientes de metales y no metales. También nos especifica ensayos, diseños y el proceso de fabricación.

3.3 Comparación entre los códigos

Existen muchos tipos diferentes de materiales. Las propiedades mecánicas de los más utilizados están en el siguiente cuadro:

El código ASME dice que la tensión admisible es 1/4 de la tensión de rotura o 2/3 de la tensión de fluencia, la que sea menor.

En el código CECT la tensión admisible esta dada por la tensión de fluencia dividida por 1,7; por lo que podemos ver que la tensión admisible es mucho más grande que en el código ASME, esto implica espesores de casi la mitad.

En el código AD-Merkblatter es lo mismo sólo que dividida por 1,5. Por lo que se permiten espesores menores que los del Código ASME (prácticamente la mitad).

Tabla de Tensiones Admisibles

Materiales	ASME (Sec. VIII – Div. 1)	ASME (Sec. VIII – Div. 2)	CECT	AD-Merkblatter
Tensión Adm. σ_{adm}	$\frac{1}{4} \sigma_r$	$\frac{2}{3} \sigma_f$	$\sigma_f / 1,7$	$\sigma_f / 1,5$
A 516 Gr. 70	12,25	17,73	15,65	17,73



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

A 537 Cl. 1	12,25	23,33	20,60	23,33
TstE 355	12,25	23,67	20,90	23,67
USI-SAR 50 A	12,50	22,00	19,40	22,00
USI-SAR 80 T	20,00	46,67	41,20	46,67

Según la tabla de tensiones vemos que para el Código ASME la que manda es la tensión de rotura ya que, junto con la tensión de fluencia, tienen valores muy parecidos y queda determinada que la tensión admisible proveniente de la de rotura es menor. Vemos que la tensión admitida por el Código ASME es prácticamente la mitad de la admitida por los otros códigos, determinando que los espesores sean prácticamente el doble que por los otros códigos constructivos.

Todo esto es debido a que las tolerancias del código ASME (con respecto a los defasajes de las soldaduras, desviaciones de la forma y defectos localizados) son mucho más permisivas que en los otros códigos. Se puede decir que las tolerancias del código ASME son excesivas y muy fáciles de lograr.

4 Materiales usados en recipientes.

El 95% se construyen en **acero** común (1010, 1020 o inoxidables). Pero cabe destacar que en nuestro país no se producen las chapas por lo que hay que importarlas de Europa, Japón o Brasil.

Actualmente se desarrollan recipientes en **plástico o fibra de vidrio**. La ventaja de éstos es que son más livianos y resistentes a la corrosión. La desventaja es que son costosos debido a que necesitan moldes que son muy caros; por ejemplo, un cabezal de acero puede fabricarse golpeándolo, pero uno de plástico exige un molde. Como consecuencia del costo, existe poca variedad de modelos.

Otro material muy importante es el **aluminio**. Éste es tres veces más liviano que el acero, pero tiene baja resistencia mecánica en estado puro. Este inconveniente se salva utilizando aleaciones de aluminio, conseguidas por medio del agregado de pequeñísimas cantidades de impurezas (Mn, Mg) que no alteran el peso específico, logrando una resistencia mecánica superior a la del acero.

El transporte de líquidos inflamables y de gas licuado debe hacerse en tanques de aluminio, ya que en los de acero se corre el riesgo de que aparezcan chispas debidas a corrientes estáticas.

El aluminio material tiene el inconveniente de ser caro por dos razones: una es que en Argentina la producción de aluminio es un monopolio (Aluar) y la otra es que necesita soldaduras especiales y por ende soldadores especializados. Sin embargo, el aluminio es el material del futuro para la construcción de recipientes.

5 Diseño

El diseño de un recipiente implica seleccionar un material adecuado a las condiciones de trabajo del recipiente, calcular el espesor de la chapa y conocida las



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

dimensiones del recipiente se decidirá por el tipo de unión que llevarán esas chapas y la forma del recipiente.

De manera resumida se deben seguir los siguientes pasos:

FACTORES PRIMORDIALES DE DISEÑO

Materiales

Forma

Espesor

Uniones

CONSTRUCCIÓN

Los datos iniciales con los que contamos para iniciar el caculo son los siguientes:

- Dimensiones del recipiente (como diámetro).
- Tipo de cabezal a usar.
- Condiciones de operación (presión de trabajo, si ésta es interna o externa, temperatura de trabajo, cargas a soportar, etc.).
- Código a emplear.

Si bien la resistencia a la tracción y a la compresión para un mismo material son las mismas, el efecto que produce la presión en uno y otro caso son distintos. En el caso de presión interna, la misma tiende a expandir o inflar al recipiente, llevándolo a una forma esférica o cilíndrica, y para el cálculo sólo se consideran las tensiones admisibles. Por el contrario, para el caso de presión externa, la misma tiende a llevar a las paredes hacia el centro, con lo cual una pequeña abolladura o excentricidad en el recipiente origina una concentración de tensiones que pueden llevarlo al colapso.

5.1 Diseño de Recipientes Sometidos a Presión Interna

Envolventes: El cálculo es sencillo, pues sólo se calcula el espesor, ya que la rotura se produce por tensión. Para éstos recipientes no es grave la excentricidad, pues la presión interna le dará la forma buscada al recipiente.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión



Menor espesor
(Los cabezales dan mayor
resistencia)

5.2 Diseño de Recipientes Sometidos a Presión Externa

En un recipiente sometido a presión externa un problema constructivo de excentricidad es muy peligroso, el código prevé evitar abolladuras que ocasionen el colapso.



Mayor Espesor
(Se pueden agregar anillos de refuerzo que acortan la long.
de diseño)

A mayor longitud de diseño es necesario mayor espesor, pero esto se puede evitar colocando anillos de refuerzos (solución de compromiso).

5.3 Diseño de Recipientes Cilíndricos y Esféricos

Para una misma presión, el recipiente esférico tiene la mitad de espesor que el cilíndrico.

La mayoría de los cabezales no son esféricos perfectos, pues hacerlos por golpe es muy difícil (por moldeo no, pero esto es muy caro), aunque se gana en resistencia.

Para tanques de camiones, la forma es cilíndrica porque la esférica sería imposible de transportar por el tamaño de los recipientes.

6 Evaluación económica

Tenemos equipos de alto y bajo valor agregado.

En los equipos de alto valor agregado (equipos de proceso) las ganancias son grandes por lo que tenemos márgenes holgados por la fabricación. Por esta razón podemos aumentar los espesores en un par de milímetros que no vamos a tener grandes diferencias.

En los de bajo valor agregado (tuberías por ejemplo) se trabajan grandes cantidades de toneladas o kilómetros de tendido por lo que hay que ajustar al máximo los cálculos de espesores, los materiales de fabricación, el transporte y el montaje de



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

manera que tengamos ganancias tentadoras. De igual forma tenemos un bajo margen de ganancia por lo que cualquier error puede llevarnos a tener pérdidas.

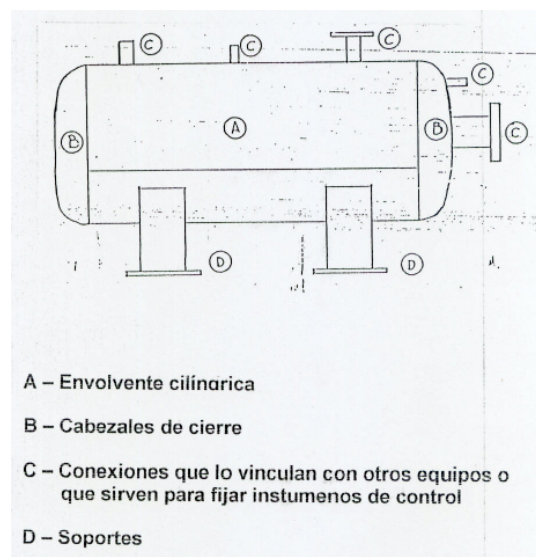
7 Recipientes sometidos a presión interna

La mayor parte de los recipientes se fabrican para soportar presiones internas. Sus aplicaciones se ven a diario, por ejemplo en tanques de gas, calderas, acoplados para transporte de combustibles, etc.

En lo que respecta a la forma de estos recipientes, la más adecuada sería la esférica, ya que los recipientes que adoptan esta forma son los que ofrecen el mayor volumen para un área superficial dada. Esto implica menores costos respecto de otras formas. Además tienen la ventaja de ser recipientes uniformemente solicitados o tensionados (en todas direcciones). Esto significa también que aceptan chapa de menor espesor por lo que ofrecen una utilización más económica del material.

Sin embargo tienen el inconveniente de su muy difícil realización, ya que exigen de mucha mano de obra y si el recipiente es muy grande es difícil lograr hacerlo perfectamente esférico. Por estas razones, su uso está limitado a contener gases y líquidos volátiles.

Para el resto de las aplicaciones, se prefiere la forma cilíndrica, ya que las chapas son mucho más fáciles de preformar, ovalar y el conjunto es más sencillo de soportar que el recipiente esférico. Las partes fundamentales de estos recipientes son las siguientes:



Todos estos elementos se encuentran unidos mediante soldaduras o remaches (menos usado) .

7.1 Cabezales

Los cabezales de los recipientes pueden ser:



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

- ◆ Semiesféricos
- ◆ Semiélticos (medio elipsoide de revolución)
- ◆ Toriesféricos (sector tórico y casquete esférico)
- ◆ Toricónicos (sector cónico y tórico)
- ◆ Cónicos (cono recto u oblicuo)
- ◆ Planos

En la unión del cabezal soldado y su envolvente se produce una discontinuidad, que origina una concentración de tensiones. Por tanto, es necesario suavizar este cambio brusco de forma.

El cabezal esférico es el más conveniente en este sentido, siguiéndole el semiéltico. Presenta el inconveniente del alto costo de fabricación.

El cono es el elemento menos adecuado para efectuar un cierre, pero es el más utilizado como elemento de transición entre dos diámetros de envolventes cilíndricas, o como cabezal inferior en algunos recipientes verticales.

Es por lo anterior que los cabezales más usados son el semiéltico y el toriesférico.

7.2 Esfuerzos soportados por un recipiente sometido a presión interna

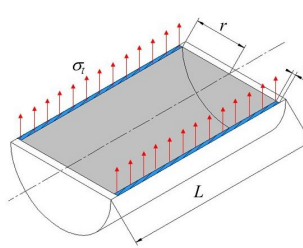
Si el espesor del recipiente es relativamente fino ($e \leq 0,5 r$ para recipientes cilíndricos o $e \leq 0,356 r$ para recipientes esféricos), la tensión circunferencial (σ_t) y la tensión longitudinal (σ_l) son prácticamente uniformes a través del espesor de la pared y son las únicas tensiones presentes, siendo la tensión radial (σ_r) despreciable.

De acuerdo a esto:

7.2.1 Tensión circunferencial (σ_t)

Esfuerzos en cilindros-Pared delgada

Esfuerzo Tangencial



$$F = pA_p \quad A_p = 2rL$$

$$F = \sigma_t A \quad A = 2tL$$

Hacemos equilibrio

$$\sigma_t 2tL = p2rL$$

$$\sigma_t = \frac{pr}{t}$$

$$\sigma_{t,max} = \frac{p \left(r + \frac{t}{2} \right)}{t}$$

Siendo

p = presión interna

$P = p * d * l$ fuerza que tiende a la rotura circunferencial

$a = 2 * e * l$ área que resiste el esfuerzo

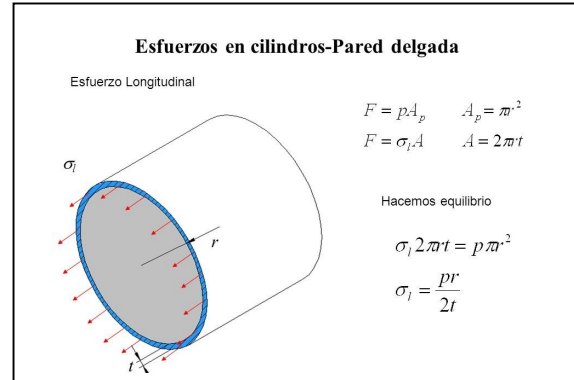


Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

$$\sigma = \frac{P}{a} = \frac{p \cdot d \cdot l}{2 \cdot e \cdot l} = \frac{p \cdot d}{2 \cdot a}$$

$$e = \frac{p \cdot d}{2 \cdot \sigma}$$

7.2.2 Tensión longitudinal (σ_l)



Siendo

p = presión interna

$$P = \frac{p \cdot \pi \cdot d^2}{4} \quad \text{fuerza que tiende a la rotura longitudinal}$$

$a = e \cdot \pi \cdot d$ área que resiste el esfuerzo

$$\sigma = \frac{P}{a} = \frac{p \cdot d}{4 \cdot e}$$

$$e = \frac{p \cdot d}{4 \cdot \sigma}$$

Como se ve, el esfuerzo nominal en la sección longitudinal es el doble que el que soporta la sección transversal, por lo que es el que debe ser considerado para el cálculo, teniendo en cuenta que el factor de seguridad que suele aplicarse oscila entre 4 y 5.

7.3 Procedimiento de cálculo de Recipientes Sometidos a Presión Interna según el Código ASME

Los datos iniciales con los que contamos para iniciar el cálculo son los siguientes:

- Dimensiones del recipiente (como diámetro).
- Tipo de cabezal a usar.
- Condiciones de operación. Estos datos son proporcionados por la empresa que utilizará el equipo y el calculista tendrá que basarse en ellos para realizar el cálculo. Según el código, los apartados que especifican estas son:

UG 20: Temperatura de diseño. La temperatura máxima usada en el diseño, no debe ser menos que la temperatura máxima presumida en el punto medio de la pared del espesor del recipiente durante las condiciones de operación de la parte del recipiente considerada. En ningún caso son permitidas las temperaturas de diseño



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

que excedan las máximas temperaturas fijadas para cada material en las tablas de tensión admisible de los materiales (subsección C).

UG 21: Presión de diseño. Los recipientes considerados por la sección VIII del código se diseñarán con las más exigentes condiciones de Presión y Temperatura que puedan esperarse en una operación normal. En tales condiciones se considerará la máxima diferencia de presión entre el interior y el exterior del recipiente durante la vida operativa del mismo. Esta diferencia de presión puede coincidir o no con la presión de trabajo, y si llegara a variar, siempre se toma el mayor valor.

UG 22: Cargas. Se tiene en cuenta para obras estructurales y las cargas a considerar en el diseño que incluyen:

- Presión de diseño.
- Cargas de impacto.
- Peso del recipiente y accesorios con su contenido normal.
- Otras cargas como: tuberías, equipos montados, etc.
- Vientos y sismo.
- Efectos de gradientes de temperatura.

UG-23: Máximos valores de tensión admisible. Las máximas tensiones admisibles dependerán del material y la temperatura de servicio encontrándose los valores permitidos de las mismas en la subsección C del código.

UG-25: Corrosión. Los recipientes o parte de los mismos sujetos a corrosión, erosión o abrasión mecánica serán fabricados para la vida útil del mismo mediante un adecuado incremento del espesor del recipiente, o mediante el uso de protecciones anti corrosión.

Agujeros alchahuetes: Se utilizan para proveer una indicación de cuando el espesor del recipiente se ha reducido a un grado peligroso. No se usaran en recipientes que contengan sustancias letales, tendrá un diámetro de 1,6 a 4,8 mm y una profundidad no mayor del 80% del espesor del material. Se colocaran en la cara opuesta del recipiente a donde el deterioro es esperado.

Una vez establecidas las variables, deben calcularse los siguientes parámetros

7.3.1 Tensión admisible del material (S):

Es función de la temperatura, tipo de acero y tensión de fluencia. Están establecidas por el código en su sección II parte D, en las tablas UCI-23, UCD-23 y ULT-23.

Estas tensiones, corresponden a la tensión de rotura del material que se realizaron con ensayos de tracción normalizados.

Entrando con el material, vemos el grado, la composición, grupo y tensiones de fluencia y rotura. Más a la derecha figuran las S (tensiones de diseño) en función de



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

la temperatura de diseño para el equipo. Obsérvese que hay temperaturas para las que no está indicada la tensión (línea de puntos): esto significa que el material no está recomendado para trabajar a partir de esa temperatura. Esto garantiza encontrarse dentro de la zona elástica del diagrama tensión – deformación. Los ensayos deben ser garantizados por la fábrica para esa partida determinada, de lo contrario, para recipientes de gran envergadura se puede realizar un muestreo de las chapas y hacer un ensayo de tracción antes de realizar cualquier cálculo.

7.3.2 Factor de eficiencia de la junta (E):

La Tabla UW-12 da las eficiencias conjuntas E a ser utilizada en las fórmulas de esta División para juntas completadas mediante un proceso de soldadura por arco o gas. La eficiencia de la junta depende solo del tipo de unión, y grado de radiografiado. El código ASME hace referencia a esto en la parte UW-12 . Así, para los siguientes tipos, la eficiencia (%) es:

TABLE UW-12
MAXIMUM ALLOWABLE JOINT EFFICIENCIES^{1,5} FOR ARC AND GAS WELDED JOINTS

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full ²	(b) Spot ³	(c) None
(1)	Butt joints as attained by double-welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces to agree with the requirements of UW-35. Welds using metal backing strips which remain in place are excluded.	None	A, B, C, & D	1.00	0.85	0.70
(2)	Single-welded butt joint with backing strip other than those included under (1)	(a) None except as in (b) below (b) Circumferential butt joints with one plate offset; see UW-13(b)(4) and Fig. UW-13.1, sketch (k)	A, B, C, & D A, B, & C	0.90 0.90	0.80 0.80	0.65 0.65
(3)	Single-welded butt joint without use of backing strip	Circumferential butt joints only, not over 3/8 in. thick and not over 24 in. outside diameter	A, B, & C	NA	NA	0.60
(4)	Double full fillet lap joint	(a) Longitudinal joints not over 3/8 in. thick (b) Circumferential joints not over 3/8 in. thick	A B & C ⁶	NA NA	NA NA	0.55 0.55

7.3.3 Cálculo del espesor de la envolvente

Según el código ASME, el espesor se calcula de acuerdo a las siguientes fórmulas, basadas en la teoría de esfuerzos dada anteriormente:

Envolventes cilíndricas

siempre y cuando

- el espesor sea menor a la mitad del radio interior: $t < R/2$
- la presión de diseño (en psi) sea menor a 0.385 S.E.: $P < 0.385 \text{ S.E.}$

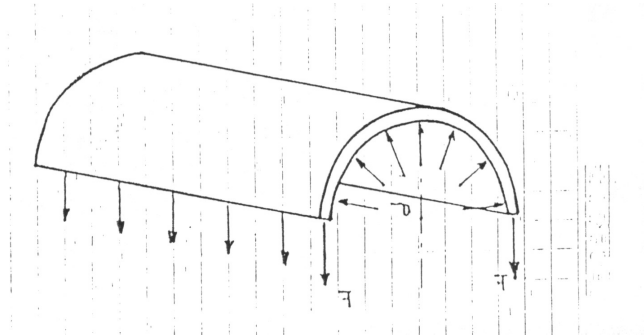
el espesor a usar y la máxima presión serán



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P}$$

$$P = \frac{S \cdot E \cdot t}{R + 0.6 \cdot t}$$



Siendo

- t: espesor mínimo requerido
- P: presión de diseño (máxima admisible)
- S: tensión máxima admisible
- R: radio interior del recipiente
- 0,6 P: corrección por presión de cód. ASME
- E: eficiencia de la junta

Envoltentes esféricas

siempre y cuando

- el espesor sea menor a 0.356R: $t < 0.356R$
- la presión de diseño (en psi) sea menor a 0,665 S.E.: $P < 0,665 S.E$

Las fórmulas a aplicar serán:

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{R + 0.2 \cdot t}$$

$$t = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P}$$

Cuando sea necesario, se colocarán REFUERZOS para prevenir cualquier clase de sobrecargas o grandes deformaciones que se puedan producir como consecuencia de las cargas externas anteriormente mencionadas y además de la Presión y la Temperatura.

7.3.4 Cálculo del espesor de los cabezales

Cálculo del volumen

Una vez determinado el volumen de la porción cilíndrica del tanque y el espesor de la envoltente se procede al cálculo del cabezal.

Los volúmenes de las cabezas se calculan por separado y se suman a la porción cilíndrica. Esto se debe a que en el caso de recipientes verticales, el cabezal superior no soporta la carga del material y puede ser dimensionado independientemente.

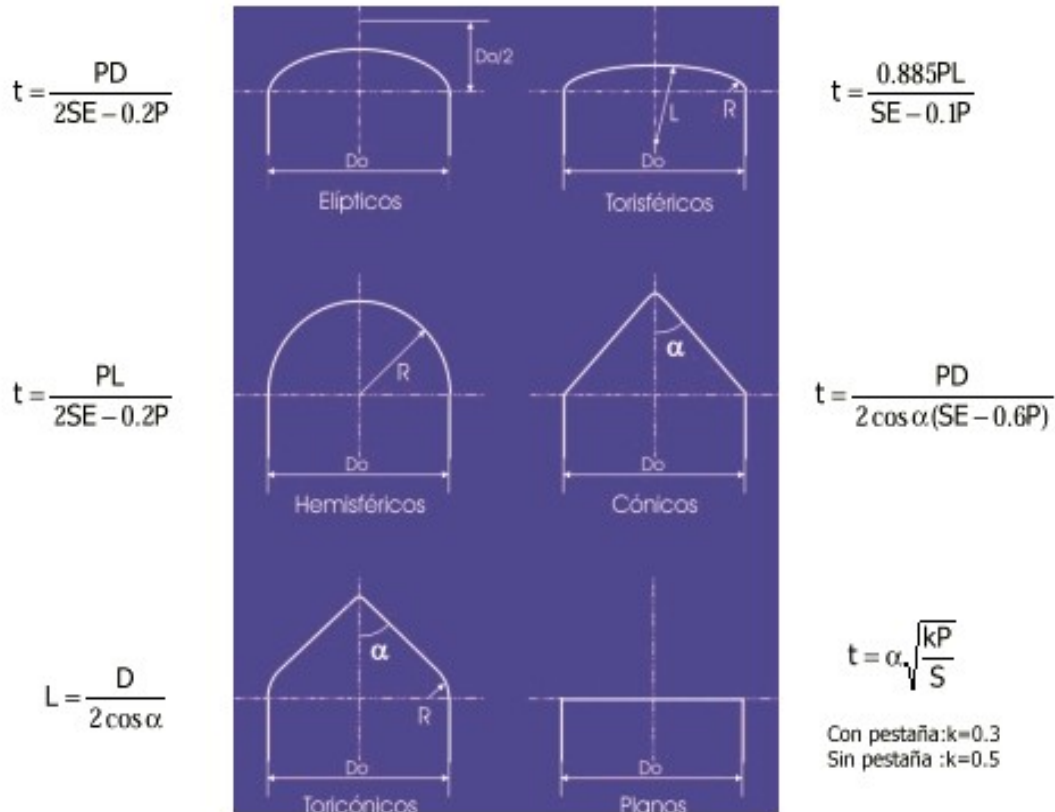


Calculo de espesores

El cálculo de espesor de cabezales se realiza en forma bastante análoga a la de las envolventes.

La parte UG-32 establece los tipos de cabezales permitidos por el código de recipientes sometidos a presión y proporciona los modelos matemáticos para el dimensionamiento del mínimo espesor requerido, luego de conformado el cabezal. El código ASME establece las fórmulas a utilizar para el cálculo del menor espesor requerido en el punto o zona mas delgada de los cabezales, sometidos a presión interna.

Las fórmulas para los diversos tipos de cabezales son:



Los cabezales toriesféricos y toricónicos, con Presión en el lado cóncavo, para soldar en la envolvente, tendrán una pestaña con una longitud suficiente como para cumplir con lo normado en la UW-13.

Los cabezales semiesféricos no necesitan pestaña, pero si la tienen, el espesor de la misma deberá ser como mínimo el espesor de una envolvente de igual diámetro.

Las aberturas de los cabezales en un recipiente sometidos a presión interna, deberán cumplir con los requerimientos de UG-36 a UG-46, para la entradas de hombre o entradas y salidas de cañerías del recipiente.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

La nomenclatura usada es la siguiente:

t: mínimo espesor, en pulgadas, que debe tener el cabezal, después de conformado sin el espesor de corrosión.

P: presión de diseño.

D: diámetro interior de la pestaña del cabezal o longitud interior del eje mayor de un cabezal elíptico, o diámetro interior de un cabezal cónico en el punto bajo medido perpendicularmente al eje longitudinal.

En estas medidas no se consideran las tolerancias por corrosión.

Di: diámetro interior, en pulgadas de la porción cónica de un cabezal toricónico a su punto de tangencia de la articulación y medido perpendicularmente al eje del cono.

S: tensión máxima admisible (psi).

E: menor eficiencia de cualquier unión del cabezal. Para cabezales hemisféricos, esta definición incluye la unión del cabezal a la envolvente. Para cabezales sin costura $E = 1$

L: radio interior esférico o de coraza.

α : es el medio ángulo, incluido el vértice del cono respecto de la línea central del cabezal.

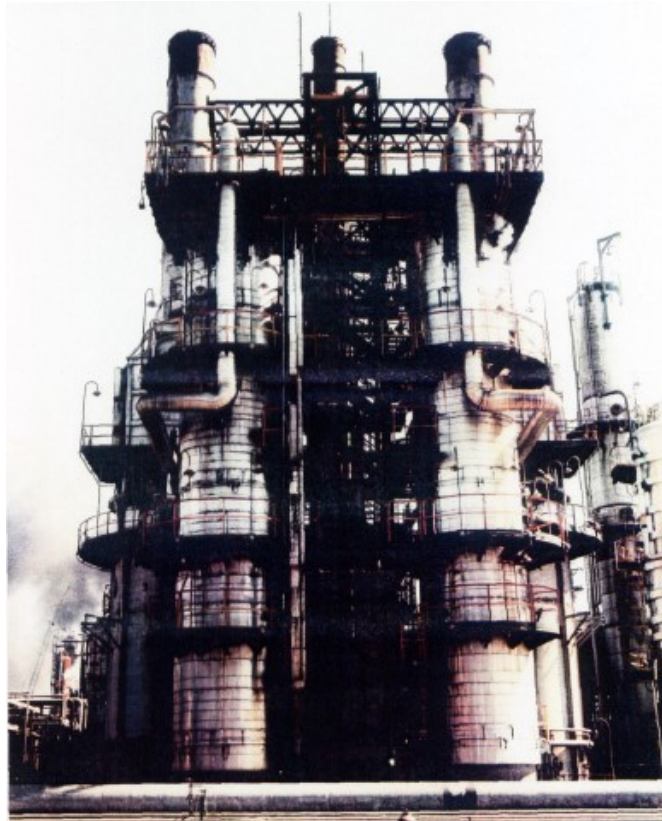
8 RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN EXTERNA

Daremos ahora una breve introducción al cálculo de los recipientes sometidos a presión externa, que no deja de ser una introducción por lo cual recomendamos para una ampliación del tema remitirse al código ASME, en el cual está basado el presente trabajo.

Estos recipientes son aquellos donde la presión externa supera a la del interior y aunque lo primero que se nos viene a la cabeza cuando decimos un RSPE es un submarino, nos encontraremos con estos muchas veces en las industrias, como por ejemplo en las industrias de proceso donde se encuentran las torres de fraccionamiento las cuales generalmente trabajan a presión externa mayor que la interna.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión



Vista parcial de una torre de fraccionamiento en la industria petrolífera.

Los conceptos básicos de diseño de los RSPE difieren fundamentalmente de aquellos considerados en la construcción de RSPI.

Podríamos hacer una analogía de esta diferencia con la que existe entre el diseño de una barra sometida a tracción y una barra sometida a compresión. Donde la primera situación representaría a un RSPI y la segunda a un RSPE.

El contorno o forma de una barra sometida a tracción no tiene gran importancia para el dimensionamiento, debido a que la excentricidad de la fuerza aplicada no tiene una influencia considerable. Pero si el mismo elemento se encuentra sometido a una fuerza de compresión sería esencial determinar la disposición del área de la sección transversal y la excentricidad de la fuerza aplicada con respecto al eje baricéntrico, ya que en este caso aparecerá una flexión y el material colapsará a tensiones mucho menores que la de fluencia.

Lo que queremos remarcar con lo anterior es en los RSPI no presenta gran influencia el hecho de que el recipiente tenga alguna deformación porque luego de ser sometido a presión y debido a la elasticidad del mismo este tomará la forma original a la que fue diseñado.

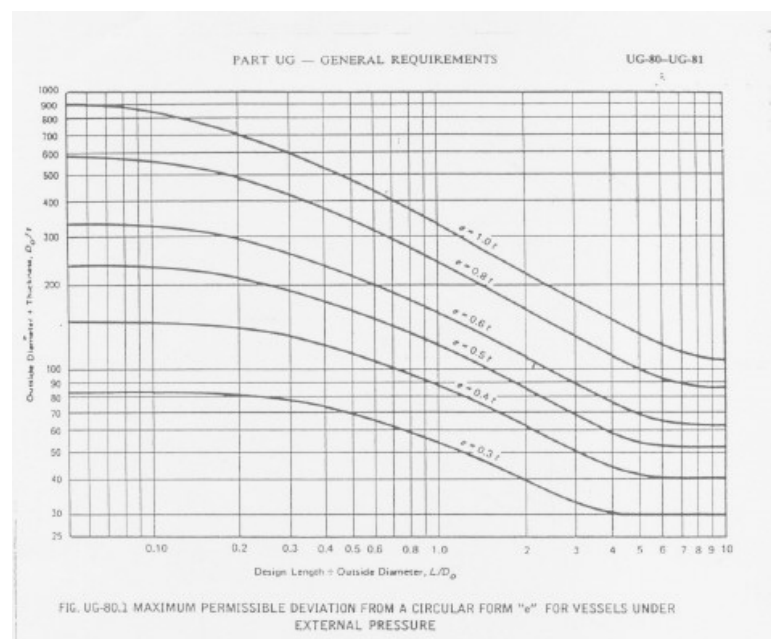
Pero en el caso de los RSPE, el hecho de que exista una deformación implicaría de inmediato una excentricidad de las fuerzas aplicadas originadas por la presión externa y que hará que el recipiente colapse para solicitaciones menores a las previstas en él cálculo, esto hace que la construcción de los mismos requiera de una esmerada calidad de terminación, elevando de esta manera los costos de fabricación.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

La excentricidad e se define como la diferencia entre el D_{max} . Y el D_{min} . Exterior o interior en cualquier sección transversal del mismo. Este valor de e no podrá exceder un valor límite fijado por el código. Esta tolerancia se deberá cumplir en las infinitas secciones del recipiente y si alguna sección excede dicha tolerancia una vez que el recipiente a sido fabricado dicho calculo carecerá de valor para el código y en el peor de los casos el recipiente puede colapsar.

La norma del código que fija la excentricidad es la "UG-80", la siguiente figura nos muestra las curvas de e permitida, a la misma ingresaremos con el valor de D_o/t y L/D_o no permitiendo el código valores mayores para e que los ahí especificados.



Curvas de excentricidades permitidas, correspondientes a la norma UG-80

El código también fija la tolerancia a la deformación para las cabezas.

8.1 Procedimiento de cálculo de Recipientes Sometidos a Presión externa según el Código ASME

Los datos iniciales con los que contamos para iniciar el cálculo son los siguientes:

- Dimensiones del recipiente (como diámetro).
- Tipo de cabezal a usar.
- Condiciones de operación. Estos datos son proporcionados por la empresa que utilizará el equipo y el calculista tendrá que basarse en ellos para realizar el cálculo. Según el código, los apartados que especifican estas son:

UG 20: Temperatura de diseño. La temperatura máxima usada en el diseño, no debe ser menor que la temperatura máxima presumida en el punto medio de la pared del espesor del recipiente durante las condiciones de operación de la parte del



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

recipiente considerada. En ningún caso son permitidas las temperaturas de diseño que excedan las máximas temperaturas fijadas para cada material en las tablas de tensión admisible de los materiales (subsección C).

UG 21: Presión de diseño. Los recipientes considerados por la sección VIII del código se diseñarán con las más exigentes condiciones de Presión y Temperatura que puedan esperarse en una operación normal. En tales condiciones se considerará la máxima diferencia de presión entre el interior y el exterior del recipiente durante la vida operativa del mismo. Esta diferencia de presión puede coincidir o no con la presión de trabajo, y si llegara a variar, siempre se toma el mayor valor.

UG 22: Cargas. Se tiene en cuenta para obras estructurales y las cargas a considerar en el diseño que incluyen:

- Presión de diseño.
- Cargas de impacto.
- Peso del recipiente y accesorios con su contenido normal.
- Otras cargas como: tuberías, equipos montados, etc.
- Vientos y sismo.
- Efectos de gradientes de temperatura.

UG-23: Máximos valores de tensión admisible. Las máximas tensiones admisibles dependerán del material y la temperatura de servicio encontrándose los valores permitidos de las mismas en la subsección C del código.

UG-25: Corrosión. Los recipientes o parte de los mismos sujetos a corrosión, erosión o abrasión mecánica serán fabricados para la vida útil del mismo mediante un adecuado incremento del espesor del recipiente, o mediante el uso de protecciones anti corrosión.

Agujeros alchahuetes: Se utilizan para proveer una indicación de cuando el espesor del recipiente se ha reducido a un grado peligroso. No se usaran en recipientes que contengan sustancias letales, tendrá un diámetro de 1,6 a 4,8 mm y una profundidad no mayor del 80% del espesor del material. Se colocaran en la cara opuesta del recipiente a donde el deterioro es esperado.

8.1.1 Calculo del espesor de la envolvente.

El código ASME establece, en la Norma UG - 28, las pautas a seguir para determinar el espesor de envolventes sometidas a presión externa.

UG-28: Espesor de envolventes sometidas a presión externa. Las reglas para el diseño de envolventes sometidas a presión externa dadas por esta norma se limitan solo a envolventes cilíndricas o esféricas con anillos de refuerzo.

Antes de ingresar en él calculo veremos la simbología utilizada:



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Factor A	$f(L/D_0; D_0/t)$, es una característica geométrica para recipientes cilíndricos.
Factor B	Este factor está relacionado con la máxima tensión permitida para el material a la presión de diseño. Es función del tipo de material usado, temperatura de diseño, factor A
L	Es a la longitud de diseño, para la cual se toma la mayor de las siguientes: 1- Distancia entre las uniones de los dos cabezales de la envolvente mas un tercio de la profundidad de cada cabezal. 2- Cuando existen anillos de refuerzo se toma la mayor de: -Distancia entre centros de dos anillos -Distancia entre el centro del primer anillo de refuerzo a la unión del cabezal del la envolvente mas un tercio de la flecha del cabezal.
D_0	Diámetro exterior de la envolvente cilíndrica
P	Presión externa de diseño, que es la mayor diferencia de presión que puede presentarse durante la vida útil del recipiente
T	Mínimo espesor requerido, para envolventes cilíndricas o esféricas y sin tolerancia por corrosión

Envolventes cilíndricas

Pasos a seguir son:

a- Si D_0/t es mayor o igual de 10:

Paso 1: Asumimos un valor de t por experiencia y criterio y determinamos L/D_0 y D_0/t

Paso 2: Ingresamos a la figura UG-28.0 del apéndice 5 del código con el valor de L/D_0 :

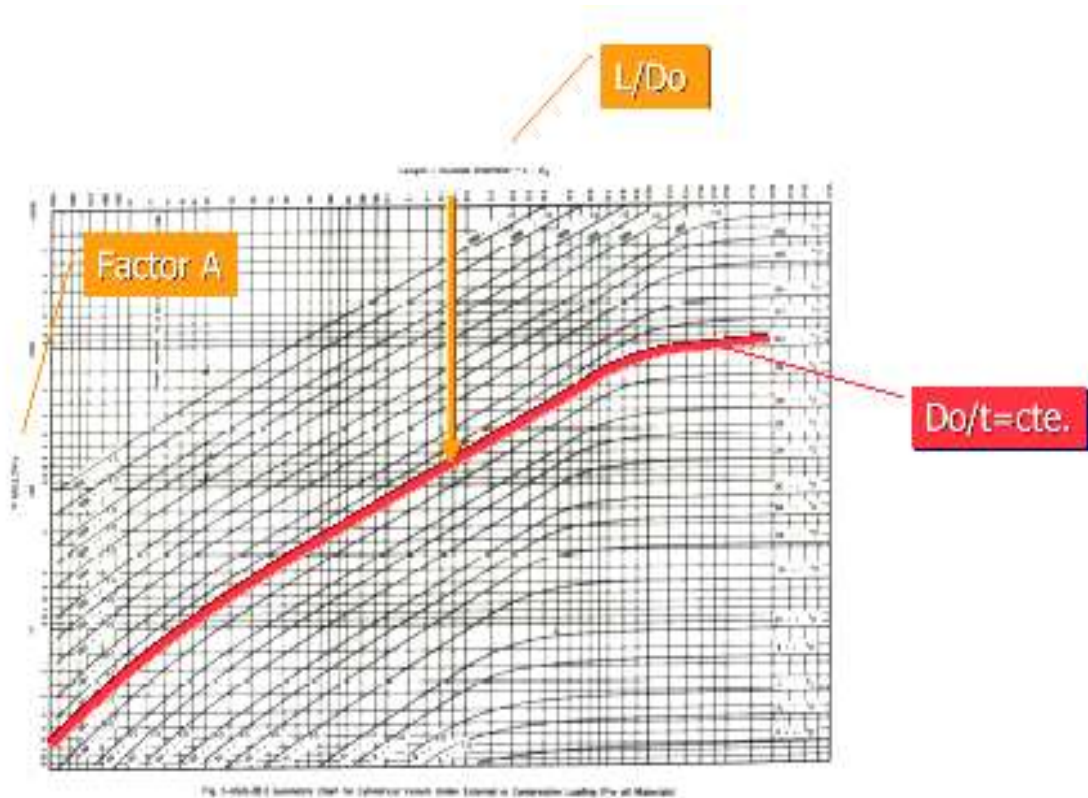
Si L/D_0 es mayor que 50 tomamos 50.

Si L/D_0 es menor de 0,05 tomamos 0,05.

Luego nos desplazamos hasta interceptar la curva de D_0/t , para bajar luego verticalmente hasta interceptar el eje de abcisas y leer en el mismo el valor correspondiente al factor A.

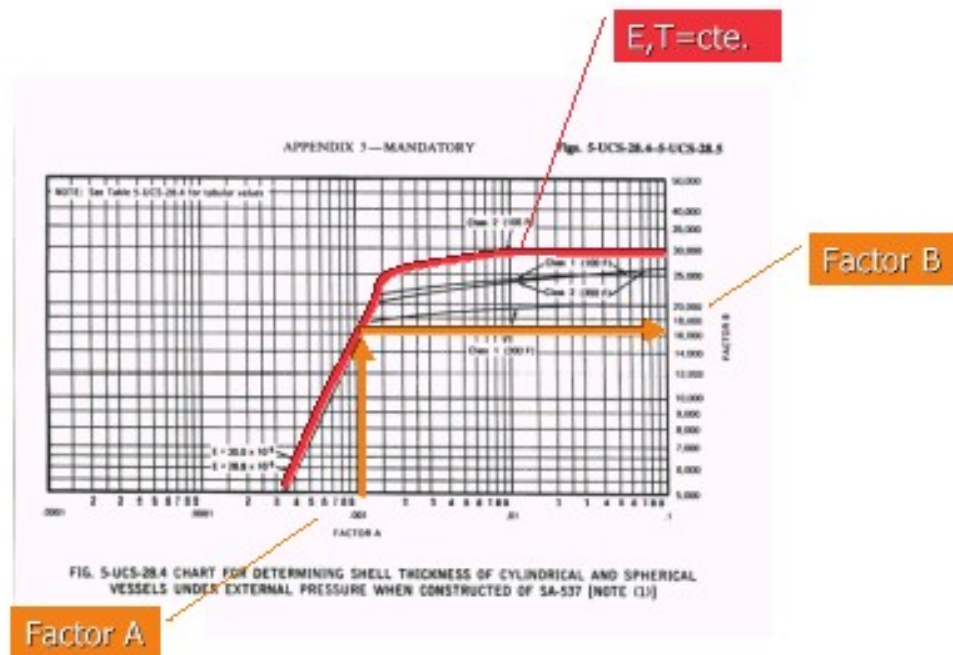


Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión



Curvas utilizadas para determinar el factor A

Paso 3: Con este valor de A, ingresamos al grafico de características del material del apéndice 5, interceptamos a la curva de temperatura de diseño y nos movemos luego horizontalmente hasta interceptar el eje donde se encuentra el valor B.



Curvas utilizadas para determinar el factor B



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Paso 4: Con el valor de B determinamos el valor de presión admisible mediante la siguiente expresión:

$$P_a = \frac{4 * B}{3 * (D_0 / t)}$$

Paso 5: Comparamos P_a y P

Si $P_a \geq P$ terminamos el cálculo (se puede mejorar iterando nuevamente para un t menor)

Si $P_a < P$ asumimos un t mayor y repetimos el procedimiento.

Aclaración :

En caso de que el factor A quede a la izquierda de las curvas del apéndice 5, no podremos determinar B y la presión admisible se determina mediante:

$$P_a = \frac{2 * A * E}{3 * (D_0 / t)}$$

b- Si $D_0/t < 10$:

Paso 1: Ídem a los pasos 1,2,3 del método anterior. Para valores de $D_0/t < 4$ el factor lo calculamos mediante:

$$A = \frac{1.1}{(D_0 / t)^2}$$

Paso 2: Con el valor de B calculamos las siguientes presiones

$$P_{a1} = \left[\frac{2.167}{(D_0 / t)} - 0.0833 \right] * B$$

$$P_{a1} = \left[\frac{25}{(D_0 / t)} * \left[1 - \frac{1}{(D_0 / t)} \right] \right]$$

Se toma como presión admisible la menor de las dos.

Paso 3: Verificamos si:

$P_a \geq P$	Si es la diferencia es muy grande, el cálculo se puede mejorar
$P_a < P$	Asumimos un t mayor y repetimos nuevamente todo el



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

	procedimiento.
--	----------------

Envoltentes esféricas

Pasos a seguir

Paso 1: Asumimos un valor de t por experiencia y criterio, calculamos el valor del factor A usando la siguiente formula:

$$A = \frac{0.125}{(R_0 / t)}$$

R₀: Radio exterior

Paso 2: Usando este valor de A ingresamos a la tabla de características del material del apéndice 5 y determinamos B. Si cae a la derecha de las curvas asumimos como valor de B el interceptado por la ultima curva continuando la misma horizontalmente.

Paso 3: Con el valor de B determinado calculamos la Presión admisible:

$$P_a = \frac{B}{(R_0 / t)}$$

Paso 4: Verificamos si:

P _a ≥ P	Se da por concluido el calculo (se puede mejorar iterando para un t menor)
P _a < P	Tendremos que asumir un nuevo valor de t mayor y repetir el calculo

Paso 5: En el caso de que el valor de A caiga a la izquierda de las curvas del apéndice 5 el valor de la Presión admisible lo determinamos mediante:

$$P_a = \frac{0.0625 * E}{(R_0 / t)^2}$$

8.1.2 Calculo del espesor de cabezales

Norma UG-33:

Existen diversos tipos de cabezales, desarrollaremos el calculo para cabezales Elípticos, Toriesfericos y hemisféricos ya que son los más usuales.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Elípticos y toriesfericos:

El espesor requerido para este tipo de cabezales sometidos a presión externa deberá ser el mayor de los espesores calculados de la siguiente manera:

1-El espesor es calculado por el procedimiento seguido en la norma UG-32 , norma que permite calcular el espesor de cabezales sometidos a presión interna. Solamente se ajustan los valores de las variables de diseño para el caso de presión externa.

Las formulas que permiten calcular el espesor son las siguientes:

Cabezal elíptico

$$t = \frac{1,67 \cdot P \cdot D_o}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$$

O también se puede calcular la presión admisible en función del espesor:

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{D_o + 0,2 \cdot t}$$

Cabezal toriesferico:

$$t = \frac{0,885 \cdot P \cdot L}{S \cdot E - 0,1 \cdot P}$$

Como en el caso del elíptico se puede calcular alternativamente la presión admisible, mediante:

$$P = \frac{S \cdot E \cdot t}{0,885 \cdot L + 0,1 \cdot t}$$

S: modulo de elasticidad

E: eficiencia de la junta

tomamos para

todos los cálculos el valor

E=1

II-Calculamos la presión admisible siguiendo los mismos pasos que para los recipientes esféricos.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Cabezales hemisféricos:

La presión admisible para este tipo de cabezales se determina siguiendo los mismos pasos que los seguidos para el cálculo de los recipientes esféricos.

9 Anillos de refuerzo

La función que cumplen es la de acortar la longitud del recipiente con el fin de obtener la rigidez circunferencial necesaria, resultando así menor el espesor requerido para la envolvente.

Los anillos se construyen soldados al exterior o al interior de la envolvente y la cantidad de los mismos depende del criterio del calculista, es un criterio puramente técnico económico ya que por ejemplo los anillos pueden servir de soportes de los platos en una torre de fraccionamiento.

Estos anillos son perfiles de sección I o T. El código ASME indica como se elige el perfil y la cantidad de anillos se determina al fijar la longitud de diseño.

El anillo de refuerzo interior es más conveniente, desde el punto de vista de la estabilidad estructural, porque la máxima tensión de compresión es reducida debido al anillo. En el caso de anillos exteriores no son muy aconsejables debido a la tensión de compresión.

9.1 Cálculo de anillos de refuerzo:

UG-29: Anillos de refuerzo. La nomenclatura utilizada en este párrafo es la siguiente:

Is: es el mínimo momento de inercia requerido, de la sección transversal del anillo de refuerzo, con respecto al eje neutro de la sección transversal, paralelo al eje longitudinal del recipiente (plg).

En la fórmula 1 no se tiene en cuenta la sección de chapa.

As: es el área de la sección transversal del anillo, se obtiene de las tablas del perfil elegido.

Ls : longitud de diseño

D₀: diámetro externo de la envolvente.

P: presión externa de diseño.

A: factor geométrico del material del anillo, antes determinado, y que se corresponde con el factor B y con la temperatura de diseño de la envolvente.

La longitud de diseño Ls se estima en función del espesor y se toma como la distancia desde el centro del anillo hasta la próxima línea de soporte, medida paralelamente al eje de diseño.

Una línea de soporte puede ser un anillo de refuerzo, una unión circunferencial (unión soldada) y también una línea que puede ir ubicada a 1/3 de profundidad del recipiente medido desde la costura del cabezal de la envolvente.

Secuencia de pasos a seguir para la obtención de Is:



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Paso 1: Asumiendo que ya ha sido calculada la envolvente tenemos que D_0 , L_s y t son conocidas a continuación se deberá seleccionar el perfil a utilizar como anillo de refuerzo, se saca de tablas su momento de inercia I_s y su A_s . Luego aplicando la siguiente formula se obtiene el factor B:

$$B = \frac{3 P * D_0}{4 t + A_s / L_s}$$

Paso 2: Se ingresa con el valor de B a las curvas características del material del apéndice 5 hasta interceptar la curva de temperatura. Proyectando luego sobre el eje de abscisas obtenemos el valor de A. Si no es posible determinar A mediante el procedimiento anterior se recurre a la siguiente formula:

$$A = \frac{2 * D_0}{E}$$

Paso 3: Se calcula el I_s con alguna de las dos formulas siguientes, dependiendo de si el calculista desea considerar la contribución del anillo solamente o la contribución del anillo y la envolvente.

1)

$$I_s = \frac{D_0^2 * L_s * (t + A_s / L_s) * A}{14}$$

2)

$$I_s = \frac{D_0^2 * L_s * (t + A_s / L_s) * A}{10.9}$$

Paso 4:

Conocido A, se calcula I_s , por la fórmula 1. Si I_s es mayor que el I del perfil elegido se selecciona otro perfil con un I mayor. Se repite el cálculo hasta que I sea mayor que I_s .

El momento de inercia del perfil tampoco deberá ser demasiado grande ya que le transferiría rigidez al recipiente y entonces el recipiente no tendría la suficiente elasticidad como para absorber las deformaciones debidas al uso, pudiendo saltar las soldaduras.

La fórmula 2 da el momento de inercia combinado entre perfil y chapa, donde se tiene en cuenta el área de chapa debajo del perfil.

9.2 Aberturas de los anillos de refuerzo:

Otro aspecto importante a tener en cuenta, es que los anillos interiores presentan aberturas, ya sea para drenajes o para permitir el pasaje de tubos. Además si el recipiente se ubica horizontalmente, hay que dejar un determinado arco para que en un vaciado pueda circular el líquido, entonces se deja en la parte inferior un sector sin anillo de refuerzo, es por tal motivo que el código ASME establece el arco máximo de la envolvente que se puede dejar sin soporte o anillo de refuerzo.

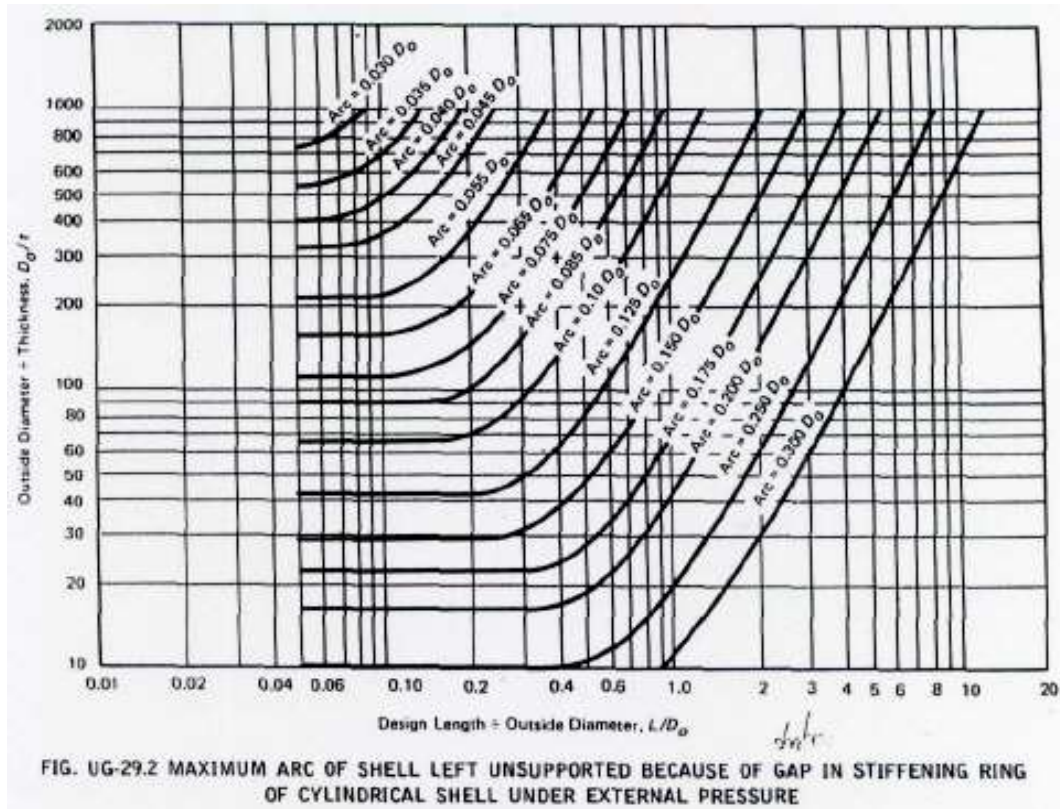
En un gráfico de la pag. 26 sección UG-29, se dará en isolineas el arco máximo como un porcentaje de D_0 . En caso que se deba dejar un arco mayor, se hará una



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

cuna exterior o perfil exterior, de manera que el conjunto exterior cumpla con al condición del momento de inercia.

El arco mínimo de contacto de la cuna es de 120°, y son preferibles arcos mayores.



Aberturas máximas permitidas sin anillo de refuerzo

Si los anillos de refuerzo tienen aberturas para el pasaje de tubos, el momento de inercia neto I_a del anillo debe ser suficiente como para poder responder satisfactoriamente.

9.3 Unión de los anillos de refuerzo y la envolvente: Norma UG-30.

Si dicha unión es por soldadura, se podrá hacer en forma continua o discontinua, en este ultimo caso la cantidad cubierta no podrá ser inferior a la mitad de la circunferencia, para anillo exteriores, y no menor que la tercera parte de la circunferencia para anillos interiores.

También se especifica la distancia entre cordones.

10 Fabricación de Recipientes Sometidos a Presión

Introducción:



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Hace 30 años el material más utilizado era el acero al carbono, pero en la actualidad está siendo sustituido, en parte, por otros materiales (Polímeros). Esto se debe al avance tecnológico de éstos materiales.

10.1 Proceso de fabricación

La fabricación comprende:

Transporte
Almacenamiento
Corte de la chapa
Golpe de prensa
Curvado ó Rolado
Punteado
Soldadura
Distencionado
Test hidráulico
Pintado (Opcional)

Transporte

El transporte de las chapas para la fabricación de los recipientes sometidos a presión deberá hacerse con mucho cuidado por medio de grúas, polipastos u otro tipo de transporte como ser carretones. Esto debe hacerse así, debido a que el peso mismo de la chapa puede provocar el flexionado de la misma, en el caso de transportarlas con grúas, puede provocar melladuras, mordeduras, en el caso de ser mal tomadas.

Almacenamiento

El almacenamiento de los materiales, como ser chapas, bridas, juntas roscadas, bulones ó electrodos (material de soldar), debe realizarse en lugares libres de humedad, agentes químico corrosivos, ambientes libres de grasas, aceites, polvillos u otro tipo de agentes que ataquen al material.

Corte de la chapa

El corte de la chapa puede realizarse por máquinas de tipo mecánicas, plasma, oxicorte, láser, sierra, pero las más utilizadas en la actualidad son las 3 primeras ya que se tiene un gran ahorro de tiempo, logrando a su vez mayor calidad en el corte de la chapa. En lo que respecta al plasma, produce un canto de la chapa prolijo, sin rebaba. No así el oxicorte que produce un canto irregular, con rebabas.

Golpe de prensa.

El golpe de prensa va asociado con el curvado ó rolado, ambos están en función del espesor de la chapa y el material.

El mismo se realiza para que la chapa pueda ser tomada por los rodillos de la roladora cuando se la va a curvar. El mismo se realiza en los extremos de la chapa.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Curvado o rolado.

El curvado o rolado se realiza por medio de una máquina que posee 3 rodillos de pequeño ó gran diámetro según las dimensiones de la chapa, los cuáles se encargan de curvarla, operación que se logra con repetidos pasos por los mismos, de forma tal que adquieran la forma cilíndrica de la envolvente del recipiente.

Punteado

El punteado, reservado exclusivamente para las uniones que irán soldadas, se realiza antes de soldar totalmente ó ejecutar un cordón de soldadura. Esto se debe a que si el soldado se realiza directamente, se producirán torceduras en las chapas y por consiguiente el recipiente no respetara la forma a la cual fue diseñado y calculado, apareciendo estados tensionales complejos, los que pueden derivar en el colapso del mismo.

Soldadura

Los metodos de soldaduras se clasifican según la AWS (Sociedad Americana de Soldadores), en :

Welding: a los procesos en los que la temperatura de fusion del aporte y el metal base no oscila en 50°F.

Branzing: a los procesos en los que la temperatura de fusion del aporte y el metal base difieran mucho.

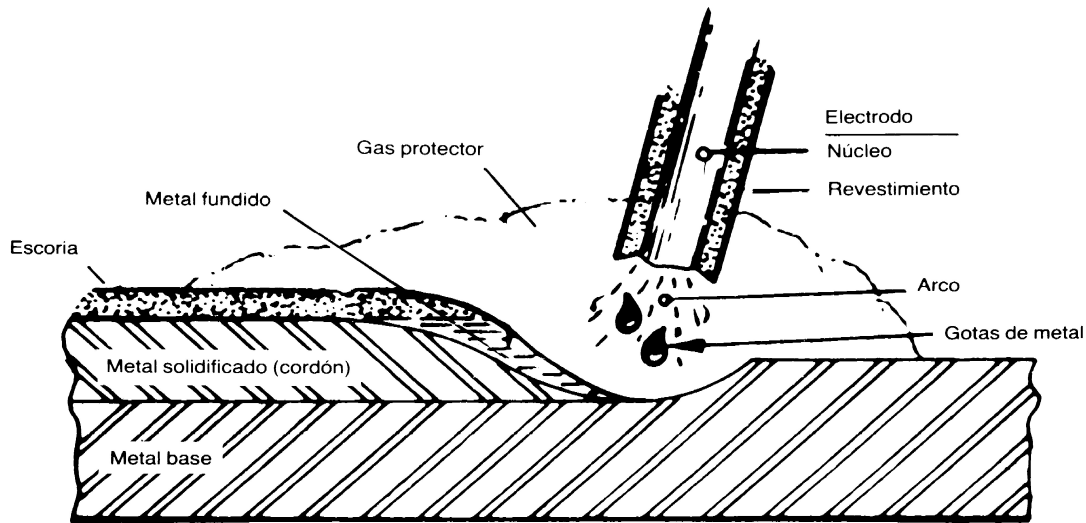
Soldering: cuando el material de aporte sea una aleacion de Cu o Sn.

Equipos y tecnicas mas utilizadas en las soldaduras

Soldadura por Arco Manual:

El sistema por Arco Manual, se define como el proceso en el que se unen dos metales mediante una fusión localizada, producida por un arco eléctrico entre el electrodo metálico y el metal base que desea unir.

La soldadura al arco se conoce desde fines del siglo pasado. En esa época se utilizaba una barilla metálica descubierta que servia de metal de aporte. Pronto se descubrió que el oxígeno y el nitrógeno de la atmosfera eran causantes de fragilidad y poros en el metal soldado, por lo que al nucleo metalico se le agregó un revestimiento que al quemarse se gasificaba, actuando como atmosfera protectora, a la vez que contribuía a mejorar notablemente otros aspectos del proceso.



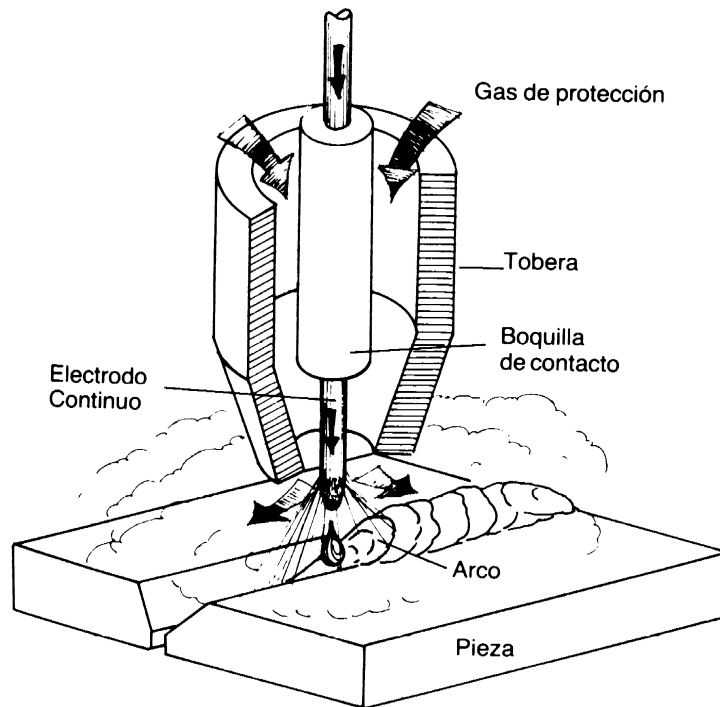
El electrodo consiste en un núcleo metálico, rodeado por una capa de revestimiento donde el núcleo es transferido hacia el metal base a través de una piletta de líquido, debido que tanto el metal base como el núcleo llegan al punto de fusión, por la circulación de corriente eléctrica.

El revestimiento del electrodo, que determina las características mecánicas y químicas de la unión, está constituido por un conjunto de componentes minerales y orgánicos que cumplen las siguientes funciones:

- Producir gases protectores para evitar contaminación atmosférica y gases ionizantes para dirigir y mantener el arco.
- Producir escoria para proteger el metal ya depositado hasta su solidificación.
- Suministrar materiales desoxidantes, elementos de aleación y hierro en polvo.

Sistema MIG:

El proceso es definido por la AWS como un proceso de soldadura por arco, donde la fusión se produce por la elevación de la temperatura debido al arco eléctrico entre un electrodo de metal de aporte continuo y la pieza, donde la protección del arco se obtiene de un gas suministrado en forma externa, el cual protege el metal líquido de la contaminación atmosférica y ayuda a estabilizar el arco.



El voltaje, amperaje y tipo de gas de protección, determinan la manera en la cual se transfiere el metal desde el alambre-electrodo al baño de soldadura.

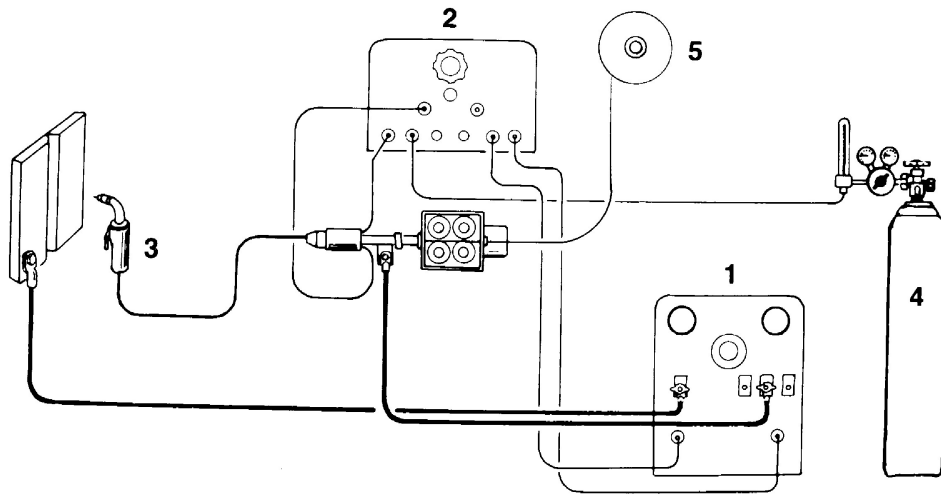
El sistema MIG posee cualidades importantes al soldar aceros, entre las que sobresalen :

- El arco siempre es visible para el soldador.
- La pistola y los cables de soldadura son ligeros, haciendo muy fácil su manipulación.
- Es uno de los más versátiles entre los sistemas de soldadura.
- Rapidez de deposición.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Equipo MIG de soldadura



1. Soldadora.
2. Alimentador que controla el avance del alambre a la velocidad requerida.
3. Pistola de soldar para dirigir directamente el alambre al área de soldadura.
4. Gas protector, para evitar la contaminación del baño de soldadura.
5. Carrete de alambre de tipo y diámetro específico.

El sistema MIG es un proceso de soldadura por arco eléctrico, en el cual un alambre automática y continuamente es alimentado hacia la zona de soldadura a una velocidad constante y controlada. El área de la soldadura y el arco están debidamente protegidos por una atmósfera que evita la contaminación.

Sistema TIG

El sistema TIG es un sistema de soldadura por arco con protección gaseosa, que utiliza el calor de un arco eléctrico generado entre un electrodo de tungsteno no consumible y la pieza a soldar, donde puede utilizar o no material de aporte.

El gas utilizado para la protección es Helio o Argón, o una mezcla de ambos.

Las características más importantes que ofrece este sistema es entregar alta calidad de soldadura en todos los metales, incluyendo aquellos difíciles de soldar, como también para soldar metales de espesores delgados y para depositar cordones de raíz en unión de cañerías.

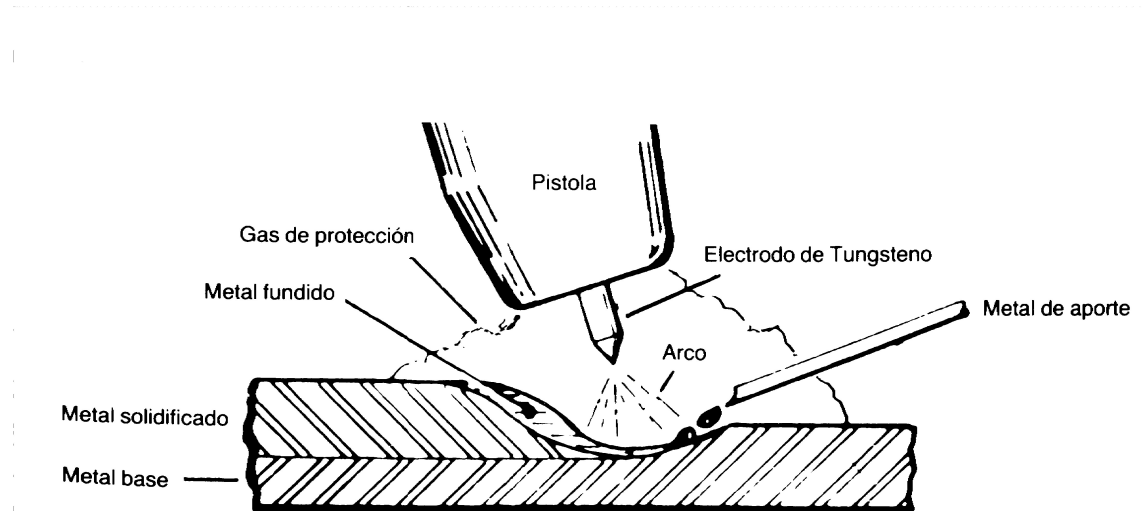
Las soldaduras hechas con el sistema TIG son más fuertes, más resistentes a la corrosión y más dúctiles que las realizadas con los electrodos convencionales. Cuando se necesita alta calidad y mayores requerimientos de terminación, se hace necesario utilizar el sistema TIG para



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

lograr soldaduras homogéneas, de buena apariencia y con acabado completamente liso.

Características:



CARAC.

- No se requiere fundente, y no hay necesidad de limpieza posterior a la soldadura.
- No hay salpicadura, chispa, ni emanaciones, al no circular metal de aporte a través del arco.
- Brinda soldaduras de alta calidad en todas las posiciones, sin distorsión.
- Al igual que todos los sistemas de soldadura con protección gaseosa, el área de soldadura es claramente visible.
- El sistema puede ser automatizado, controlando mecánicamente la pistola y/o el metal de aporte.

El equipo para sistema TIG consta básicamente de:

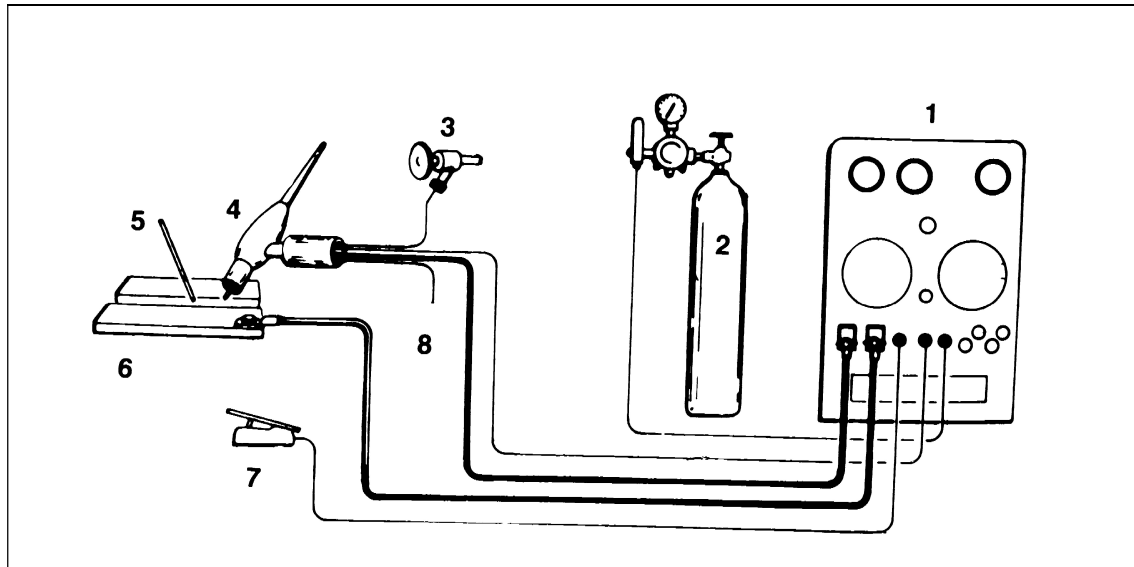
- Fuente de poder
- Unidad de alta frecuencia
- Pistola
- Suministro de gas de protección
- Suministro de agua de enfriamiento

La pistola asegura el electrodo de tungsteno que conduce la corriente, el que está rodeado por una boquilla de cerámica que hace fluir el gas protector concéntrico.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

La pistola normalmente se refrigera por aire. Para intensidades de corriente superiores a 250 A se utiliza refrigeración por agua, para evitar el recalentamiento del mango.



Equipo TIG de soldadura

1. Fuente de poder de corriente alterna y corriente continua, con unidad de alta frecuencia incorporada
2. Gas de protección
3. Suministro de agua (enfriamiento de pistola)
4. Pistola
5. Material de aporte
6. Material base
7. Control remoto de pedal
8. Drenaje de agua

Sistema de arco sumergido

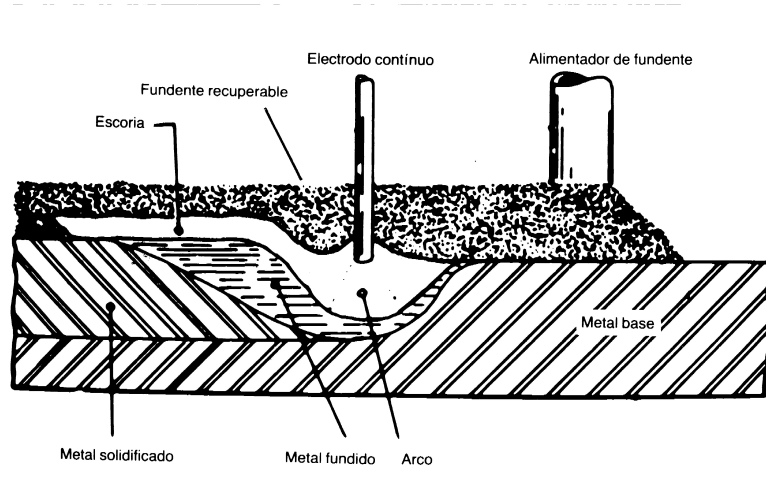
Es un proceso automático, en el cual, como lo indica la figura, un alambre desnudo es alimentado hacia las piezas. Este proceso tiene como característica que el arco se mantiene en una masa de fundente, que es provisto desde una tolva, que se desplaza delante del electrodo.

De esta manera el arco resulta invisible, lo que constituye una ventaja, pues evita el empleo de elementos de protección contra las radiaciones infrarrojas y ultravioletas, que son imprescindible en otros casos.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Las corrientes utilizadas en este proceso varían en un rango que va desde los 200 a los 2000 amperes, y los espesores que son posibles varían desde los 5 a 40 mm.



El proceso se caracteriza por sus elevados regímenes de deposición y es normalmente empleado cuando se trata de soldar grandes espesores de acero.

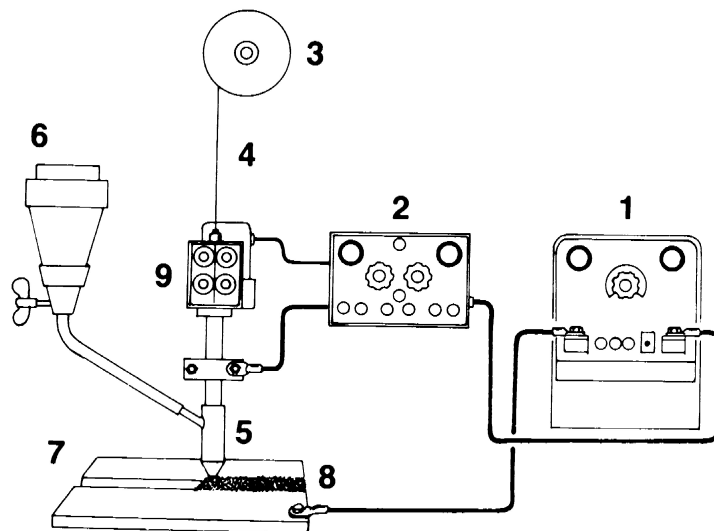


Diagrama de equipo de arco sumergido

1. Fuente de poder de CA o CC (100% ciclo de trabajo).
2. Sistema de control.
3. Porta-carrete de alambre.
4. Alambre – Electrodo.



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

5. Tobera para boquilla.
6. Recipiente porta fúndente.
7. Metal base.
8. Fúndente.
9. Alimentador de alambre.

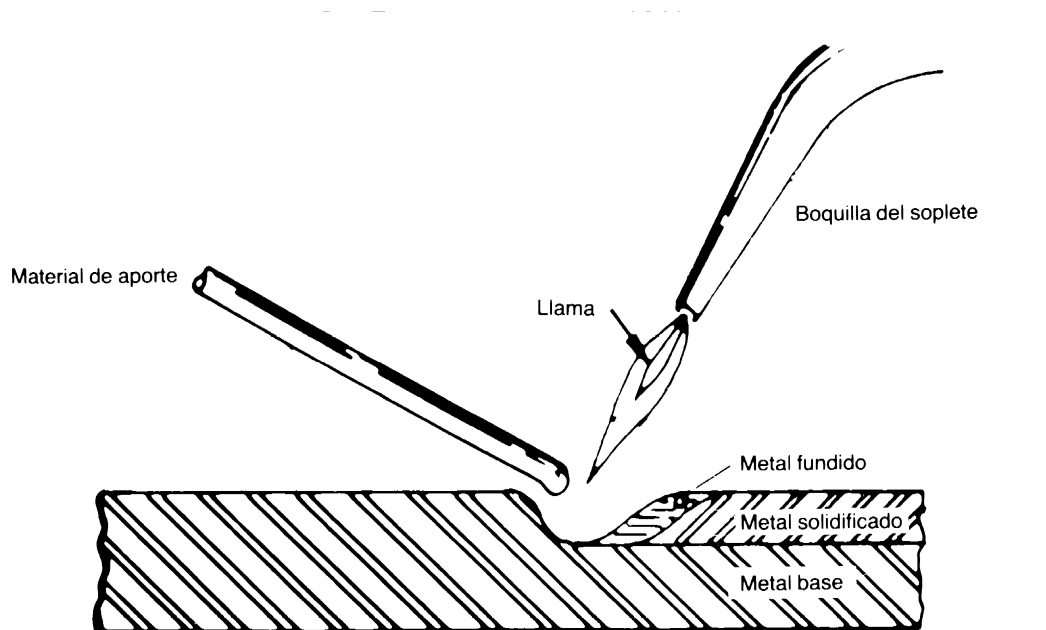
Sistema oxiacetilénico

El proceso de soldadura oxiacetilénica mostrado en la figura, consiste en una llama dirigida por un soplete, que se obtiene por medio de la combustión de los gases oxígeno-acetileno. El intenso calor de la llama funde la superficie del metal base para formar una pileta líquida. Con éste proceso se puede soldar con o sin metal de aporte. El metal de aporte es agregado para cubrir biseles y orificios.

A medida que la llama se mueve a lo largo de la unión, el metal base y el metal de aporte se solidifican para producir un cordón.

Al soldar cualquier metal se debe escoger el metal de aporte, adecuado, que normalmente tiene elementos desoxidantes para producir soldaduras de calidad.

En algunos casos se requiere el uso de fúndente para soldar cierto tipos de metales.



El equipo es portátil, económico y puede ser utilizado en toda posición.

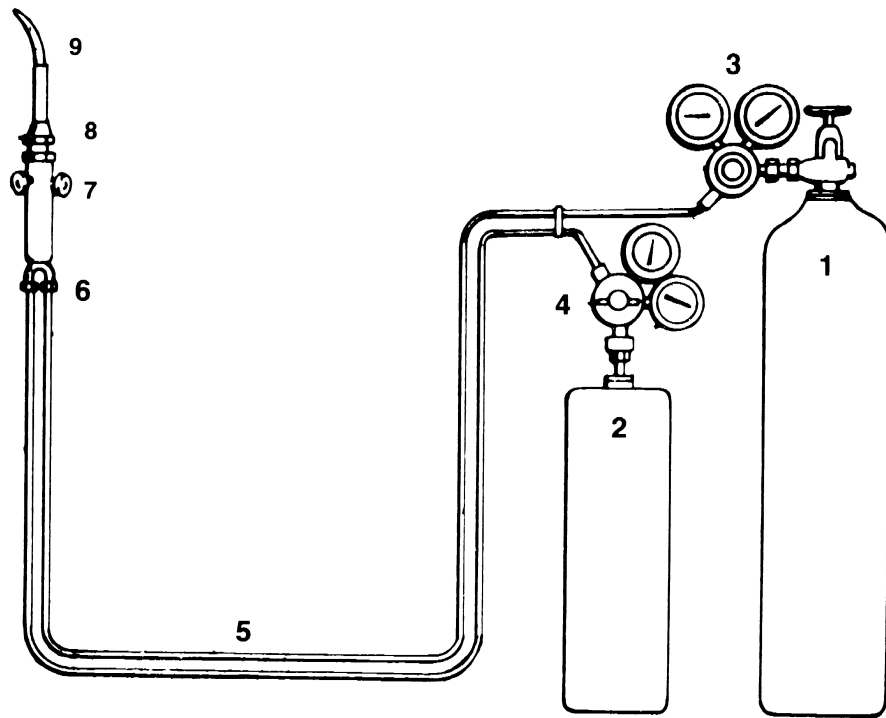


Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

El proceso oxiacetilénico es normalmente usado para soldar metales de hasta $\frac{1}{4}$ " de espesor. Se puede utilizar también para soldar metales de mayor espesor, pero ello no es recomendable.

Su mayor aplicación en la industria se concentra en el campo de la mantención, reparación y soldaduras de cañerías de diámetro pequeño y manufacturas livianas. También puede ser usado como fuente de energía calorífica, para calentar, doblar, forjar, endurecer, etc.

Proceso de combustión base del sistema oxiacetilénico.



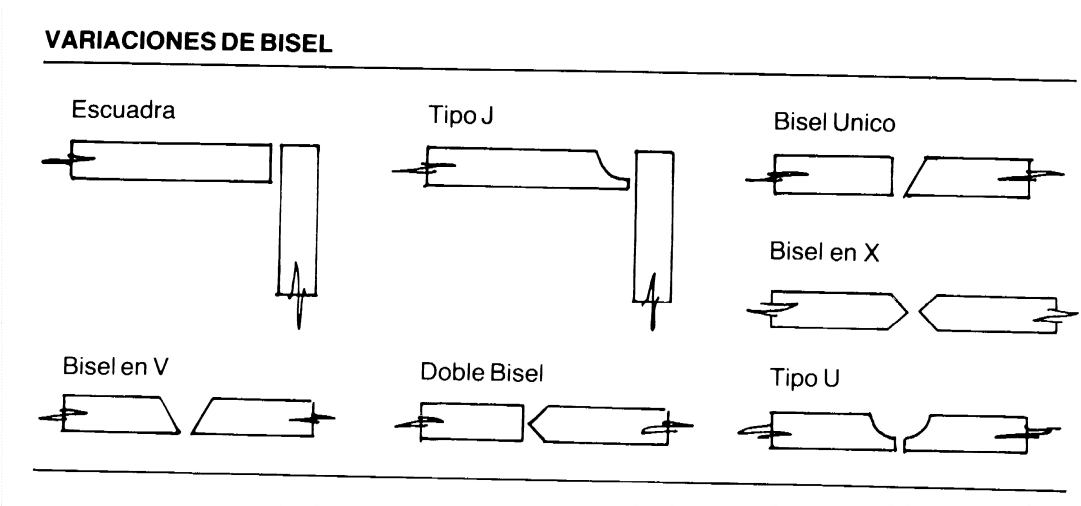
Equipo para soldadura y corte oxiacetilénico

1. Tubo de Oxígeno
2. Tubo de Acetileno
3. Regulador para Oxígeno
4. Regulador para Acetileno
5. Mangueras para gases
6. Válvula antirretorno
7. Válvulas de control de gas
8. Soplete
9. Boquilla de soldar



Tipo de uniones soldadas

Los extremos de las chapas a soldar llevan biseles especiales, como muestra la siguiente figura.



Soldadura de doble tope

Se sueldan por ambos lados, por lo que el recipiente a ser soldado con este tipo de uniones deberá tener un diámetro tal que permita entrar al soldador y equipo.

Son soldaduras más fuertes y caras que las soldaduras de simple tope.

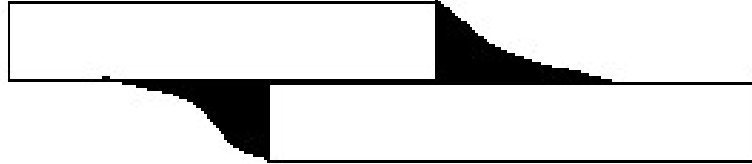


Soldadura de simple tope

Se suelda por un solo lado y si la soldadura no ha llegado hasta el talón es por falta de penetración o por falta de amperaje.

Soldadura de solapa doble

Se utiliza solo para costuras circunferenciales



En una union longitudinal, que es la más solicitada, jamas se usa la union solapada por más baja que sea la presión. Se deben usar las de tope doble o simple.

Si el espesor (t) es $<$ a $3/8''$ (15.8 mm), se utiliza tope simple.

Las uniones circunferenciales, para t pequeños y bajas P , si pueden venir con soldaduras solapadas.

Defectos de las soldaduras:

Con el gran avance de la tecnología se ha observado que se tienen varios procedimientos de soldadura, con esto no se descarta que cada uno de ellos produce un defecto de soldadura; entre las cuales se tienen:

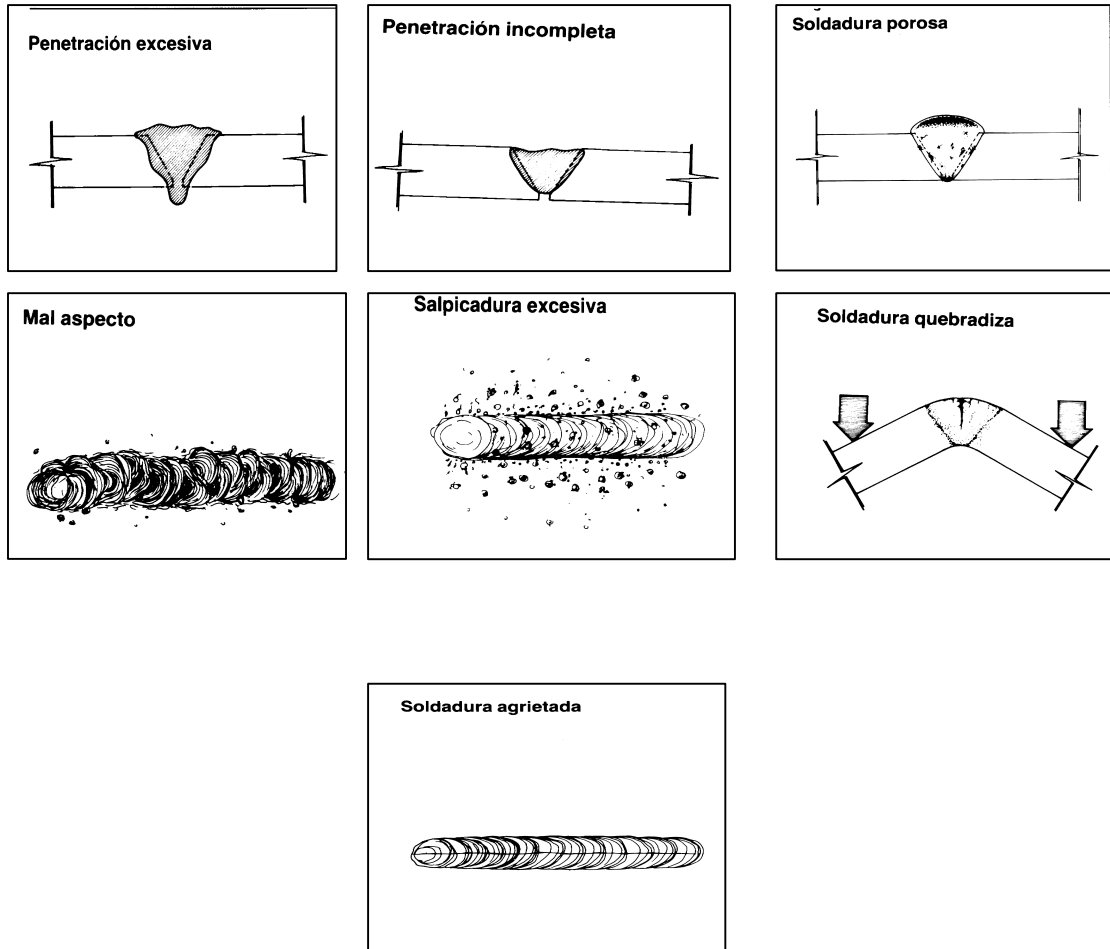
- Soldaduras quebradizas que al aplicarles esfuerzos aparecen repentinamente fisuras y repentinamente rompen.
- Soldaduras agrietadas en las cuales se puede observar la grieta en el cordón de soldadura, esto puede haber sido provocado por un choque térmico.
- Penetración excesiva, éste tipo de defectos puede darse cuando se le ha dado al electrodo un amperaje excesivo provocando que el material de aporte traspase las caras del material.
- Salpicadura excesiva, puede darse por una mala elección del electrodo con una mala elección, también, de la máquina. Se observa alrededor del cordón de soldadura salpicaduras del material de aporte.
- Penetración incompleta, puede producirse por una escasez de amperaje dónde el material de aporte no ha podido cubrir los chaflanes que se le han producido a la chapa.
- Soldadura porosa, se puede observar por medio de radiografía ó haciendo un corte del material soldado. El cordón de soldadura posee en su interior poros que provocan la disminución de la sección transversal; si los poros son



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

pequeños y escasos, no son de gran importancia en la resistencia a la fatiga del material, pero si los poros son excesivos y grandes producen gran debilitamiento en la pieza.

Las siguientes figuras esquematizan los defectos antes mencionados:



En otras ocasiones los defectos no son visibles a simple vista, por lo cual se realizan ensayos para determinar el estado de la soldadura.

Los ensayos que se realizan son del tipo no destructivos debido a la naturaleza de las piezas.

Los ensayos realizados son

- Ultra sónicos
- Magnaflux
- Radiografiado (ver en ASME "full radiographed and spot radiographed")
- Tintas penetrantes
- Ensayos por campo magnético
- Ensayos por radiación gama



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

En algunos casos se admiten incrementos de la tensión admisible del orden del 12 %, si las soldaduras principales del recipiente son radiografiadas y reparados los defectos encontrados.

Distensionado:

Las altas temperaturas empleadas en la soldadura por arco y gas alteran las estructuras cristalinas de las partes unidas, por lo que deben tomarse medidas apropiadas para conjurar esa tensión accidental. Es con este objeto que se recomienda el ANNEALING u otros tratamientos térmicos parecidos, para obtener en definitiva la estructura deseada.

En recipientes sometidos a presiones interiores y cuando el espesor de la chapa supera la pulgada ($t > 1''$) se hace un tratamiento de distensionado llamado recosido, que consiste en:

- Calentar la unión a 500- 600 °C
- Dejar enfriar lentamente, de esta manera se homogeniza el tamaño de grano.

De no ser así, quedara una zona propensa a la rotura por fatiga debido a la alta concentración de tensiones.

El distencionamiento se realiza en hornos apropiados para un aporte de calor al recipiente una vez metido en el mismo. En lo que respecta al tiempo de distencionamiento, es función del espesor a distensionar, la temperatura es función del material clasificado por un P number y un Group number dado en la Sección II, posición del recipiente dentro del horno, etc, se explica detalladamente en la subsecc. UHS56 del código ASME. UCS67 y 57

Test hidráulico

El test hidráulico consta en someter al recipiente a una presión igual a 1,5 veces la presión máxima de trabajo, el mismo test debe realizarse en un tiempo no menor de 30 minutos, según el código. De forma tal de asegurarse si existe alguna pérdida provocada por alguna fisura no detectada anteriormente por el proceso de control. Actualmente la presión de prueba se ha bajado debido al bajo factor aportado por el código, donde la presión a que se debe someter el recipiente debe ser de 1,25 veces la presión máxima de trabajo.

Pintado

El mismo puede realizarse ó no, según el código. En el caso de que si se pueda pintar será para protegerlo de la corrosión atmosférica sino se tomará como opción otro tipo de protección.

Algo de gran importancia es la placa de datos que aporta una gran información al usuario ó futuros reparadores del recipiente, como ser: Nombre del fabricante, Presión máxima permitida de trabajo, Temperatura de diseño, entre otros.

11 Cálculo de recipientes por el método de los elementos finitos:



Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

Como su nombre lo indica el proceso de calculo, consiste en dividir el cuerpo en infinitos elementos diferenciales y aplicar sobre cada uno de ello las leyes básicas de la física.

11.1 Casos en que es conveniente realizar un análisis por este metodo:

- Estructuras prototipicas y/o no consideradas en los códigos:
 - Geometría complicada.
 - Inexperiencia en el diseño de la estructura.
 - Estructuras comunes sometidas a condiciones de trabajo especiales.
- Detalles estructurales donde se prevea un estado tensional complejo.
- Casos en que las condiciones del código se satisfagan muy ajustadamente.
- Relación costo del análisis-beneficio conveniente.

11.2 Pasos a seguir en la aplicación del método:

1. Partición de la estructura (continua) en elementos finitos lineales, bidimensionales y/o sólidos de comportamiento conocido. Es la etapa del preprocesamiento, donde se prepara la malla.
2. Ensamble de los elementos a través de los valores de las variables nodales.
3. Aplicación de las acciones externas y obtención de la solución primaria. Esta primera solución nos mostrara cuanto se deforma la estructura.
4. Obtención de las soluciones derivadas(tensiones, reacciones).
5. Análisis de los resultados. Este es el proceso del análisis de los resultados obtenidos, el cual nos permitirá determinar si nuestro recipiente es o no apto para las condiciones de trabajo impuestas. En caso de no ser así, se redimensionará el recipiente.

Los pasos descriptos mas arriba seran exitosos, solamente en el caso de que el calculista conozca en profundidad el estado de carga al que va a estar sometida la estructura; en caso contrario el calculo obtenido se encontrara seguramente bastante alejado de la realidad, lo que derivara una vez fabricado el recipiente al colapso del mismo.

11.3 Conclusiones:

Este método de calculo es una herramienta muy útil para las empresas, ya que al estar basado en las leyes básicas de la física, arroja espesores mucho menores que los que se obtienen por la aplicación de los códigos (ay que recordar que las formulas de calculo propuestas por los códigos nacen experimentalmente, y siempre



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Módulo 9: Recipientes Sometidos a Presión

se encuentran del lado de la seguridad), lo que se traduce en costos menores debido al ahorro de material, volviéndose de esta manera la empresa mas competitiva frente aquellas que sigue utilizando el método convencional.

Las estructuras a las que se puede aplicar este método son de las mas diversas, habiendo llegado a usarlo en el calculo de la nariz de los transbordadores. En nuestra provincia existen desde hace algunos años profesionales, que aplican esta técnica de calculo, entre los pioneros se encuentra el grupo de calculo de IMPSA, que empezó a hacer uso de esta técnica ya en la década del 70', lo que le permitió ganar importantes licitaciones a nivel internales.