

72
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



CONSTRUCCION DE REACTORES INTERMITENTES,
CRITERIOS VARIOS A CONSIDERAR.

JORGE MALDONADO SALAZAR
INGENIERO QUIMICO

1980



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.

C O N T E N I D O

	PAGINA NO.
INTRODUCCION	7
CAPITULO 1	
MATERIALES DE CONSTRUCCION	16
CAPITULO 2	
CONDICIONES DE AGITACION	117
CAPITULO 3	
DISPOSITIVOS DE TRANSMISION DE CALOR	171
CAPITULO 4	
MANEJO DE PRODUCTOS	210
CAPITULO 5	
CASOS ESPECIALES	235
CONCLUSIONES	258
BIBLIOGRAFIA	263

INTRODUCCION

I N T R O D U C C I O N .

La mayor parte de los procesos usados para la fabricación de productos químicos ocurren en fase líquida, entre tales procesos podemos mencionar los siguientes: oxidación, sulfonación, hidrogenación, alquilación, nitración, halogenación, sulfatación, polimerización, policondensación y otros. El corazón de estos procesos es un reactor, cuya configuración física, deberá ser la más adecuada para efectuar en el la reacción química.

Podemos definir un reactor como una parte del equipo en el cual se efectúan una o más reacciones, ejemplos típicos de reactores son:

- 1) Tipo tanque o recipiente, (abiertos o cerrados)
- 2) Tipo tubular
- 3) Tipo intercambiador de calor
- 4) Tipo columna
- 5) Tipos especiales

El reactor tipo tanque, es uno de los más utilizados a pesar de que es necesario un volumen de reacción muy grande, en comparación con el nivel de conversión obtenido. La preferencia de este reactor se debe a la facilidad para su fabricación y a la flexibilidad en su uso. El calor de reacción se quita por medio de una chaqueta externa, usando serpentines en el interior, o bien con

un cambiador de calor externo a reflujo. Trabajan generalmente a una presión cercana a la atmosférica o a presiones mayores puede operar en forma adiabática o isotérmica. La agitación mejora la transmisión de calor, iguala las concentraciones y en un sistema de fases múltiples, ayuda al mezclado de las diferentes fases ya que se logran áreas interfaciales hasta de $1.32 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ($500 \text{ pie}^2/\text{pie}^3$).

Tomando en consideración que un reactor químico, debe permitir el tiempo de residencia para que ocurra la reacción, debe mezclar la o las fases y transmitir calor, los principales factores en que deberá basarse el diseño, serán los siguientes:

- 1) Condiciones de Operación
- 2) Capacidad de producción
- 3) Tipo de operación
- 4) Mecanismo y velocidad de reacción
- 5) Transferencia de masa
- 6) Agitación mecánica
- 7) Transmisión de calor
- 8) Control de la temperatura y la presión
- 9) Materiales de construcción
- 10) Costo

Condiciones de Operación. La temperatura y la presión son las variables que más afectan al diseño.

Los efectos más importantes de un aumento de temperatura son el aumento exponencial de la velocidad de reacción y el aumento casi lineal de la difusibilidad de los líquidos, lo que origina que aumente el coeficiente de transferencia de masa. Contrariamente, un aumento en la temperatura reduce la solubilidad de los gases y por tanto el gradiente de transferencia de masa, de ahí que existe una temperatura óptima para efectuar una reacción gas-líquido. Para reacciones en fase líquido-líquido o sólido-líquido, la solubilidad de la fase dispersa en el líquido, aumenta con la temperatura. En cualquiera de los casos, ya sea que el aumento en la temperatura, sea favorable o no, habrá que considerar los efectos secundarios.

La formación de subproductos, o la degradación de productos debido a una temperatura excesiva, podría ser no únicamente un factor que afecte el costo, sino también un factor que determine la calidad del producto, ya que el color y el olor, generalmente son muy sensibles a temperaturas excesivas.

En los sistemas donde es necesario mantener un cierto nivel de temperatura por medio del calor de reacción, cualquier cantidad de calor quitado o agregado, se deberá considerar en el balance de energía. Para estos sistemas existen en varios casos tres estados estacionarios, dos de los cuales son estables: Uno caracterizado por un valor bajo de temperatura y un grado de conver-

si3n despreciable, a menos que se agregue suficiente calor al sistema, el otro caracterizado por un valor alto de temperatura y -- pr3cticamente conversi3n completa, el cual puede ser disminuido - quitando calor al sistema. El estado inestable, entre estos dos, deber3 evitarse en el dise1o de un reactor.

El dise1o de una temperatura 3ptima es lo m3s adecuado para mejorar la producci3n del reactor (cantidad de producto por unidad de tiempo y volumen de reactor), y la conversi3n mediante la eliminaci3n de reacciones laterales indeseables.

Capacidad de Producci3n. Este factor, en conjunto con la velocidad de reacci3n y el tiempo de residencia o espacio velocidad, determina el tama1o del reactor y frecuentemente el tipo de reactor.

Tipo de Operaci3n. Puede ser intermitente o continua dependiendo de una serie de factores, los que determinan el desarrollo del proceso y los datos del dise1o.

Mecanismo y Velocidad de Reacci3n. En muchos casos el dise1o de un reactor, se inicia con un mecanismo de reacci3n conocido o supuesto de los cuales se obtiene una ecuaci3n de velocidad apropiada. Por ejemplo, el mecanismo para un proceso completo en el cual toman parte las especies A y B, puede visualizarse como - sigue:

- 1) "B", se transfiere a través de la interfase desde la fase dispersa a la zona de reacción.
- 2) "A", se transfiere desde el cuerpo principal del líquido a la zona de reacción.
- 3) En la zona de reacción A y B, reaccionan para producir el producto "P". Cualquier acción catalítica deberá -- ser homogénea.
- 4) El producto "P", se transfiere fuera de la zona de reacción.

Transferencia de Masa. Los factores que afectan a la velocidad de transferencia de masa son: el área entre interfases, el -- coeficiente de transferencia de masa, la solubilidad de la fase dispersa en el líquido y la fase dispersa.

Otros factores que afectan la transferencia de masa indirectamente son: la velocidad superficial de la fase dispersa, el diámetro de la partícula, y la velocidad final de la partícula.

Agitación Mecánica. Esta es necesaria para aumentar el área entre las fases, de acuerdo con las necesidades de transferencia de calor y masa. En algunas reacciones, cuando se necesita un área entre fases muy grande o cuando existan limitaciones en la velocidad superficial de un gas, debido a las condiciones del proceso, se debe usar agitación mecánica para aumentar el área entre fases y/o las características de transmisión de calor. Por ejemplo, en

un recipiente agitado mecánicamente, considerando una relación de 50 HP para un volumen de 3.78 m^3 , (1000 gal.) se pueden obtener áreas entre fases alrededor de 1.19 a $1.32 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (450 a $500 \text{ pie}^2/\text{pie}^3$).

Transmisión de Calor. La mayor parte de las reacciones son exotérmicas; en este caso, el calor es eliminado por medio de serpientes internos o chaquetas de enfriamiento o recirculando el producto a través de un intercambiador de calor externo. En términos generales se puede decir que los coeficientes de transferencia están dados por ecuaciones de uso común.

Control de la Temperatura y la Presión. Ya que de estas variables dependerá el proceso completo, es muy importante determinar los valores óptimos y mantenerlos bajo control, durante la operación del reactor.

Materiales de Construcción. Para la selección más adecuada, se deberán considerar una serie de factores de las cuales se menciona a continuación algunos de ellos:

- a) Corrosividad de reactivos y productos.
- b) Calidad y pureza deseada en los productos.
- c) Coeficiente de transmisión de calor del material.
- d) Manejo de reactivos durante la carga del reactor y manejo de productos durante la descarga.
- e) Adherencia y limpieza del reactor.

f) Posibilidad de uso del reactor para varios procesos.

Costo. Este factor, engloba todos los anteriormente mencionados y nos lleva a la decisión final, del tipo, tamaño, materiales y operación del reactor que deberá construirse.

El propósito de este trabajo, consistirá en establecer criterios generales, que sirvan para ayudar a la selección de los materiales de construcción más adecuados para un reactor intermitente, considerando los factores de diseño siguientes: Tipo de operación, Agitación mecánica, Transmisión de Calor y Materiales de construcción, anteriormente expuestos. Para lo cual, se tratará en cada uno de los capítulos lo siguiente:

Capítulo 1. En este capítulo se expondrán los materiales más usuales, su preparación, sus características químicas y físicas y algunas aplicaciones a procesos.

Capítulo 2. Aquí se tratará la teoría general de la agitación, los tipos de agitadores, su aplicación y los accesorios, tales como mamparas, anillos de aire y rompedores de espuma.

Capítulo 3. En este capítulo se mencionarán los tipos de dispositivos para transmitir calor, tales como los serpentines y las chaquetas las cuales serán tratadas más detalladamente en lo que respecta a su selección y aplicación.

Capítulo 4. Aquí se tratarán aspectos prácticos del cuidado del reactor durante la carga y dispositivos que ayuden a disminuir el tiempo de descarga de los productos.

Capítulo 5. Finalmente, en este capítulo se tratarán casos especiales tales como la selección de la tersura de la superficie interna (acabado) de un reactor, así como los métodos para lograrlo; la conveniencia de utilizar un tipo de material comparándolo con uno o dos más, etc.

C A P I T U L O 1

MATERIALES DE CONSTRUCCION

C A P I T U L O 1 .

1. MATERIALES DE CONSTRUCCION.

Existe una gran variedad de materiales que pueden usarse en la -- construcción de reactores intermitentes, de esta amplia gama es -- posible mencionar como más usuales los siguientes:

- 1.1 Materiales aleados: Hastelloy B, Hastelloy C, Hastelloy F, Monel, Inconel, Acero inoxidable 20 y Aceros inoxidables de las series 304 y 316.
- 1.2 Materiales formados por un metal soporte con características mecánicas, para resistir grandes esfuerzos y una chapa de metal resistente a la corrosión, a esta unión superpuesta de metales, se le conoce más comúnmente como "Clad" o "Clad steel".
- 1.3 Un metal al que se le deposita un revestimiento, tal como el vidrio; a esta combinación se le denomina acero - vidriado o Glasteel*.

Con respecto a los metales aleados, se tratarán con mayor amplitud los aceros inoxidables de las series 304 y 316, ya que son -- los que tienen mayor aplicación en la industria y las demás aleaciones serán tratadas en forma general.

(*) Marca Registrada

1.1 MATERIALES ALEADOS.

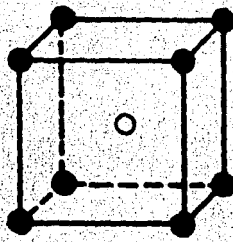
Para poder entender que es un acero inoxidable y porque es resistente a la corrosión, será necesario introducirse muy brevemente a aspectos de Metalurgia.

1.1.1. Estructura Atómica del Hierro.

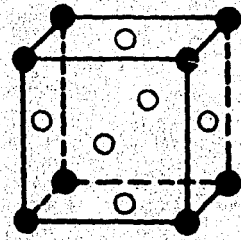
El hierro puro a temperatura ambiente es muy dúctil y de una dureza semejante a la del cobre, además de ser el más magnético de los metales.

Como algunos otros metales, el hierro tiene una estructura cristalina. Los cuerpos cristalinos pueden considerarse que están formados de átomos localizados en una estructura en el espacio (Fig. 1.1). El componente unitario más pequeño de esta estructura es conocido como celda unitaria y está caracterizada por su estructura geométrica regular. Un cristal está compuesto de estas celdas unitarias apiladas unas a otras como una pared de ladrillos, reproduciendo en sus esquinas los puntos de la estructura. Cristales diferentes tienen diferente tipo de estructura en el espacio. Analizando el hierro por medio de la difracción de Rayos X, durante la solidificación de una porción fundida, se observa que cristaliza en una estructura espacial cúbica.

El hierro puede existir en cualquiera de sus dos formas cúbicas espaciales: centrado con respecto al cuerpo (BCC) o centrado con respecto a sus caras (FCC) (Fig. 1.2). Estas estructuras se dife



BCC. Centrado con respecto al cuerpo



FCC. Centrado con respecto a sus caras

Fig. 1.1 - DIAGRAMAS DE ESTRUCTURA ESPACIAL DE CRISTALES DE HIERRO MOSTRANDO LA POSICION DE LOS ATOMOS.

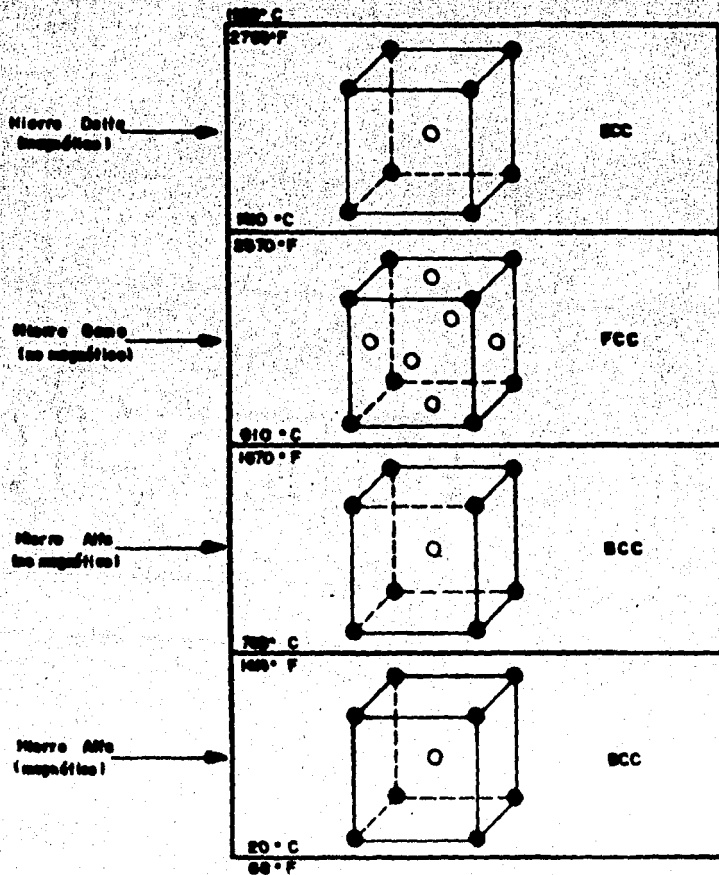


Fig. 1.2 - TRANSFORMACIONES ALDROPICAS DE HIERRO PURO.

rencian por el modo en que están arreglados los átomos. La forma cúbica BCC, tiene un átomo en cada esquina y un átomo en el centro de la celda es decir, el cubo. La forma cúbica "FCC", tiene un átomo en cada esquina y uno en el centro de cada una de sus seis caras.

A temperatura ambiente, el hierro está formado de celdas de tipo BCC, en esta condición, se le conoce como "hierro alfa", o "ferrita alfa", y es blando, dúctil y magnético. Cuando se le calienta cercanamente a 768 °C (1415 °F), pierde sus características de magnetización, pero conserva su estructura cristalina "BCC". Esta estructura cambia a la estructura cúbica "FCC" a una temperatura cercana a 916 °C (1670 °F) a la cual, el "hierro alfa" se transforma a "hierro gama", perdiendo sus características de magnetización. Si se eleva más la temperatura ocurre otro cambio a 1410 °C (2570 °F), formándose el "hierro delta". Este último es idéntico en estructura cristalina al "hierro alfa" es decir "BCC" y es estable hasta el punto de fusión, ya que no se conocen cambios de fases en la forma líquida (1538 °C), (2800 °F). Enfriando lentamente desde el estado líquido, los cambios de estructura mencionados anteriormente, se repiten pero a la inversa.

Las modificaciones de la estructura atómica que ocurren en el Hierro durante el calentamiento y enfriamiento, desde y hasta el punto de fusión se les llama cambios alotrópicos. Las temperaturas a las cuales ocurren estos cambios, se conocen como puntos de

transformación o puntos críticos. Los rangos de temperatura, desde un punto de transformación a otro, se denominan rangos críticos.

1.1.2 Metalurgia del Acero.

Lo referido en los párrafos anteriores corresponde al hierro puro, el cual es difícil de obtener y por tanto es muy caro, por otra parte no tiene propiedades adecuadas para la construcción. Sin embargo, el hierro aleado con el carbono y otros elementos tales como manganeso, silicio, fósforo y azufre, se convierte en acero el cual es un material adecuado y económico, para fines de construcción. Ya que el carbono combinado con el hierro es muy efectivo al producir características deseables, se ha puesto especial atención en su control en la producción de acero. Algunos efectos del carbono en el hierro, se ilustran gráficamente en el diagrama de equilibrio de la Fig. 1.3.

1.1.2.1 Cambio de Fases en el Acero.

El diagrama de la Fig. 1.3, indica el cambio de fases en mezclas de hierro y carbono a diferentes temperaturas. No se ha considerado el tiempo que toma la transformación de la fase para llegar al punto de equilibrio, después del cambio de temperatura. La adición de carbono hasta un límite de 4.3 % al hierro, baja su punto de fusión. A temperaturas elevadas coexisten las fases sólido y líquido como podría ser esperado. El rango del "hierro delta" se restringe y finalmente se elimina como una fase simple cuando

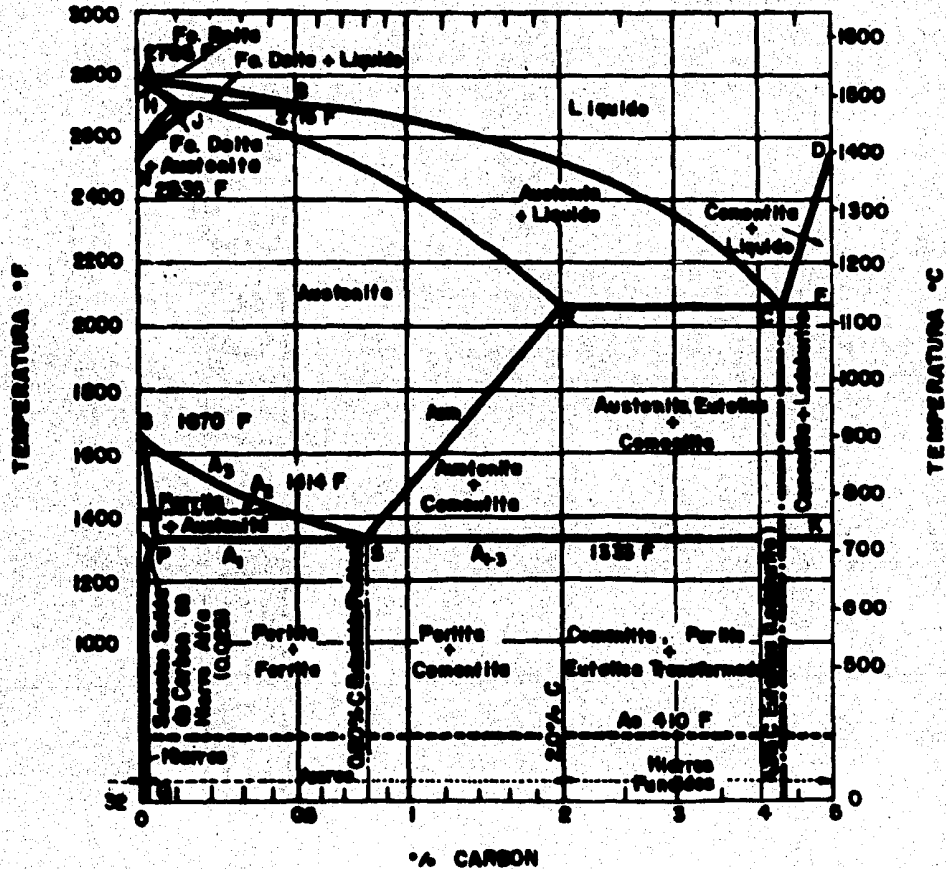


Fig: 1.5 - DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE FASES , CARBONO-NIERRO

el contenido de carbono es de 0.1 %. La presencia de "hierro delta", persiste hasta con valores de 0.5 % de carbono, pero en combinación con otras fases. Abajo de la región "hierro delta", el "hierro gama" absorbe carbono hasta su composición límite a lo largo de la línea S-E, que es el límite de solubilidad (solubilidad sólido-solución). Cuando el hierro gama tiene en solución, cantidades apreciables de un segundo constituyente, tal como el carbono, es conocido con el nombre de Austenita. La temperatura a la que está presente la Austenita, por sí misma disminuye, conforme el carbono aumenta, a lo largo de la línea G-S, hasta el punto denominado "punto eutectoide" (0.80 % de carbono y 723 °C (1333 °F)). Después la temperatura aumenta, a lo largo de S-E, conforme aumenta el carbono, debido a que la Austenita es incapaz de absorber carbono adicional, excepto a temperaturas mayores.

1.1.2.2 Puntos Críticos del Acero.

En la Fig. 1.3, los puntos críticos del acero, se localizan a lo largo de A₁ que corresponde a la línea P-S, a 723 °C (1333 °F), y a lo largo de A₂ que corresponde a la línea G-S a temperaturas que varían con la composición. Conforme ocurre un calentamiento o un enfriamiento, estos puntos críticos se subdividen en Ac₁ y Ac₃, y en Ar₁ y Ar₃, respectivamente. Estos estados no se encuentran localizados en el diagrama de equilibrio ya que tienen relación con el tiempo, que es otra variable que también afecta. A temperaturas inferiores a 723 °C (1333 °F), el carbono es relati-

vamente insoluble en la ferrita, que es el nombre común para el "hierro alfa", cuando se recupera impuro, por la adición de otros elementos. La solubilidad relativa de carbono en la ferrita y la austenita, puede ser analizada comparando las líneas Q-P y S-E. Esta diferencia en solubilidad del carbono entre las dos zonas, es prácticamente el problema más complejo de todos los tratamientos térmicos del acero.

Los datos graficados en la Fig. 1.3, muestran los puntos finales de las posibles transformaciones que pueden obtenerse pero que nunca se alcanzan, en un período de tiempo infinito. Sin embargo, los procesos en la fabricación del acero pueden ocurrir en un período de un segundo (soldado por puntos) a varios días (tratamiento térmico de un recipiente). Para evaluar que tanto afectan estos procesos sobre una transformación interna del acero, es necesario conocer el efecto del tiempo. La Fig. 1.4, muestra una transformación isotérmica típica.

1.1.2.3 Transformación del Acero.

El diagrama de la Fig. 1.4, el cual cubre una composición específica del acero, indica el tiempo necesario para el progreso de la transformación desde la Austenita a otros constituyentes a varios niveles de temperatura. Como un ejemplo tenemos lo siguiente: un acero hipoeutectoide (un acero que contiene menos de 0.80% de carbono) se calienta a una temperatura cercana a los 871 °C (1600 °F), a la cual se transforma completamente en austenítico.

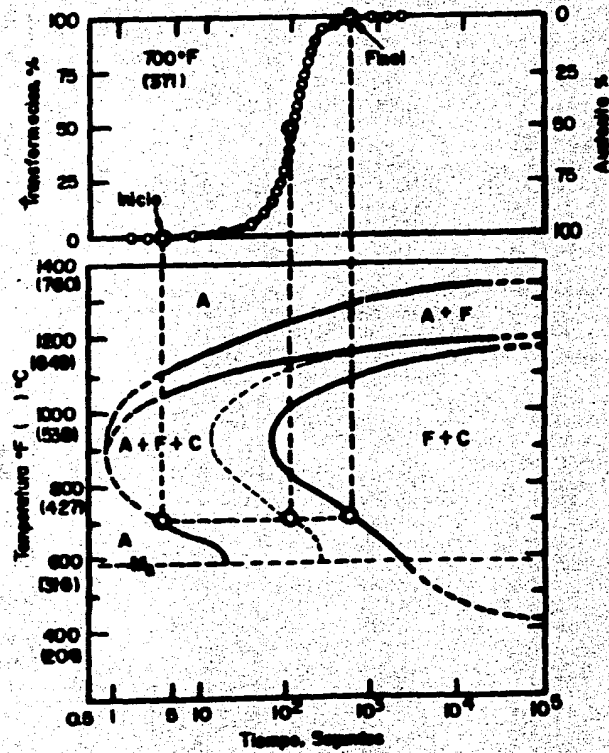


Fig 1.4 - TRANSFORMACION ISOTERMICA TIPICA . TIEMPO NECESARIO EN UN ACERO A 371° C (700° F).

Inmediatamente se cambia a un horno o baño que está a 371 °C (700 °F). Observando la Fig. 1.3 es evidente que a esta temperatura - debe de existir la ferrita y carburos, pero la Fig. 1.4, nos muestra que tanto tiempo toma para que ocurra esta reacción. Proyectando los intervalos de tiempo durante la transformación como se indica, desde la parte inferior a la parte superior de la Fig. -- 1.4, se notará que la Austenita continúa existiendo, durante tres segundos, antes de que ocurra cualquier cambio. Después, se inicia la transformación y cuando han pasado 100 segundos alcanza el 50 %. A los 700 segundos, la Austenita es totalmente reemplazada por un conglomerado de carburos finos y Ferrita.

Los símbolos usados en la Fig. 1.4, son A: Austenita, F: Ferrita y C: Carburos. A temperaturas menores a 316 °C (600 °F) (correspondiente a la línea Ms) la Austenita se transforma a Martensita, una forma especial de la Ferrita, la cual es el constituyente de mayor dureza de un acero tratado térmicamente. La protuberancia de la curva a la izquierda en la Fig. 1.4 a la temperatura de 482 °C (900 °F) es de gran importancia. La transformación a esta temperatura ocurre muy rápido. Si este acero fuera sometido al templeado para obtener la formación de Martesita (la máxima dureza), debe pasar a través del rango de los 482 °C (900 °F) muy rápidamente, para preveer la transformación de una parte de Austenita - a Perlita (F+C), la cual es muy suave.

1.1.3 Elementos Aleados.

El efecto de los elementos aleados en el acero, se puede determinar con los cambios resultantes en el diagrama de equilibrio, - - cuando se adicionan estos al hierro. El cromo, por ejemplo, inicialmente disminuye el punto de fusión del hierro y después lo eleva al aumentar la proporción del cromo y disminuir el contenido del hierro. Al adicionar cromo, la región de la Austenita (G - S E - J - N, Fig. 1.3), disminuye y desaparece completamente cuando la adición de cromo alcanza un valor de 13 %. La adición de carbono (con lo cual se tiene un sistema de tres componentes), modifica estos valores considerablemente. Cuando se tiene cerca del 45 % de cromo y a una temperatura inferior a 816 °C (1500 °F), se forma un compuesto puro no-magnético, conocido como "Fase sigma", que convierte a esta aleación en una sustancia frágil. Cantidades pequeñas de "fase sigma", se pueden formar en las aleaciones ferríticas que tienen un contenido de 15 % de cromo.

El níquel actúa aumentando la zona de la Austenita; así que las aleaciones de hierro y níquel con un contenido de más de 25 % para este último son prácticamente austeníticas a todas las temperaturas. Tomando como base lo anterior, la acción de la adición de otros elementos se pueden clasificar de acuerdo a la acción que produzcan es decir (a) como el cromo: formadores de Ferrita; (b) como el níquel: formadores de Austenita o, (c) como formadores de compuestos.

En los párrafos anteriores se han considerado únicamente, mezclas de hierro y carbono aleados con algún otro elemento. En la práctica, sin embargo, los aceros contienen hierro, que se han aleado con muchos otros elementos a la vez. Generalmente, uno, dos o más elementos se agregan en cantidades apreciables, mientras que los otros están presentes en cantidades pequeñas, casi residuales.

Cuando los elementos aleados actúan en conjunto, algunas veces, se tiene el punto de partida del comportamiento de la aleación, que se podría predecir de un diagrama similar al de la Fig. 1.4. Por ejemplo, una aleación que contiene 18% de cromo, 10% de níquel y el resto de hierro con residuos de otros elementos, puede ser un acero austenítico a la temperatura ambiente o a una temperatura menor que esta. Se debe considerar también que durante un tratamiento térmico práctico, el comportamiento no podrá ser en realidad predicho, usando un diagrama de equilibrio, debido a la diferencia de velocidades durante el calentamiento y el enfriamiento.

1.1.3.1 Efecto Específico de los Elementos Aleados.

Las aleaciones son unos de los principales materiales de construcción desde el punto de vista de ingeniería, debido a su amplio rango en propiedades, lo que permite su uso casi en cualquier aplicación específica. Estas propiedades se ven afectadas en forma directa, no únicamente por las características y la cantidad de elementos que solos o en combinación entran en la composición

del acero, sino también por su comportamiento, según la temperatura, métodos de fabricación y uso a que serán sometidos. Por ejemplo, el cromo aumenta la resistencia a la corrosión y a la formación de escamas; el molibdeno aumenta la resistencia al flujo a temperaturas elevadas y el níquel, (en cantidades adecuadas), transforma el acero a la forma austenítica. Los efectos específicos de los elementos más importantes en el acero, se describen a continuación.

1.1.3.1.1 Carbono.

El carbono no es generalmente considerado como elemento aleado ya que el acero no sería acero sin el carbono. Sin embargo, en un tema en el que se trata el efecto de los elementos aleados, es apropiado considerar cuales son los efectos del carbono en las propiedades del acero. En términos generales un aumento en el contenido de carbono, aumenta la resistencia mecánica del acero y su dureza, en cambio, disminuye su ductibilidad y flexibilidad. Las curvas de la Fig. 1.5, indican los efectos generales del carbono en las propiedades mecánicas del acerorolado en caliente. El carbono también aumenta la tendencia al endurecimiento al aire y el endurecimiento de las soldaduras, especialmente en presencia de cromo. En aceros con un contenido bajo de elementos aleados, para aplicaciones a altas temperaturas, el contenido de carbono se debe controlar en valores alrededor de un 0.15% para asegurar una ductibilidad óptima, que permita soldar, expandir y doblar las --

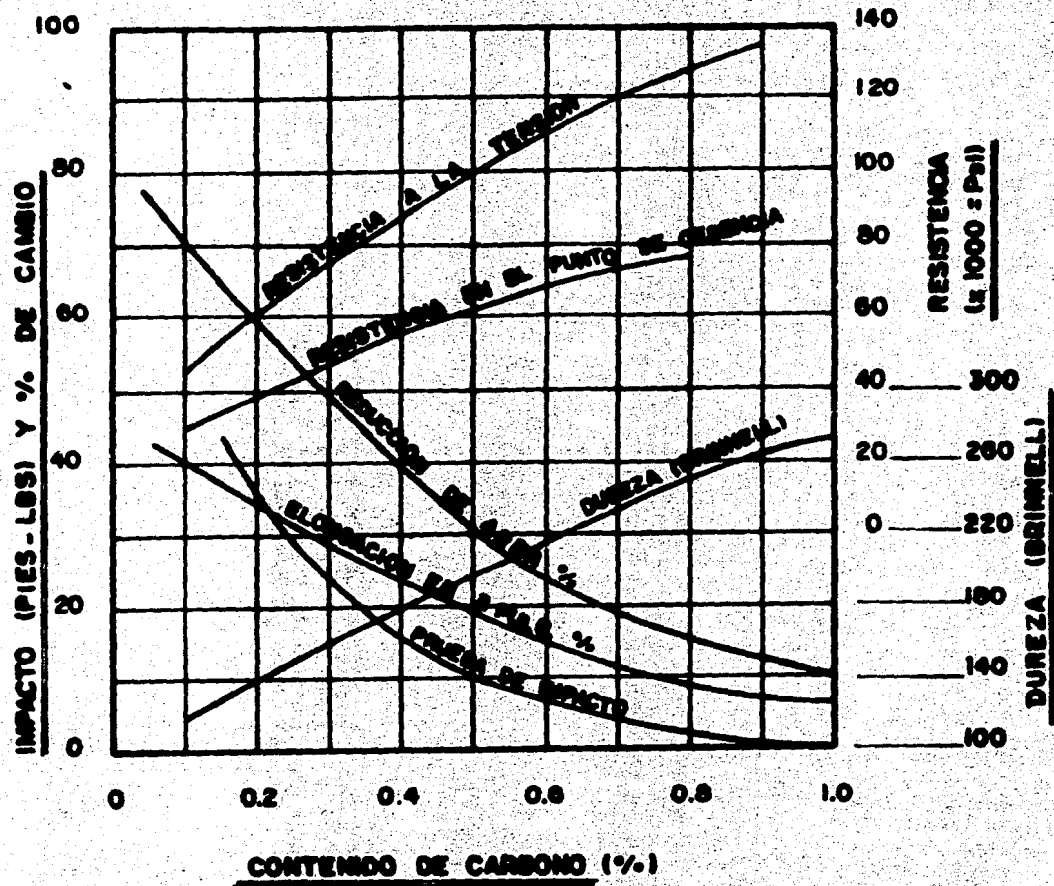


FIG. 1.5 - EFECTO DEL CARBONO EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO ROLADO EN CALIENTE.

piezas. Para disminuir la corrosión intergranular causada por la precipitación de carburos, el contenido de carbonos para las aleaciones austeníticas (tipo 18-8) se ha limitado en las especificaciones comerciales a un máximo de 0.08% y en algunos casos menor, por ejemplo 0.03 en grados extremadamente bajos en carbono, cuando va a ser usado en ciertas aplicaciones en donde se desea una gran resistencia a la corrosión.

No se puede establecer una generalización en relación con el efecto del carbono en la duración de las propiedades de las aleaciones, sometidas a alta temperatura. En el acero que contiene únicamente carbono y que ha sido normalizado, la resistencia al flujo, a temperaturas menores que 441 °C (825 °F) parece aumentar con el contenido de carbono, hasta alcanzar un valor de 0.4%. A temperaturas mayores, hay una variación muy pequeña en las propiedades de flujo con el aumento en el contenido de carbono.

Un aumento en el contenido de carbono disminuye las conductividades, térmica y eléctrica del acero y aumenta su dureza en el templado.

1.1.3.1.2 Fósforo.

Un contenido elevado de este elemento, produce efectos no deseados en las propiedades del acero al carbono. Estas se ponen de manifiesto con la disminución de la ductibilidad y la resistencia al choque al ser tratado en frío. Este efecto de fragilidad, ge-

neralmente se le denomina "quebradizo al frío" y resulta de la --
tendencia del fósforo a aumentar el tamaño del grano, causando --
una disgregación de las partículas. El efecto dañino del fósforo
aumenta, conforme aumenta el contenido de carbono.

El fósforo mejora las características físicas del acero haciendo
más fácil el uso de herramientas de corte durante la operación de
maquinado. Este va relacionado con el efecto de fragilización, -
ya que es lo que causa el fácil rompimiento de rebabas durante el
maquinado. En aceros producidos en hornos abiertos, el contenido
de fósforo, se limita a 0.04%. En aleaciones de acero cuyo uso -
será para calderas el contenido permitido de fósforo es aún menor,
pues su presencia es inconveniente en el proceso de soldado. El
fósforo se usa como un elemento aleado (con un contenido hasta de
0.15%) en aceros de alta resistencia, en los cuales las necesida-
des más importantes son: aumentar el esfuerzo de cedencia y la --
resistencia a la corrosión atmosférica. Sin embargo con ciertos
ácidos el fósforo puede aumentar la velocidad de la corrosión.

1.1.3.1.3 Silicio.

El silicio contribuye grandemente a la producción de buen acero,
debido a sus propiedades desoxidantes y desgasificantes. Cuando
se agrega en cantidades hasta de un 2.5% el esfuerzo máximo del -
acero se aumenta, sin perder su ductibilidad. Un contenido de si-
licio mayor que 2.5% causa fragilización y con cantidades mayores
a 5% el acero se convierte en no maleable.

La resistencia del acero a la oxidación y la estabilidad de su superficie, aumentan con la adición del silicio. Estos efectos que son deseables en el acero, compensan parcialmente la tendencia -- del silicio a bajar las propiedades de flujo del acero. El silicio aumenta la resistencia eléctrica y disminuye la pérdida de -- histéresis del acero. De ahí que el acero con silicio es ampliamente usado en aparatos eléctricos.

1.1.3.1.4. Manganeso.

El manganeso es un excelente desoxidante, un neutralizador del azufre y mejora las propiedades mecánicas del acero, especialmente la relación del esfuerzo de cedencia al esfuerzo a tensión, a temperaturas normales. Como elemento aleado, el manganeso sirve como un medio económico de prevención para evitar que este sea quebradizo cuando se calienta al rojo. También mejora las propiedades del acero para ser rolando, para ser templado y su resistencia al desgaste. Sin embargo, este mismo aumenta la sensibilidad de las soldaduras al agrietamiento particularmente con aceros que -- tienen alto contenido de carbono.

A diferencia del silicio, el manganeso es benéfico a las propiedades de flujo del acero. Parece no tener ninguna influencia específica, en su resistencia a la corrosión y a la oxidación.

1.1.3.1.5 Cromo.

Este elemento constituye la esencia de los aceros inoxidables, au

menta el esfuerzo de cedencia y el esfuerzo a la ruptura, la dureza y la tenacidad del acero a temperatura ambiente y algunas veces contribuye a su resistencia a temperaturas elevadas. Otros de los efectos prominentes que resultan de la adición de cromo al acero son: la resistencia a la abrasión y el desgaste y mejora sus características de facilidad de corte. Cuando el contenido de cromo es de 12% se observa una mejora permanente a la resistencia a la corrosión del medio ambiente y el ataque químico por muchos otros reactivos. Sin embargo las propiedades químicas del acero, se ven afectadas por el contenido de carbón y en general conforme el contenido de cromo sea mayor y el contenido de carbón, sea menor, mejor será la resistencia de la aleación a ciertos tipos de corrosión. El cromo es un medio para aumentar la resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas. La adición suficiente de cromo, evita la formación de grafito durante el sometimiento del material a largos períodos, a altas temperaturas, por lo tanto, este elemento es de suma importancia en aceros que serán utilizados para este tipo de servicios.

La adición de cromo en cantidades de 1% o más, puede causar el endurecimiento del acero al aire. Hasta valores de 13.5% de cromo, el endurecimiento al aire, es función directa del contenido de cromo y carbono. Aceros con contenido bajo de carbono y con valores de cromo de más de 12% tienden a no endurecerse pero su resistencia al impacto disminuye, y su ductibilidad es pobre. El

cromo disminuye las conductividades térmica y eléctrica.

1.1.3.1.6 Niquel.

La principal característica que da este elemento al acero, es la tenacidad, especialmente cuando se agrega en cantidades de más de 1%, contenidos de más de 5% mejoran la resistencia a la corrosión en ciertos medios.

Este metal se disuelve en la matriz del hierro, en todas las proporciones, por lo cual, eleva la resistencia a la rotura del acero, sin disminuir su ductibilidad. El níquel es particularmente efectivo para aumentar las propiedades del acero al impacto, especialmente a bajas temperaturas. Es un elemento útil en la carburización de los aceros y mejora las propiedades del núcleo de los materiales usados en los rodamientos o baleros.

Probablemente el uso más importante del níquel como un elemento aleado en una proporción de 8% o más, es su combinación con el cromo. Con la adición del níquel, las aleaciones de acero con alto contenido de cromo se vuelven austeníticas. Las diferentes combinaciones de Cromo-Níquel, producen aleaciones del tipo 18-8 con propiedades que no se pueden obtener con cantidades equivalentes, de cualquiera de los elementos solos. Tales aceros son resistentes, no solo a la corrosión atmosférica y otros agentes, sino que también resisten la oxidación a altas temperaturas. Además ofrecen una gran y marcada resistencia al flujo. Sin embargo,

deberá recordarse que la resistencia a la oxidación y corrosión son controladas principalmente por el contenido de cromo más que por el contenido de níquel.

Finalmente el níquel, reduce el coeficiente de expansión térmica y la conductividad eléctrica del acero.

1.1.3.1.7 Molibdeno.

Con la adición de molibdeno al acero, se aumenta: su resistencia mecánica, su límite elástico, su resistencia al desgaste, sus cualidades al choque y sus cualidades para ser templado. Contribuye también a aumentar la resistencia del acero a altas temperaturas, y permite que sea calentado a temperaturas elevadas, sin disminución prácticamente de su dureza.

También aumenta la resistencia a la suavización durante el templeado y restringe el crecimiento del grano. Por último, este elemento logra que los aceros al cromo, sean menos susceptibles a ser quebradizos durante el templeado.

Un uso muy importante del molibdeno, es el mejoramiento de la resistencia a la corrosión en los aceros inoxidables del tipo 18-8. Aumenta la resistencia natural a la corrosión de estos aceros, en medios reductores y aumenta su pasividad, bajo condiciones oxidantes regulares. La experiencia indica que bajo ciertas condiciones, el molibdeno efectivamente reduce la susceptibilidad de los aceros inoxidable a las picaduras.

1.1.3.1.8 Tungsteno o Wolframio.

El tungsteno es similar en comportamiento al molibdeno, sin embargo, de los dos el molibdeno parece ser más efectivo para aumentar la resistencia a la corrosión en relación con un costo dado. El tungsteno es un elemento importante para herramientas cortantes a alta velocidad y herramientas de carburo cementado.

1.1.3.1.9 Vanadio.

El vanadio es en cierto grado un agente desgasificante y desoxidante, pero se usa con poca frecuencia para este fin, debido a su alto costo. Se usa principalmente como un elemento aleado en el acero, para aumentar la resistencia, la tenacidad y la dureza. Es esencialmente un elemento formador de carburos que estabiliza la estructura, especialmente a temperaturas elevadas. El vanadio disminuye la tendencia al crecimiento del grano, permitido de este modo temperaturas mucho más altas durante un tratamiento térmico. También intensifica las propiedades individuales de otros elementos en las aleaciones del acero. Pequeñas adiciones de vanadio, (0.1 a 0.5%), acompañado por un tratamiento térmico apropiado, producen en los aceros que contienen de 0.5 a 1.0% de molibdeno, a temperaturas elevadas una marcada mejora en las propiedades de flujo. El vanadio también mejora las propiedades de corte de las herramientas de acero.

1.1.3.1.10 Aluminio.

El aluminio tiene muy poca importancia como constituyente de las

aleaciones de acero de baja calidad. Es un desoxidante eficiente y casi universalmente usado en la producción de acero muerto. -- Cuando se agrega al acero en cantidades apreciables, forma escamas de óxido refractarias fuertemente adheridas, aumentando de este modo la resistencia al desescamado. Sin embargo es difícil agregar cantidades apreciables de este elemento al acero sin producir efectos indeseables. Se considera que una cantidad excesiva del aluminio, tiene un efecto de disminución en las propiedades -- de fluencia, especialmente en un acero al carbono que no tenga -- ningún otro elemento aleado. Esto se atribuye al efecto de refinamiento del grano y a lo que es aún más serio a la aceleración de la esferoidización y grafitación de la fase carburo. En las cantidades en que comunmente se agrega, el aluminio no aumenta la resistencia a los tipos comunes de corrosión. Debido a su avidez por el oxígeno, los aceros con alto contenido de aluminio, normalmente tienen varias inclusiones de óxido de aluminio. Estas inclusiones tienden a producir corrosión por picaduras bajo ciertas condiciones favorables a la corrosión, sin embargo este metal, aumenta la resistencia a la oxidación cuando se aplica al acero como una capa protectora, en el proceso de calorización.

1.1.3.1.11 Titanio y Columbio.

Estos elementos son potentes formadores de carburos. El titanio es también un buen desoxidante y desnitrificador. Ambos son más efectivos en las aleaciones austeníticas cromo-niquel (tipo 18-8)

en las cuales, reaccionan más rápidamente con el carbono que el cromo, lo cual permite que permanezca sólido en solución y con la concentración conveniente para obtener la inoxidable (resistencia a la corrosión) del acero. El titanio y el columbio (o columbio + titanio) se utilizan algunas veces para reducir la tendencia de endurecimiento al aire y para aumentar la resistencia a la oxidación en aceros con un contenido hasta de 14% de cromo. Estos elementos parece que producen un efecto benéfico en las propiedades de los aceros inoxidable cromo-niquel, sometidos a altas temperaturas durante un largo tiempo, ya que ambos, el columbio y el titanio se han usado en algunas de las "super aleaciones" para mejorar sus propiedades a altas temperaturas.

1.1.3.1.12 Cobre.

La adición de este elemento en pequeñas cantidades, mejora la resistencia del acero a la corrosión atmosférica y disminuye la velocidad de ataque de los ácidos reductores. El cobre no es resistente a los compuestos del azufre a temperaturas elevadas, por lo cual, no es usado generalmente en las aleaciones de baja calidad, las cuales serán aplicadas para servicios a temperaturas elevadas, en los que el azufre es el componente mayor, como ocurre con los gases de combustión.

El cobre se agrega hasta un máximo de 1% en aleaciones de baja calidad, que serán usadas para fabricar elementos estructurales, --

con el fin de mejorar su esfuerzo de trabajo y su resistencia a la corrosión atmosférica. Se usa en algunas aleaciones de buena calidad para aumentar la resistencia a la corrosión producida por el ácido sulfúrico. Finalmente, el cobre en cantidades entre 2 y 4%, se agrega también a ciertas aleaciones complejas, austeníticas, en conjunto con el molibdeno, el titanio y el columbio para producir dureza por precipitación, de ahí que mejore las propiedades de ruptura del acero por fluencia.

1.1.4 Aceros Inoxidables.

Los aceros inoxidables son aleaciones que tienen como base el acero con un contenido de más de 12% de cromo que es necesario para producir pasividad, pero no mayor que 30% del mismo elemento. -- Las aleaciones con más de 30% de cromo se usan para temperaturas elevadas. Aunque la resistencia a la corrosión en soluciones acuosas de las aleaciones con un contenido de 4 a 6% de cromo, no es muy buena, en seco y a temperaturas elevadas se comporta como si se tratara de aceros inoxidables.

1.1.4.1 Clasificación.

La tabla No. 1.1, da los rangos de composición basados en análisis de colada de los aceros inoxidables clasificados de acuerdo con los estándares de la A.I.S.I. Los primeros dígitos definen las series, los siguientes dígitos, identifican el acero y la letra usada ocasionalmente representa una modificación de alguno de

TABLE 1.4 - COMPOSICION DE GRADOS ESTANDARES DE ACERO FORJADO
Y ACEROS RESISTENTES AL CALOR (AISI, 1959)

AISI TIPO	COMPOSICION NOMINAL %				Ni		Otro (a)
	C	Mn Máx	Si Máx	Cr			
ACEROS AUSTENITICOS							
201	0.15 Máx	7.50(b)	1.00	16.00 a 18.00	3.50 a 5.50		0.25 Máx N
202	0.15 Máx	10.00(c)	1.00	17.00 a 19.00	4.00 a 6.00		0.25 Máx N
301	0.15 Máx	2.00	1.00	16.00 a 18.00	6.00 a 8.00		.. .
302	0.15 Máx	2.00	1.00	17.00 a 19.00	8.00 a 10.00		.. .
302B	0.15 Máx	2.00	3.00(d)	17.00 a 19.00	8.00 a 10.00		.. .
303	0.15 Máx	2.00	1.00	17.00 a 19.00	8.00 a 10.00		0.15 Min S
303(Se)	0.15 Máx	2.00	1.00	17.00 a 19.00	8.00 a 10.00		0.15 Min Se
304	0.08 Máx	2.00	1.00	18.00 a 20.00	8.00 a 12.00		.. .
304L	0.03 Máx	2.00	1.00	18.00 a 20.00	8.00 a 12.00		.. .
305	0.12 Máx	2.00	1.00	17.00 a 19.00	10.00 a 13.00		.. .
308	0.08 Máx	2.00	1.00	19.00 a 21.00	10.00 a 12.00		.. .
309	0.20 Máx	2.00	1.00	22.00 a 24.00	12.00 a 15.00		.. .
309S	0.08 Máx	2.00	1.00	22.00 a 24.00	12.00 a 15.00		.. .
310	0.25 Máx	2.00	1.50	24.00 a 26.00	19.00 a 22.00		.. .
310S	0.08 Máx	2.00	1.50	24.00 a 26.00	19.00 a 22.00		.. .
314	0.25 Máx	2.00	3.00(e)	23.00 a 26.00	19.00 a 22.00		.. .
316	0.08 Máx	2.00	1.00	16.00 a 18.00	10.00 a 14.00		2.00 a 3.00 No
316L	0.03 Máx	2.00	1.00	16.00 a 18.00	10.00 a 14.00		2.00 a 3.00 No
317	0.08 Máx	2.00	1.00	18.00 a 20.00	11.00 a 15.00		3.00 a 4.00 No
321	0.08 Máx	2.00	1.00	17.00 a 19.00	9.00 a 12.00		5 x C Min Ti
347	0.08 Máx	2.00	1.00	17.00 a 19.00	9.00 a 13.00		10 x C Min Cb-Ta
348	0.08 Máx	2.00	1.00	17.00 a 19.00	9.00 a 13.00		10 x C Min Cb-Ta 0.10 Máx Ta
ACEROS MARTENSITICOS							
403	0.15 Máx	1.00	0.50	11.50 a 13.00
410	0.15 Máx	1.00	1.00	11.50 a 13.50
414	0.15 Máx	1.00	1.00	11.50 a 13.50	1.25 a 2.50		.. .
416	0.15 Máx	1.25	1.00	12.00 a 14.00	.. .		0.15 Min S
416(Se)	0.15 Máx	1.25	1.00	12.00 a 14.00	.. .		0.15 Min Se
420	0.15 Min	1.00	1.00	12.00 a 14.00
431	0.20 Máx	1.00	1.00	15.00 a 17.00	1.25 a 2.50		.. .
440A	0.60 a 0.75	1.00	1.00	16.00 a 18.00	.. .		0.75 Máx No
440B	0.75 a 0.95	1.00	1.00	16.00 a 18.00	.. .		0.75 Máx No
440C	0.95 a 1.20	1.00	1.00	16.00 a 18.00	.. .		0.75 Máx No
501	0.10 Min	1.00	1.00	4.00 a 6.00	.. .		0.40 a 0.65 No
502	0.10 Máx	1.00	1.00	4.00 a 6.00	.. .		0.40 a 0.65 No
ACEROS FERRITICOS							
405	0.08 Máx	1.00	1.00	11.50 a 14.50	.. .		0.10 a 0.30 Al
430	0.12 Máx	1.00	1.00	14.00 a 18.00
430F	0.12 Máx	1.25	1.00	14.00 a 18.00	.. .		0.15 Min S
430F(Se)	0.12 Máx	1.25	1.00	14.00 a 18.00	.. .		0.15 Min Se
446	0.20 Máx	1.50	1.00	23.00 a 27.00	.. .		0.25 Máx N

(a) Otros elementos adicionales a los arriba mencionados son los siguientes: Fósforo es 0.06% Máx en tipos 201, 202, 416, 416(Se), 430F, 430F(Se); 0.045% Máx en tipos 301, 302, 302B, 304, 304L, 305, 308, 309, 309S, 310, 310S, 314, 316, 316L, 317, 321, 347, 348; 0.20% Máx en tipos 303 y 303(Se). Azufre es 0.030% Máx en tipos 201, 202, 301, 302, 302B, 304, 304L, 305, 308, 309, 309S, 310, 310S, 314, 316, 316L, 317, 321, 347, 348, 403, 405, 410, 414, 420, 430, 431, 440A, 440B, 440C, 446, 501 y 502; 0.15% Min en tipos 303, 416 y 430F (b) Mn grado 5.50 a 7.50 (c) Mn grado 7.50 a 10.00 (d) Si grado 2.00 a 3.00 (e) Si grado 1.5 a 3.00

los miembros de cualquier serie. La división mayor existe entre los de la serie 300 que contienen níquel como estabilizador de la austenita y los de la serie 400 que no contienen níquel o con un contenido máximo de 2.5% de este elemento.

La pasividad de aceros inoxidable se debe a la formación de una capa delgadísima de óxido de cromo, sobre la superficie del metal, capa que es impermeable e insoluble en un medio corrosivo, se debe tomar en cuenta que la formación de dicha capa, se logra únicamente en medios oxidantes.

Algunos de los aceros de la serie 400 pueden endurecerse por los procesos de inmersión y templado, por lo cual, se han localizado en una lista separados, en la misma tabla como aceros inoxidable martensíticos mientras que los que no responden a tal tratamiento son clasificados como ferríticos. Los aceros inoxidable de la serie 200 en los cuales la porción de níquel ha sido sustituida por manganeso, son denominados austeníticos. Los valores listados en la tabla No. 1.1, no corresponden a especificaciones oficiales, sin embargo, son de uso general ya que han sido aceptados en común acuerdo por fabricantes y usuarios. El término martensítico podría estar aplicado incorrectamente para el caso de aceros inoxidable recocidos y templados. La habilidad de endurecido no es exclusiva de los aceros martensíticos, ya que las operaciones de endurecimiento por trabajo, endurecimiento por precipitación y "endurecimiento sigma" se presentan en los tipos austeníticos y -

ferríticos. Más aún la martensita, la ferrita y la austenita pueden estar presentes en algunos casos en aceros de todos los grupos. Por tanto, los términos martensítico, ferrítico austenítico y dureza por precipitación, son usados con un criterio cualitativo impreciso, para diferenciar las clases de aceros en base a su comportamiento durante el tratamiento térmico.

Las propiedades de los diferentes elementos, relacionados con la resistencia a la corrosión y con la estructura, permiten la realización de un número infinito de composiciones que conviene para los diferentes tipos de aplicaciones, y que puede resumirse en cinco grupos:

1.1.4.1.1 Aceros martensíticos.

Son aquellos que contienen de 12 a 17% de cromo y de 0.1 a 0.5% de carbono (en algunos casos hasta 1%) y que templándolos pueden adquirir una gran dureza. Raramente se les adiciona otros elementos, salvo a veces silicio en el caso de aceros que deben resistir a la oxidación en caliente o níquel, para conservar su temple cuando el contenido de cromo es alto.

1.1.4.1.2 Aceros ferríticos.

Son aquellos que contienen 16 a 30% de cromo. El contenido de carbono, debe ser bajísimo en los aceros que contienen poco cromo, pero puede llegar hasta 0.35% cuando el contenido de cromo es de 30%. Estos aceros no tienen punto de transformación y por consi-

guiente, no se endurecen por temple o alcanzan una dureza poco elevada. Además son sensibles al crecimiento del grano por calentamiento a alta temperatura y experimentan ciertas formas de fragilidad.

1.1.4.1.3 Aceros austeníticos.

Son los aceros con cromo y níquel y contienen a menudo adiciones de otros elementos. Su composición está "equilibrada" para que conserven una estructura perfectamente austenítica a temperatura ambiente. La base de estos aceros es una composición con 18% de cromo y 8% de níquel pero los hay que contienen hasta 35-40% de níquel. Muchos de estos aceros son sensibles a la corrosión intergranular, cuando no han recibido un tratamiento térmico estabilizante o cuando su composición no es conveniente.

1.1.4.1.4 Aceros austeno-ferríticos.

Son aquellos aceros análogos a los precedentes, cuya composición se ha "equilibrado" de modo que contengan un poco de ferrita. A pesar de las dificultades que presenta su trabajo en caliente, algunos de estos aceros presentan la ventaja de ser insensibles a la corrosión intercrystalina y de permitir tratamientos de endurecimiento estructural.

1.1.4.1.5 Aleaciones no ferrosas.

Tienen un bajo contenido de hierro. Existen dos tipos de aleacion

nes que tienen como metal principal, respectivamente el níquel o el cobalto. Tienen una gran importancia en el campo de las aleaciones resistentes al calor. En el campo de las aleaciones resistentes a la corrosión debida a los productos químicos a temperatura moderada o fríos, su aplicación es mucho menor.

1.1.4.2 Selección de los Aceros Inoxidables para Procesamiento de Productos Químicos.

Las características de los aceros inoxidables aplicados a la industria química, pueden ser afectados adversamente por: (a) corrosión general, (b) corrosión intergranular, (c) corrosión originada por esfuerzos, y (d) corrosión por picaduras. Es muy frecuente que pequeñas variaciones del medio en el cual se están usando estos materiales tengan un efecto muy marcado en la duración del acero inoxidable. Algunas prácticas de diseño y fabricación pueden también tener cierta influencia.

1.1.4.2.1 Corrosión general.

La resistencia a la corrosión del acero inoxidable, se debe a la condición conocida como "pasividad" resultante de la presencia de una película delgada de óxido. Se ha determinado que bajo condiciones favorables, (generalmente oxidantes) tales películas son protectoras, condiciones adversas destruyen la película y dejan la superficie en el estado activo que es resistente a la corrosión en un grado ligeramente mayor que la resistencia del hierro

o acero comunes. La pasividad, ejerce una influencia mayor en la resistencia a la corrosión del acero inoxidable que la resistencia que pudiera ofrecer la mayor parte de metales y aleaciones. La pasividad se logra tratando las superficies con alguna de las soluciones químicas típicas, o simplemente por la exposición al aire, de una superficie que se ha limpiado químicamente.

En algunas ocasiones, ligeros cambios en el ambiente pueden tornar una superficie de activa o pasiva o viceversa, consecuentemente las condiciones denominadas "límites de pasividad" causan variaciones impredecibles, en la resistencia a la corrosión general. Las soluciones diluidas de ácido sulfúrico, especialmente en caliente, se comportan de este modo. La presencia de aire o pequeñas cantidades de un agente oxidante, tal como el ácido nítrico pueden mantener la pasividad aún bajo condiciones corrosivas. El hidrógeno liberado en la corrosión de algún otro material en el sistema, podría ser suficiente para destruir la pasividad aún en condiciones que pudieran ser satisfactorias. Algunos otros agentes reductores tienen el mismo efecto.

El hecho de que las condiciones oxidantes favorezcan la pasividad, está comprobado por la aplicación práctica de los aceros inoxidables 304, 347 y 430, en servicios en los cuales está presente el ácido nítrico. Sin embargo, en algunos casos las condiciones podrían ser demasiado críticas, por ejemplo concentraciones mayores de 95% a temperatura ambiente o aún con concentraciones bajas a

temperaturas cercanas al punto de ebullición, de las soluciones de ácido nítrico, son corrosivas para el acero inoxidable.

Los ácidos y sales de los halógenos, pueden destruir la pasividad. La resistencia a tales compuestos deberá ponerse en tela de duda a menos que se cuente con datos experimentales prácticos, de la aplicación de aceros inoxidables para estos casos.

Es un hecho que los aceros inoxidables son moderadamente resistentes a la corrosión de soluciones de ácido sulfúrico diluido a menos que existan condiciones oxidantes. Los tipos 316 y 317, que contienen molibdeno, son más resistentes, del mismo modo se comportan los tipos que contienen molibdeno y cobre, la resistencia a las soluciones de ácido fosfórico, es similar a la resistencia de las soluciones de ácido sulfúrico pero los márgenes de concentración y temperatura, son más extensas para el ácido fosfórico que para el sulfúrico.

Los ácidos orgánicos pueden manejarse sin ningún riesgo con los aceros austeníticos, tipos 304, 316 y 347. Bajo condiciones más severas y especialmente con vapores concentrados, calientes o condensados, los tipos que tienen en su composición molibdeno, son los que han mostrado superioridad. La resistencia a los medios alcalinos es también muy buena pero hay materiales satisfactorios, disponibles a un costo más bajo. Los aceros inoxidables de la serie 300, son resistentes a soluciones de sales orgánicas e inorgá

nicas con excepción de las sales de los halógenos como se ha establecido previamente.

1.1.4.2.2 Corrosión intergranular.

Un tratamiento térmico inadecuado de un acero inoxidable, expuesto a medios corrosivos muy severos, puede causar la falla de este en un período muy corto de tiempo, o bien reducir la vida del mismo en medios, moderados o menos severos. Los aceros austeníticos no estabilizados, (aquellos con un contenido mayor a 0.03% de C y sin Co ó Ti), pueden ser susceptibles a la corrosión intergranular, debido a la precipitación de carburos complejos de cromo, -- cuando el acero se expone a temperaturas entre 427 y 816 °C. Los procedimientos normales de soldadura son el origen y la causa de esta situación. El hecho de que el acero inoxidable sea susceptible a la corrosión intergranular, no significa necesariamente que será atacado, puede ser que sea satisfactorio para el servicio en el cual se le está usando, sin embargo, muchos medios corrosivos, incluyendo algunos considerados como moderadamente corrosivos, -- pueden corroer a los aceros susceptibles a este tipo de corrosión.

La precipitación de carburos de cromo y su afecto se pueden evitar por medio de los siguientes métodos:

1. Calentando el acero después del proceso de fabricación, o -- procesándolo a una temperatura lo suficientemente alta para

disolver los carburos (generalmente 1038-1145 °C) y enfriando rápidamente para evitar precipitación. El tratamiento térmico, restringido al área alrededor de la soldadura no es satisfactorio, para la prevención de la precipitación del carburo de cromo. Para lograr un tratamiento térmico efectivo, se deberá calentar o enfriar la unidad completa.

2. Usando aceros inoxidables, que han sido estabilizados con columbio o titanio, estos elementos se combinan con el carbono evitando la precipitación de los carburos de cromo. Los aceros inoxidables estabilizados deben usarse para servicios en los cuales habrá exposiciones largas a temperaturas entre -- los 427 y 816 °C las cuales corresponden al rango sensible -- de los aceros, o bien cuando las condiciones son tan severas que el acero inoxidable es susceptible al ataque intergranular.
3. Reduciendo el contenido de carbono en los aceros, durante el proceso de fabricación a valores tan bajos que la dificultad se evite. El hecho de contar en el mercado con aceros inoxidables con un contenido de carbono bajísimo (304L y 316L), -- le han dado gran importancia a este aspecto.

1.1.4.2.3 Corrosión Originada por Esfuerzo.

Casi cualquier metal o aleación incluyendo los aceros inoxidables austeníticos, pueden ser afectados por este tipo de corrosión, --

cuando están presentes esfuerzos aplicados o residuales y medios corrosivos específicos moderados. Las soluciones de cloruros son las sustancias que mayormente han provocado la falla de los aceros inoxidables por esta causa. El mecanismo de la corrosión originada por esfuerzos, aún no ha sido establecido. Esta clase de rompimiento en los aceros inoxidables austeníticos es principalmente transgranular y algunas veces es acompañado por picaduras. Este tipo de corrosión se presenta más frecuentemente con soluciones calientes que con soluciones frías.

Para evitar esta corrosión, en algunos equipos fabricados de acero inoxidable de 304L y 316L, se hace un relevado de esfuerzos a las temperaturas usadas generalmente para acero al carbono (538--649 °C). Mientras que este rango de temperatura puede afectar a las aleaciones 18-8 debido a la precipitación de carburos, no afecta a las aleaciones con un contenido de carbono mas bajo.

La exposición de aleaciones con bajo contenido de carbono a temperaturas dentro del rango en que precipitan los carburos, pueden producir efectos dañinos, en ciertos medios corrosivos. Por ejemplo el acero tipo 316L puede fallar en presencia de ácido nítrico a 65% de concentración a temperatura de ebullición, después de haber sido tratado térmicamente durante 1 hr. a 649 °C. Esto puede ser causado por la formación de fase sigma alrededor de los granos.

El mecanismo de la formación de la fase sigma es similar a la pre

cipitación de carburos en la que hay disminución de cromo en las áreas adyacentes. La disminución de cromo por formación de la fase sigma puede ser menos crítica que en la precipitación de carburos. Mientras que el relevado de esfuerzos a baja temperatura, puede ser adecuado en ciertos medios corrosivos, se debe tomar en cuenta que el relevado no ha sido total. Para llevarlo a cabo totalmente la temperatura deberá elevarse hasta 899 °C. Los materiales enchapados no pueden ser relevados de esfuerzos por calentamiento debido a la gran diferencia de coeficientes de expansión entre las dos capas de metal. Si el valor del esfuerzo al que la corrosión puede ocurrir se sabe que es inferior al obtenido, después del tratamiento térmico a una temperatura baja, éste podrá ser de utilidad. Si el valor de esfuerzo al cual puede ocurrir la corrosión no es conocido se deberá considerar un relevado a una temperatura más alta.

Las soldaduras expuestas a esta temperatura, algunas veces son afectadas adversamente por la corrosión y puede ser ventajoso el uso de electrodos estabilizados con columbio. El uso de electrodos con un contenido de carbono aún más bajo que 0.04% no ofrecen ninguna garantía.

1.1.4.2.4. Corrosión originada por picaduras o corrosión local.

Ya que los aceros inoxidable son pasivos casi bajo todas las condiciones en las cuales son normalmente usados, cualquier corrosión originada por picaduras, en circunstancias que prevean esta-

blecimiento de la pasividad, puede causar una penetración rápida en el punto de inicio. Esto es debido a que se forma una celda - electrolítica activa - pasiva entre el área pasiva más grande que es el cátodo y el área pequeña anódica que es la que está sometida al ataque, el oxígeno que rodea la zona, sirve como un despolarizador y la corrosión por picadura continúa.

Las soluciones que contienen cloruros, son especialmente dañinas, debido a que provocan la formación de tales celdas con lo cual la corrosión por picaduras puede resultar muy severa. Los iones cloruro de sales muy ionizables, asociados a metales de valencia muy grande, tales como cloruro cúprico (CuCl_2) y cloruro férrico - - - (FeCl_3) son especialmente críticos, pero aún cualquier otro cloruro en concentración considerable es una fuente de posibles problemas. Las soluciones de sales de los otros halógenos (F^- , Br^- y I^-) y algunos sulfatos pueden provocar también este tipo de corrosión.

La corrosión por picadura es producida también por soluciones estancadas, esta se puede presentar en hendiduras o en las uniones originadas por los empaques. La formación de pares galvánicos de estas uniones, en algunos casos depende del tipo de empaque utilizado.

El molibdeno en los aceros tipo 316 y 317 aumenta la resistencia a la corrosión por picaduras, sin embargo este tipo de corrosión es un problema de grado de concentración y el ataque aún puede o-

currir cuando las condiciones son muy severas. La eliminación de zonas estacionarias de solución en hendiduras y uniones y el uso de superficies limpias puede disminuir las posibilidades de corrosión.

1.1.4.2.5 Corrosión originada por aspectos de diseño y fabricación.

Las fallas pueden ser eliminadas frecuentemente, efectuando algunos cambios en el diseño sin necesidad de cambiar el tipo de acero. Los factores que deben considerarse, incluyen el diseño de los perfiles para las uniones que deberán soldarse (biseles), -- continuidad de las superficies y concentración de esfuerzos. Las soldaduras deberán ser perfectamente espaciadas y la manera de localizar y hacer las uniones de los materiales deberán hacerse de acuerdo con las reglas establecidas por el Código ASME. Las soldaduras deberán localizarse de tal modo que permitan un buen aprovechamiento de las placas al cortarlas y un buen ajuste de las uniones. Las soldaduras con los bordes a tope son mejores que las de bordes traslapados. Si es necesario hacer soldaduras con uniones traslapadas, deberán sellarse de tal modo que se evite la penetración de las soluciones corrosivas o de otro modo podrán formarse zonas de estancamiento y por tanto celdas de corrosión, lo que finalmente conducirá a fallas. El uso de partes soldadas tales como refuerzos con filetes de soldadura circulares continuos, deberán usarse lo menos posible, debido a que producen esfuerzos

residuales en todas direcciones, que generalmente son más difíciles de relevar por tratamiento térmico. Para evitar la difusión de carbono dentro del acero inoxidable del equipo en construcción desde alguno de los accesorios, por ejemplo, de los soportes, se deberá soldar al recipiente una pieza de acero inoxidable (un parche) al cual posteriormente se soldará el soporte.

Siempre que sea posible, el proceso de soldado deberá hacerse en posición horizontal plana, para lograr una buena aplicación de la soldadura. Cuando se usan métodos manuales, es preferible aplicar la soldadura en cordones longitudinales, porque los efectos del calor se disminuyen y por tanto los esfuerzos residuales son mínimos. El uso de agua para enfriar soldaduras en placas con un espesor menor que 4.8 mm. puede disminuir los efectos del calor y la distorsión. Sin embargo, el control de calor que suele afectar las zonas, como se ha descrito anteriormente, no es necesario considerarlo con aceros estabilizados como los 321 y 347 o con aceros de muy bajo carbono como el 304L y 316L, los cuales por supuesto deberán venir de origen, libres de esfuerzos residuales de fabricación, especialmente cuando se considera que para algún uso específico, se puede presentar la corrosión por esfuerzos.

Un ensamble de mala calidad, causa esfuerzos debido a que es necesario ajustar las piezas forzándolas para ponerlas en la posición correcta, o cuando se trata de soldar uniones que han quedado muy

separadas o desniveladas. Por otra parte, es necesario usar una secuencia de cordones de soldadura adecuada de tal modo que se -- disminuyan los esfuerzos residuales.

El equipo deberá limpiarse perfectamente para eliminar contaminantes tales como óxido, polvo de hierro, salpicaduras de soldadura, fundente, suciedad y materia orgánica, los cuales deberán quitarse por medio de una limpieza mecánica o química.

Al final del proceso de fabricación, deberá darse al recipiente - una limpieza química con una mezcla en solución de ácido nítrico al 10% y ácido fluorhídrico al 1%.

Se deben limpiar las superficies de melladuras, marcas por esmerilados o abrasivos, rayones, esquinas, ranuras, o marcas similares que propician el inicio de esfuerzos. Los filetes adecuados de - soldadura hechos correctamente en las esquinas, los contornos suaves de las soldaduras, sin socabados, soldaduras pulidas, esqui--nas redondeadas, orillas pulidas y superficies planas, ayudarán a evitar la concentración de esfuerzos.

Las operaciones en frío tales como: rolado, formado, etc., debe--rán evitarse o reducirse al mínimo. Las operaciones mecánicas de fabricación de tapas para los recipientes, deberán procesarse en caliente, a temperaturas mayores que 871 °C. Las piezas de fundición, birlos y otros componentes forjados en caliente, deberán --tratarse a 1,093 °C y enfriarse con agua o en corriente de aire.

Si es necesario dar un tratamiento térmico, se deberá considerar la estabilidad estructural del equipo y la temperatura a que será sometido. Las superficies deben estar limpias y libres de materiales carbonaceos, tales como: aceite, grasa y pintura, que podrían aumentar el contenido de carbono del acero por absorción, debido a la alta temperatura del tratamiento. El hecho de que existan facilidades para efectuar un tratamiento térmico del equipo que se está fabricando, definitivamente tendrá influencia en el costo. De cualquier modo en algunos casos es preferible el uso de materiales estabilizados o con bajo contenido de carbono, a pesar de ser caros, a someter al recipiente a un tratamiento térmico.

1.1.4.3 Pruebas de Corrosión.

Ya que la reproducción completa de las condiciones reales de servicio a que estará expuesto un acero son difíciles de lograr en un laboratorio, los resultados de estas pruebas simuladas, pueden servir únicamente como una guía. La temperatura, las condiciones de los reactivos químicos y la velocidad del proceso simulado, deberán ser similares a las del proceso real, por lo cual las condiciones reales a que está sometido el equipo existente, en caso de que lo hubiera, deberán usarse como tipo, tanto como sea posible, de tal modo que se logre una duplicidad de tales condiciones. Si la inversión que se va a hacer en la nueva instalación lo amerita, será necesario efectuar pruebas en una planta piloto con el fin de contar con resultados más reales. Debido a que el acero puede

verse afectado durante el proceso de fabricación y esto podría originar fallas prematuras en el servicio, será necesario el uso de probetas de corrosión con el fin de evaluar los métodos usados en la fabricación. Es muy aconsejable hacer probetas de piezas soldadas, típicas del proceso de fabricación y tomar radiografías para evaluar la calidad de los cordones de soldadura, de este modo se podrán determinar los efectos del calor en las zonas de soldadura y así localizar las zonas con esfuerzos residuales, que podrían originar corrosión por esfuerzos. Para evaluar la susceptibilidad del acero a fallas, y para determinar si el equipo ya fabricado deberá someterse o no a un relevado de esfuerzos, las probetas con esfuerzos residuales, deberán analizarse a diferentes valores de esfuerzo. Las probetas usadas para el análisis del tratamiento térmico, deberán presentar las condiciones reales de trabajo. Es muy importante también, que el pulido de la superficie (acabado), de las probetas sea el mismo que el del trabajo que se está efectuando. Las superficies gastadas por fricción o las marcas producidas durante la preparación de las probetas, deberán quitarse antes de hacer las pruebas.

Finalmente, otro aspecto de suma importancia, es la evaluación cuidadosa de los resultados de las pruebas. El examen microscópico de las superficies de las probetas, para la localización de posible ataque en los límites de los granos, es útil cuando las velocidades de corrosión son bajas, o el tiempo de la prueba ha si-

do corto. El ataque en las zonas límites de los granos indica -- que el acero seleccionado no es el adecuado.

1.1.4.4 Costo.

La tendencia general de la relación de costos entre acero al carbono y acero inoxidable se ilustra en la Fig. 1.6, esta figura -- muestra la tendencia del costo del tubo, de diámetro exterior que es uno de los materiales más usados, en casi todas las plantas de productos químicos. Otros productos de acero inoxidable y los diferentes equipos fabricados con ellos, muestran diferentes magnitudes, pero las comparaciones cualitativas con el acero al carbono son similares.

1.1.4.5 Datos de Resistencia a la Corrosión.

Una gran cantidad de datos para el acero al carbono y aceros inoxidables en presencia de una variedad de productos químicos están recopilados en tablas y gráficas de muchos manuales. En la Bi-bliografía se mencionan algunos de ellos.

1.1.5 Aleaciones Especiales.

1.1.5.1 Monel.

Esta es una aleación de níquel y cobre con la siguiente composición 63-70% de Ni. incluyendo una pequeña cantidad de Co., 2.5% - Fe.Máx., 2.00% Mn.Máx., 0.30% C.Máx., 0.50% Si.Máx., 0.024% S.Máx. y el resto de cobre.

TUBING, 0.1225 ESPESOR DE PARED EN PULGAS.

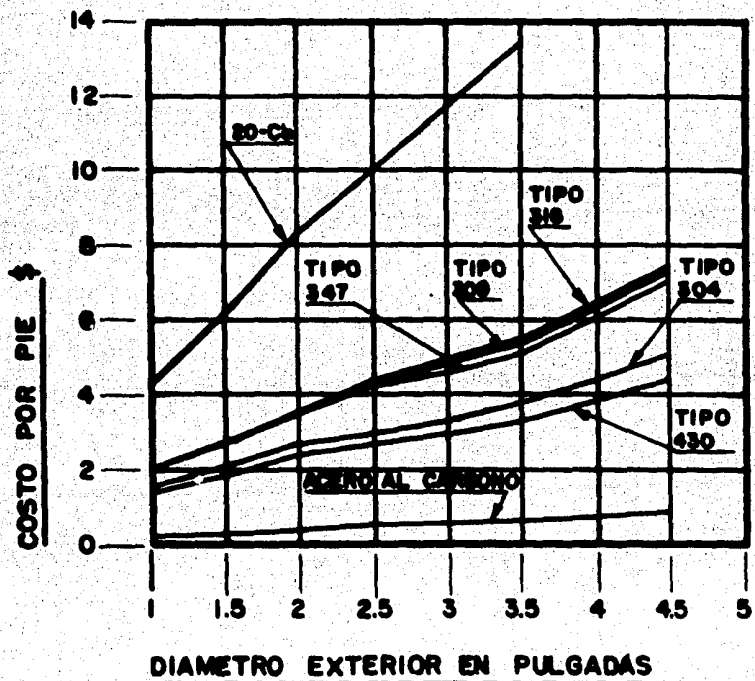


Fig. 1.6-COSTO DE TUBING DE ACERO INOXIDABLE CAL. 11, DE VARIOS TIPOS, COMPARADO CON ACERO AL CARBONO.

Se usa cuando se desea una gran resistencia a la corrosión y al trabajo mecánico. Sus aplicaciones son en las industrias química, farmacéutica, petrolera, marina, de textiles, etc. Resiste muchos agentes corrosivos como agua de mar, ácido sulfúrico diluido y soluciones concentradas de sosa cáustica.

No es aplicable en atmósferas cuyo contenido está formado de compuestos de azufre a temperaturas de 370 °C (700 °F), en medios muy oxidantes, tales como el ácido nítrico, ácido nitroso, soluciones ácidas de sales férricas, soluciones de sales estánnicas y mercúricas y en soluciones alcalinas de hipocloritos, cuyo contenido de cloro libre sea de 3 gramos por litro.

Al trabajarlo en caliente la atmósfera del horno deberá estar libre de sulfuros y deberá ser ligeramente reductora con 2% o más de monóxido de carbono, el azufre no deberá sobrepasar 0.5% y de preferencia 0.2%. Se deberá evitar las atmósferas fluctuantes de oxidante a reductora o viceversa.

El radiografiado en el proceso de fabricación es similar al usado para el acero, aumentando únicamente la intensidad de la corriente aproximadamente 15%.

Durante el proceso de fabricación se deberán tomar las siguientes precauciones: después de rolar o formar una pieza, se deberá limpiar completamente de grasas lubricantes, sobre todo cuando el azufre está formando parte de la composición de estas grasas; las

mismas consideraciones se deberán tener con posibles contaminaciones de las aleaciones de zinc, por el uso de herramientas o partes utilizadas, que están formadas por esta aleación como martillos y dados.

1.1.5.2 Inconel.

Es una aleación de níquel, cromo y hierro, con la siguiente composición: 72% Ni Mín., 14-17% Cr, 6-10% Fe, 0.5% Cu Máx., 1.0% Mn - Máx., 0.5% Si Máx., 0.15% C Máx. y 0.015% S Máx.

Se usa en aplicaciones industriales, en los cuales es necesaria una buena resistencia mecánica, alta resistencia a la corrosión y excelente resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas. Se deberá tener la precaución de no usar esta aleación en atmósferas con compuestos de azufre a temperaturas mayores que 816 °C. (1500 °F). No es afectado por la corrosión originada por esfuerzos.

El radiografiado en el proceso de fabricación, es similar al del acero, excepto que el voltaje deberá aumentarse 5%.

1.1.5.3 Hastelloy B.

Aleación cuya composición es: 62% Ni, 28% Mo y 5% Fe.

Resiste el ácido clorhídrico a todas las concentraciones y a temperatura de ebullición. También es resistente a otros ácidos y sales no oxidantes, tales como ácido fosfórico, ácido sulfúrico hasta 60% de concentración, cloruro cuproso, y sales de cloro simila

res. Conserva sus excelentes propiedades a alta temperatura, por ejemplo su resistencia mecánica a 871 °C (1600 °F) es igual o mayor que dos tercios de la resistencia a temperatura ambiente, En atmósferas oxidantes, (no soluciones oxidantes), puede usarse hasta temperaturas de 760 °C (1400 °F). En atmósferas reductoras -- puede usarse a altas temperaturas. No se recomienda para ácidos o sales fuertemente oxidantes.

En el proceso de fabricación y específicamente durante el formado en caliente, es de vital importancia el control de la temperatura. Un tratamiento térmico que asegura la máxima ductibilidad, resistencia a la corrosión y facilidad para el maquinado, es someter - las partes del metal a 1177 °C (2150 °F) y enfriarla rápidamente con aire frío o agua.

Para soldar este material, no es recomendable el uso de oxiacetileno ni arco de carbón, Todos los tipos de soldadura de resistencia son satisfactorios. Para arco manual, se debe usar electrodos de Hastelloy B, cubiertos de fundente, con polaridad invertida, el arco se deberá mantener corto y deberá evitarse sobrecalentamiento de la zona que se esta soldando.

1.1.5.4 Hastelloy C.

Aleación cuya composición es 54% Ni, 17% Mo, 15% Cr, 5% Fe y 4% W.

Resiste los agentes oxidantes, tales como el cloro húmedo, cloro

gas, hipocloritos, soluciones de dióxido de cloro, cloruro férrico, ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico. A temperaturas moderadas o bajo condiciones oxidantes, tiene excelente resistencia al ácido acético, al agua de mar y a muchos ácidos y sales orgánicas corrosivas. A altas temperaturas sus propiedades son muy buenas, y resiste atmósferas oxidantes y reductoras, hasta 1093 °C (2000 °F). A menos que se trate de soluciones débiles esta aleación no se recomienda para ácido nítrico y ácido clorhídrico, y la combinación de sus sales a temperaturas mayores de 50 °C (120 °F).

Esta aleación no deberá usarse a temperaturas de 500 a 800 °C - - (932-1472 °F), por periodos prolongados de tiempo a menos que posteriormente se someta a un recocido, ya que condiciones como esta provocan grados de corrosión elevados.

Para soldar este material se deberán considerar las mismas observaciones que para el Hastelloy B, excepto que el electrodo deberá ser de Hastelloy C.

1.1.5.5 Hastelloy F.

Aleación cuya composición es 47% Ni, 7% Mo, 22% Cr y 17% Fe.

Resiste los efectos corrosivos de ácidos y álcalis y los medios oxidantes y reductores. Es especialmente resistente a la corrosión por esfuerzos en soluciones de cloruros. Inicialmente se --

usó para recubrir digestores de pulpa en el proceso de sulfito y en el proceso semiquímico de la pulpa.

Los productos forjados y fundidos de esta aleación, se deben tratar térmicamente en baño a 1177 °C (2150 °F) y a continuación someterlos a un enfriamiento rápido usando aire frío o agua, con el fin de obtener máxima resistencia a la corrosión. Un sobrecalentamiento de 50 °C (122 °F) mayor a la temperatura de 1177 °C podría disminuir su esfuerzo mecánico y su resistencia a la corrosión.

Presenta excelente resistencia al ataque corrosivo de ácidos acético, nítrico y fórmico a todas las concentraciones y temperaturas y a los ácidos fosfórico, sulfúrico y crómico a concentraciones y temperaturas bajas.

En el proceso de fabricación, si se va a trabajar en caliente el control de la temperatura es de primera importancia. Si se trabaja en frío, se deberá dar tratamiento térmico, después de cada etapa, con el fin de restablecer su ductibilidad.

Para soldar este metal se puede usar cualquiera de los métodos comunes excepto el de oxiacetileno, debido a la posibilidad de contaminación con carbono.

1.1.5.6 Acero Inoxidable 20.

Esta aleación se denomina CM-7M de acuerdo con A.I.S.I. y su composición está dentro de los siguientes límites: 0.07% C Máx., --

1.5% Mn Máx., 0.04% P Máx., 0.04% S Máx., 18 a 22% Cr, 21-31% Ni, el resto de Fe. Existen otras aleaciones patentadas, cuya composición en Cr y Ni cae dentro de los valores establecidos, pero con algunos otros elementos tales como silicio, molibdeno y cobre.

Es resistente a la corrosión de productos específicos, por ejemplo, tiene buena resistencia a la corrosión por ácido sulfúrico a soluciones caliente de cloruros y al ácido nítrico. Es resistente también al ácido fosfórico y al hidróxido de sodio.

Presenta una microestructura austenítica después de haber sido -- tratado térmicamente. Con el fin de tener los carburos dispersos se deberá tratar térmicamente para obtener la máxima resistencia a la corrosión y para eliminar la susceptibilidad a la corrosión intergranular. Las piezas fundidas que por alguna razón se calienten, entre 427 y 853 °C (800 a 600 °F) deberán tratarse térmicamente con el fin de restablecer su resistencia a la corrosión.

1.2 MATERIALES FORMADOS POR UN METAL SOPORTE Y UN METAL RESISTENTE A LA CORROSION: "CLAD"

El término "Clad", se usa para referirse a metales recubiertos, - en los cuales la capa cubriente es una porción significativa del espesor total. Este tipo de material, se obtiene por el rolado, estirado, a ambas operaciones de dos piezas sobrepuestas, con lo cual se puede producir, lámina, placa, tubo, alambre, etc. Los - perfiles planos y los tubos, pueden tener recubrimiento en ambos

lados, y en este caso los materiales del recubrimiento pueden ser iguales o diferentes.

El proceso de recubrimiento, se logra: (a) sometiendo dos placas, es decir el metal base y el metal recubridor a presión y calentamiento, a un grado suficiente para producir la unión de las dos piezas, (b) Por vaciado de un metal fundido sobre otro, o bien, (c) Empacando un metal en polvo alrededor de un centro sólido de metal base; a continuación las partes son sometidas a los procesos de rolado o estirado. Tomando en cuenta lo anterior, se podrá deducir que el método está limitado a la unión de dos metales que no difieran radicalmente en sus características mecánicas de trabajo.

1.1.1 Aceros Tipo "Clad" con Acero Inoxidable, Níquel, Monel o Inconel.

El acero inoxidable, el níquel y las aleaciones del níquel son -- muy usados, para recubrir el acero, debido a su resistencia a la corrosión de muchos productos químicos.

Por esta razón, estos materiales son muy usados en la fabricación de equipos que serán usados en procesos químicos. La unión del acero con cualquiera de los otros materiales, se logra como ya se ha mencionado anteriormente, por la aplicación de presión y calor simultáneamente, a dos hojas de metales diferentes en calidad y espesor. Inicialmente, las dos piezas de metal de tamaño y espe-

sores apropiados, se limpian. Al metal recubridor (excepto cuando es níquel), se le deposita electrolíticamente una película de níquel de 0.13 mm. de espesor, por el lado al que será unida con la otra pieza de metal. La ayuda del níquel en este caso es muy importante, porque este elemento forma una aleación con la placa de acero evitando de este modo la migración del carbono del acero al metal recubridor y evitando también la formación de óxidos de cromo en el caso de que el material recubridor sea acero inoxidable. Al otro lado del metal recubridor se le aplica un compuesto laminar infusible, tal como una pintura de óxido de aluminio. A continuación se colocan las dos placas recubridoras, uniéndolas por el lado de la pintura y después a cada lado de estas, las placas de acero, estas últimas son 5 cm. más largas que las recubridoras con el fin de dejar una ranura en las cuatro orillas. Se colocan unas barras de acero en estas ranuras, y el ensamble total se sella mediante una soldadura continua. Este método de ensamble, sella las uniones de la superficie, evitando que penetre aire durante el proceso y además permite suficiente espacio para la dilatación diferencial, durante el calentamiento. El ensamble completo es calentado en un foso a la temperatura determinada por el tipo de la lámina recubridora (1150 a 1290 °C para acero inoxidable). A continuación se rola, o algunas veces se prensa a un espesor deseado. Durante este proceso ocurre la fusión sólida del níquel y el acero en la interfase de los dos metales lo que produce la unión de ellos. Cuando se cortan las orillas del en-

samble completo, se obtienen dos placas, cada una con su recubrimiento respectivo. Se pueden someter a tratamiento térmico, para producir las propiedades deseadas ya sea en el material soporte, en el recubrimiento o en ambas. Por ejemplo, un material que está formado por acero al carbono como metal base y un acero inoxidable austenítico como recubridor, se tratan térmicamente con el fin de desarrollar la resistencia máxima a la corrosión. A excepción de los materiales base recubiertos con níquel-cobre o monel, los cuales son limpiados con chorro de arena, los restantes, son decapados por inmersión en hidróxido de sodio fundido (370 °C) que contiene además entre 1.2 a 1.7% de hidruro de sodio, después del decapado son templadas con agua, y finalmente se les da un baño en ácido sulfúrico para darles brillo. Para los materiales base, cuyo recubridor es de acero inoxidable, se somete a un pasivado con una mezcla de ácido nítrico y ácido fluorhídrico. Después de cualquiera de estos tratamientos las placas son cortadas y ajustadas a dimensiones adecuadas.

La placa de soporte es generalmente de acero al carbono, pero puede usarse algún otro acero al carbono aleado con otros elementos. El espesor del material recubridor puede ser desde 5 a 50% del espesor total pero generalmente es 10 a 20%. Se fabrican planchas con espesores hasta de 38 mm., ancho de 4320 mm. y longitudes de 10160 mm. Se pueden obtener también piezas especiales, como tapas toriesféricas y tubos sin costura con diámetros de 203 a 406 mm.

1.2.2 Aplicaciones.

Aceros al carbono recubiertos con aceros inoxidables, níquel y aleaciones de níquel tienen amplias aplicaciones en la fabricación económica de equipos resistentes a la corrosión en la industria petrolera, hulera, del papel, de detergentes y otras industrias químicas. Se usa por ejemplo en reactores intermitentes, cambiadores de calor, filtros y en el proceso de fabricación y transportación de sosa cáustica y álcalis.

La selección del tipo de combinación de material, depende del espesor de pared necesario para obtener una duración razonable de la capa resistente a la corrosión. En los casos en que el espesor necesario es 6.35 mm. o menos (para el espesor total del material, es decir metal soporte y recubridor), es mejor usar la aleación como una sola pieza. En los casos en que el espesor total necesario está entre 12.7 mm. y 25.4 mm. conviene usar el material formado por las dos capas (habría que hacer un análisis económico para el espesor de 12.7 mm.). En los casos en que el espesor total del material es más de 25.4 mm. la mejor solución es el uso de material formado por las dos capas.

En la fabricación de equipos con materiales recubiertos, las operaciones normales tales como doblado, rolado, etc., se efectúan de la misma manera que cuando se está trabajando un acero común. Para los trabajos más pesados, como el estampado es un requisito que el material recubierto, haya sido recocido a 900 - 950 °C y -

después enfriado con aire. En operaciones de formado en caliente, no es necesaria ninguna operación especial, pero el contenido de azufre del combustible que se está usando en el horno no deberá ser mayor de 0.5% de otra manera los materiales recubiertos de níquel podría sufrir quebraduras, en el recubrimiento. Las mejores temperaturas de trabajo son: 1010-1075 para el monel y 1040-1230 °C para el níquel y el inconel.

La unión de materiales cuyo recubrimiento es níquel y aleaciones de níquel, se hace con soldadura de arco eléctrico. Por supuesto, se deberán tomar las precauciones necesarias para evitar que durante esta operación quede expuesta la superficie del material soportante. El módulo de elasticidad y el coeficiente de expansión del acero y el níquel, son semejantes, así que la distribución de esfuerzos es uniforme a través de la sección, y se obtiene una diferencia de esfuerzos baja durante el calentamiento.

1.3 METALES RECUBIERTOS DE VIDRIO.

El acero recubierto con vidrio, acero vidriado o Glasteel* es definido como una clase de esmalte, o vidrio, unido al metal por fusión a temperaturas mayores que 427 °C (800 °F), generalmente formado de varias capas y que tiene gran resistencia al ataque por reactivos químicos a temperaturas elevadas.

El arte de esmaltado, fué originado en tiempos remotos y estuvo

(*) Marca Registrada

relacionado con artículos pequeños, de tipo ornamental, como joyería, copas y pequeños alhajeros. La primera aplicación comercial de esmalte a aleaciones ferrosas, se efectuó probablemente en Bohemia en 1830 y consistió en aplicar el esmalte en forma de polvo a la superficie de una pieza de hierro fundido calentada previamente al rojo vivo, calentando nuevamente el objeto, hasta fundir el esmalte y obtener una superficie vidriada lisa. Años más tarde y con el mejoramiento de las técnicas para producir materiales ferrosos, la aplicación de esmaltes fué mucho más exitosa. Al mismo tiempo, surgieron nuevos procesos para la fabricación de carbonato de sodio y borax, con lo cual se mejoró la calidad y el costo de este proceso. Un mayor ímpetu se dió a la industria de esmaltado, cuando se descubrió que las arcillas podrían mantener en suspensión acuosa el polvo de vidrio con lo cual se adhería más fácilmente al metal, antes de ser horneado.

El mejoramiento de los esmaltes en los últimos años, se debe al resultado de la cooperación de los fabricantes de acero para producir metales de mejor calidad, y de los fabricantes de cerámicas, al desarrollar formulaciones, que pueden ser horneadas y fundidas a temperaturas menores, reduciendo las deformaciones de los equipos y permitiendo el esmaltado de metales como el aluminio y el magnesio.

1.3.1 Aplicación de Vidrios.

Los esmaltes usados para recubrir metales, están formados princi-

palmente por silicatos alcalinos de boro. Estos son muy duros -- por lo cual son más resistentes a la abrasión y tienen un coeficiente de expansión térmica menor que los vidrios comunes formados por silicatos de cal y carbonato de sodio usados por ejemplo en ventanas.

Ya que el metal base en el cual se soportará el esmalte, se oxida y se deforma si se calienta a temperatura alta, los esmaltes deben de tener un bajo punto de fusión. Por lo cual es muy importante estudiar la manera de obtener vidrios de bajo punto de fusión.

La red formada por la sílice y el oxígeno es muy estable, pero si se sustituye la sílice por boro, se forma una porción de triángulos de oxígeno boro con uniones mucho más débiles en resistencia que los tetraedros. De ahí que el boro es casi constituyente universal de los esmaltes. También es posible sustituir parte del oxígeno por el fluor, en la red del cristal lo que da como resultado uniones más débiles y por tanto da un cristal muy blando. Esta es la razón de que muchos esmaltes contengan fluor.

Se dice que los óxidos de boro (B_2O_3) y sílice (SiO_2) son formados de redes. En los sólidos la unidad estructural $(BO_3)^{-3}$ es triangular, mientras que los $(BO_4)^{-4}$ y $(SiO_4)^{-4}$ son tetraedros. Estas unidades se mantienen unidas por medio de un oxígeno compartido y por las esquinas del poliedro, formando de este modo una red tridimensional, que sin embargo no presenta gran orden, de --

ahí que el producto sea vítreo o no cristalino. Los elementos modificadores, tales como los alcalinos, alcalinotérreos o halógenos, disminuyen el número de uniones interconectantes, por lo que disminuyen la viscosidad y permiten algún control en la temperatura de horneado. Los iones polarizables como el (Pb^{++}), debilitan las uniones de la red conforme se aumenta su contenido por tal razón algunos esmaltes contienen plomo, este también funciona como un formador de redes.

Los constituyentes del vidrio también tiene efecto sobre la resistencia química de los recubrimientos vítreos ya aplicados. Así, en términos generales; un aumento de SiO_2 aumenta la resistencia a los ácidos, mientras que un aumento en Al_2O_3 y ZrO_2 tienden a incrementar la resistencia a los álcalis.

En la preparación de esmaltes los ingredientes necesarios para proveer las propiedades deseadas, se funden juntos hasta que forman un compuesto vítreo cristalino, el cual se vierte en agua fría. Los fragmentos de vidrio resultantes llamados "Frit" se muelen en un molino de bolas hasta obtener un polvo fino (3% retenido en la malla 200). El "Frit" está formado normalmente por óxidos refractarios ácidos, tales como el cuarzo y el feldespato y fundentes básicos como el borax, carbonato de sodio, criolita, fluorita, nitrato de sodio y yeso o litargirio. (Ver tabla 1.2).

Para el proceso de aplicación de vidrio húmedo, (suspensión en agua), se agregan agentes flotantes como las arcillas, para suspender

TABLA. - 1.2

COMPOSICIONES TÍPICAS PARA PREPARACION DE "FRITS" USADOS PARA ESMALTAR.

CONSTITUYENTE	ESMALTE PARA COYENA	LÁMINA ACERO CAPA BASE	LÁMINA ACERO CAPA SUPERIOR	REJUNTO PUNTO CAPA BASE	REJUNTO PUNTO CAPA SUPERIOR	ESMALTE PARA ALUMINIO	ESMALTE PARA REFRACTARIO
FELOSEPATO		20.0		20.4	0.7		
BORAX		31.0		22.0	11.0		
CUARZO	10.0	19.0	37.0	22.5	22.0	20.1	20.1
CARBONATO DE SODIO		0.0				20.1	0.2
NITRATO DE SODIO	10.2	0.0	7.0		14.3		
FLUORITA		0.0			0.1		
OXIDO DE COBALTO		0.7					
OXIDO DE NIOBIO		1.0					
BORAX DESHIDRATADO			10.4				
FLUOROSILICATO DE SODIO					1.7		
FLUOROSILICATO DE POTASIO							
CARBONATO DE LITIO			2.0			0.1	
OXIDO DE TITANIO			22.0		0.7	12.0	
ANTIMONATO DE SODIO					10.2		
SILICATO DE ZIRCONIO				1.0			
OXIDO DE PLOMO	01.0			10.0	7.0	10.0	
OXIDO DE ZINC			1.0		0.1	0.0	0.0
BLANCO DE ESPAÑA			1.0		2.0		2.0
OXIDO BORO	21.7					2.0	0.1
CARBONATO DE ESTRONCIO						2.0	
PENTOXIDO DE ANTIMONIO						2.0	0.2
NITRATO DE POTASIO			7.0			10.0	
TITANATO DE ZIRCONIO							1.0
CARBONATO DE BARIO							20.0
CARBONATO DE POTASIO			2.1				0.0
FLUORALUMINATO DE SODIO							0.2
ADICIONES		4-6 %	4-6 %	2%		1%	20 %.
		ARCILLA	ARCILLA	ARCILLA		SILICATO DE SODIO	Al ₂ O ₃
		INORGANICO				INORGANICO	
		ELECTRO					

der el polvo del frit en el agua, y lograr el "slip". También se agregan electrolitos o sales para ajustar la suspensión, tales como el carbonato de sodio, carbonato de magnesio, o borax, los cuales actúan como coagulantes y dan la consistencia propia para aplicar la suspensión a las superficies metálicas. Con el fin de dar la opacidad o el color deseado al recubrimiento, se agregan óxidos metálicos o sales a la suspensión del "Frit" (Ver tabla 1.3).

Inicialmente las sustancias usadas para dar opacidad, consistían de óxidos de antimonio, estaño o circonio, en años recientes el uso de los óxidos del titanio ha sido dominante debido a su gran poder como cubriente, su brillantez, dureza y resistencia a los ácidos. Una superficie cubierta con 323 gr/m² de un esmalte de titanio, da el mismo poder cubriente, que otro para el cual se usaron 861 gr/m² de otro esmalte, sin titanio.

1.3.1.1 Opacidad.

En la mayor parte de los casos, se desea obtener un esmalte blanco o coloreado. Ya que la capa base es oscura debido a los elementos de transición, es necesario cubrir esta con una capa opaca. Ya que por razones económicas y mecánicas es necesario que la capa sea delgada, esta también deberá ser muy opaca. La opacidad se logra en el esmalte, distribuyendo partículas pequeñas, con un índice de refracción diferente al del cristal formado en el esmalte. La dispersión aumenta, conforme aumenta el índice de refracción de los dos materiales y conforme el tamaño de la partícula -

TABLA. 1.3

PROPIEDADES DE COMPUESTOS PARA PRODUCIR OPACIDAD.

MATERIAL	INDICE DE REFRACCION	PODER DE DISPERSION TEORICA RELATIVA
TiO₂	2.7	1.2
ZrO₂	2.2	0.7
Sb₂O₃	2.1	0.6
ZnO	2.0	0.5
SnO₂	2.0	0.5
ZnAl₂O₄	1.9	0.4
Al₂O₃	1.8	0.3
MgAl₂O₄	1.7	0.2
ESMALTE	1.5	0
CeF₂	1.4	0.1
NaF	1.3	0.2
Aire	1.0	0.0

que está causando la refracción se acerca a la longitud de onda de la luz.

El índice de refracción del esmalte no se puede variar demasiado, generalmente permanece en 1.5. Pero se cuenta con partículas con un índice de refracción mayor o menor (Ver Tabla No. 1.3).

El método usual para producir opacidad es agregar las partículas finamente divididas al frit durante la molienda. Durante el calentamiento del esmalte en el horneado, es muy difícil por el tiempo tan corto con que cuentan estas partículas para disolverse.

El color rojo se imparte con compuestos de cadmio, hierro o selenio, el color verde con cromatos, el amarillo con compuestos de antimonio uranio o titanio y el azul con compuestos de cobalto. Otros agregados hechos a la molienda sin considerar el agua, frecuentemente exceden el 15 % del peso del "Frit".

Las partes se esmaltan por inmersión cuando son pequeñas y por rociado cuando son grandes. En años recientes ha aumentado el interés en recubrimientos fluidos, los cuales requieren fórmulas especiales que dan propiedades particulares a las suspensiones. En estas condiciones la capa se seca y después se funde y hornea en un horno para esmalte con calor controlado. Se puede aplicar de este modo, de una a tres capas. En el caso de capas múltiples, la primera denominada capa base, contiene un óxido de cobalto, níquel o molibdeno, que causa la adherencia. La capa superior fi-

nal determina la apariencia del esmaltado. El espesor y opacidad, deben ser lo suficientemente grandes para esconder o cubrir el color de la capa base.

1.3.1.2 Procesos de Esmaltado.

El horneado de los esmaltes convencionales, consiste en someter - la capa seca, a temperatura entre 750 y 870 °C (1450-1600 °F), du rante un periodo de 1 a 5 minutos para piezas pequeñas. Para pie zas más grandes, el calentamiento es mucho más prolongado. El -- Hierro fundido esmaltado bajo el proceso en húmedo, se calienta a una temperatura menor, 625-760 °C (1150-1400 °F), durante 10 a 15 minutos. Cada capa es horneada separadamente y en el proceso en húmedo, se permite que la superficie se enfrie hasta la temperatu ra ambiente, antes de aplicar la siguiente capa. El horneado de la capa base, se hace normalmente a una temperatura un poco mayor que la de las capas superiores, para evitar el "hervido" durante el horneado de estas. En la Fig. 1.7, se muestra un diagrama de flujo del proceso típico que se sigue para esmaltar el acero, en húmedo.

En el proceso de esmaltado en seco, (Fig. 1.8), que generalmente se aplica en la producción de piezas de hierro fundido para uso - sanitario, el "Frit" es pulverizado en seco en un molino, agregan do los agente colorantes y de opacidad. El producto resultante - se aplica por medio de una malla, espolvoreando la mezcla a la su

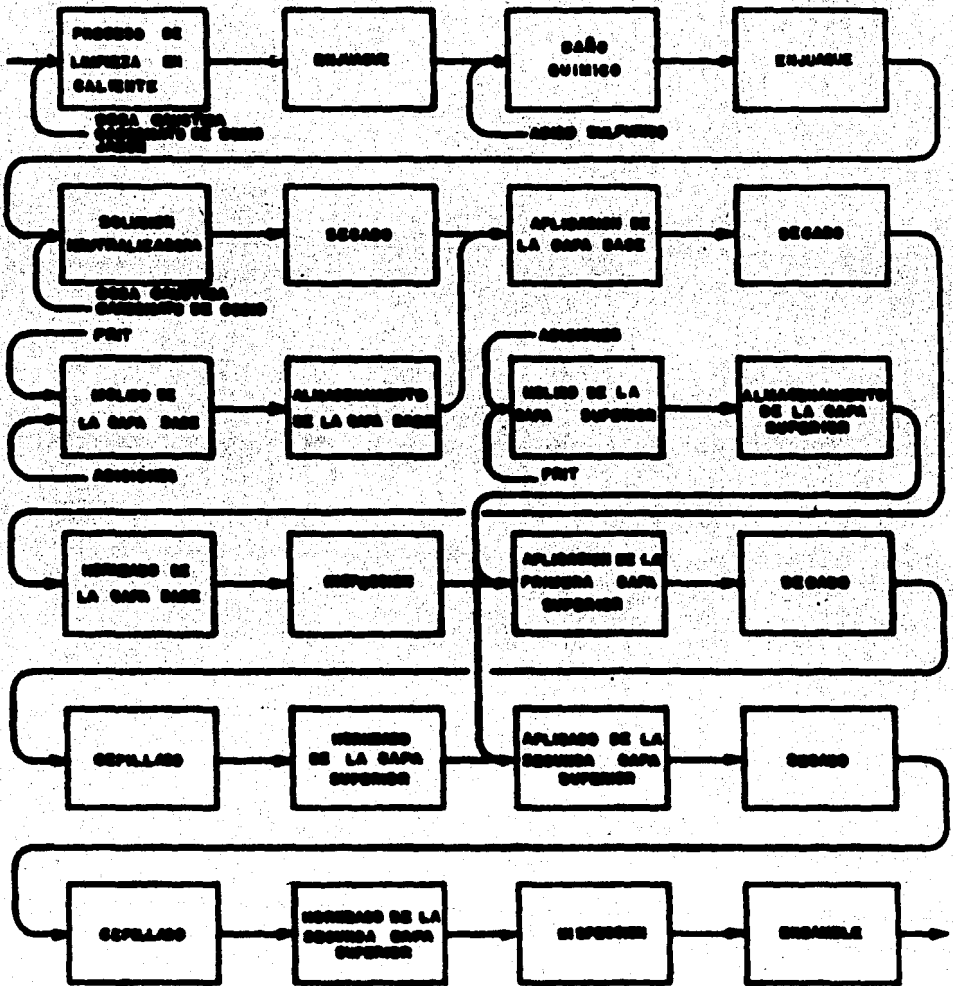


FIG.1.7- DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROCESO DE VEDRIADO DEL ACERO.

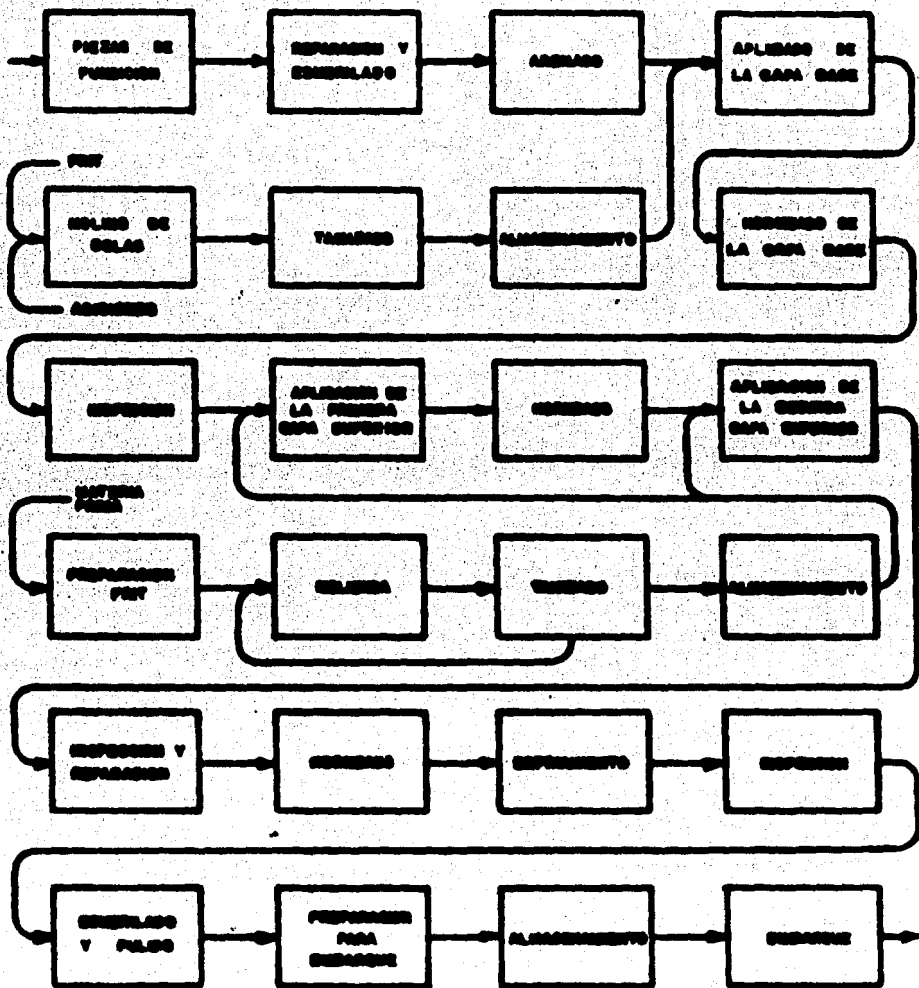


FIG.1.8.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROCESO DE VIDRIADO DEL HIERRO FUNDIDO, EN SECO.

perficie de la pieza que previamente ha sido calentada y a la --
cual anteriormente ya se le habia aplicado la capa base por el --
proceso húmedo, a continuación la pieza se vuelve a meter al hor--
no en donde la capa espolvoreada se funde. Las piezas de hierro
fundido dependiendo de su uso final, se les puede cubrir con es--
maltes que contengan o no contengan plomo. Cuando contienen plo--
mo, la capa es más suave, más fácil de trabajar, pero es menos re--
sistente a los ácidos. La solubilidad del plomo, no permite que
sea usado para equipo que va a procesar alimentos. En este caso
se reemplaza por esmaltes sin plomo que sean similares. En años
recientes la investigación de esmaltes, se ha dirigido al desarro--
llo de productos de baja temperatura para superficies ferrosas, --
que pueden ser horneadas a temperaturas de 680-730 °C (1225-1350
°F) y se espera lograr aún temperaturas más bajas. La ventaja --
principal de temperaturas de horneado bajas, es la disminución de
la tendencia de las piezas a combarse o arrugarse, y por tanto --
permitiendo el uso de láminas de acero mucho más delgadas, espe--
cialmente en los casos en los que temperatura de horneado queda --
determinada por la temperatura a la que las piezas se deforman. --
se ha observado que la deformación por arrugamiento, cuando se --
hornea una lámina calibre 20 (0.91 mm de espesor), de metal a 705
°C (1300 °F), es comparable con la deformación por arrugamiento --
de una lámina calibre 16 (1.52 mm de espesor), a 815 °C (1500 °F).
El descubrimiento de esmaltes de baja temperatura, ha permitido --
el esmaltado del aluminio el cual estaba excluido debido a su ba-

jo punto de fusión, 660 °C (1220 °F), que está abajo de las temperaturas de horneado convencionales. Los "Frits" para aleaciones de aluminio están constituidos frecuentemente con vidrios a base de plomo, con gran coeficiente de expansión térmica. La aplicación se hace normalmente por rociado con tiempos de horneado de 4 a 8 minutos. Las temperaturas de horneado de 510-565 °C (950- -- 1050 °F), se aproxima a las temperaturas eutécticas de las aleaciones de aluminio, por tanto se deberá controlar dentro de un límite de ± 3 °C (± 5 °F).

El magnesio, con una temperatura de fusión de 651 °C (1204 °F), es posible recubrirlo actualmente con esmaltes de vidrio.

Otro de los recientes descubrimientos que tienen importancia práctica, es la aplicación de los esmaltes en una sola capa y por supuesto los refinamientos de las técnicas de aplicación para lograr las capas delgadas.

Hay muchas aplicaciones, tales como el uso en utensilios domésticos, para los cuales no es un requisito del servicio, que el espesor del esmalte se obtenga por la aplicación del sistema convencional de una capa base y una capa cubriente. Más aún las capas más delgadas, son más flexibles y por lo tanto menos susceptibles a un daño mecánico por choque térmico. Con el desarrollo de una buena adherencia sin el uso de capa base y con un control más estrecho para eliminar las fuentes de los defectos, el sistema de una sola capa ha tomado una gran importancia comercial.

Para obtener capas delgadas del recubrimiento, el "Frit" puede triturarse en solución de alcohol y agua a un tamaño de partícula más fino que el normal, que es 200 a 235 mallas y horneado en una atmósfera controlada para limitar la oxidación del hierro al aplicar la capa. Finalmente el descubrimiento más reciente, es la técnica de aplicación de esmaltes por el método electrostático. La pistola de rociado se carga a 100,000 Volts con corriente directa y se sitúa a una distancia entre 203 a 305 mm de la pieza. Se pueden obtener con este método películas de 0.076 mm de espesor, lográndose que el recubrimiento de las superficies irregulares sea bueno. Para obtener una mejor textura, el "Frit" se muele a un tamaño de partícula más fino que el usado en el rociado ordinario.

1.3.2 Preparación de las Superficies.

En principio, casi cualquier metal que no se reblandezca a la temperatura de horneado puede ser cubierto con una capa de esmalte. Al cobre, al oro y a la plata, se les aplican esmaltes para fines decorativos, pero para la mayor parte de aplicaciones comerciales los metales base son el hierro y el acero. Como se ha mencionado previamente el aluminio se esmalta en cantidades considerables y el magnesio también se recubre con fines comerciales.

En la práctica normalmente es necesario controlar de una manera muy estrecha la composición de los metales base, ya sea para evi-

tar que las temperaturas de horneado que son relativamente altas provoquen transformaciones metalúrgicas no deseadas. Para el hierro y el acero, los requisitos de composición son más estrictos en la aplicación de capas delgadas debido a que en estas condiciones, es más difícil esconder los defectos de la capa cubriente, como puede ser la formación de burbujas de gas durante el horneado.

El hierro para propósitos de esmaltado es refinado en hornos de hogar abierto con el objeto de reducir el carbono, el azufre, el fósforo y el silicio. El contenido del carbono no debe ser mayor que 0.06%. Por medio del uso de rodillos especiales, usados durante los pasos finales de fabricación de la placa, en frío, se pueden obtener superficies con una textura tal que mejora la adhesión del esmalte. Un análisis típico de un metal base para esmaltado, es el siguiente: 0.015% de carbono; 0.020% de manganeso; -- 0.005 de fósforo; 0.025% de azufre; trazas de silicio.

Los aceros rolados en frío con una superficie de buena calidad y con un contenido de carbono menor que 0.20% tales como el 1008 6 el 1010, se usan para aplicación de esmaltes, sin embargo, son -- más susceptibles a los defectos de deformación durante el horneado que el hierro para esmaltado. También es posible recubrir el hierro fundido gris con una densidad razonable y una estructura -- uniforme. Un análisis adecuado para este material es el siguiente: 2.25-3.25% de silicio, 0.6-1.2% de fósforo, 0.4-0.6% de manganeso, 0.10 % de azufre y 3.2-3.5% de carbono. El acero aluminiza

do, usado en esmaltado, combina la resistencia del acero con las propiedades protectoras del aluminio. Los aceros inoxidable de las series 300 y 400, son esmaltados algunas veces. Para aplicaciones de esmalte de una sola capa, es necesario usar acero de gran pureza para evitar los defectos visibles de los recubrimientos. Para obtener los mejores resultados, es necesario el uso de aceros especiales descarburizados, con un contenido de carbono de 0.003% a este tipo de aceros se les denomina como de "cero carbono". Un método de descarburización consiste en la aplicación de una suspensión acuosa de hematita (Fe_2O_3) de uno de los lados de la pieza, a continuación se apilan en un horno y se recuecen bajo presión reducida.

Para una descarburización total, la cantidad de mineral de Fe_2O_3 , deberá ser equivalente al contenido de carbono del acero como CO_2 , por ejemplo 4.1 Kg. de Fe_2O_3 , por 0.45 Kg. de carbono. Un acero con un bajo contenido de manganeso mostrará una resistencia mecánica elevada después de una descarburización y recocido.

Otros aceros, diseñados para aplicación de una sola capa, contiene cerca de 0.3% de titanio, con el cual se combina el carbono y se reduce la posibilidad de que el carbono forme óxidos gaseosos durante el horneado.

Todas las superficies metálicas, deben prepararse cuidadosamente, para asegurar una adherencia del recubrimiento, libre de defectos.

El desengrasado y tratado químico de las superficies del acero, se efectúan usando los métodos estándar. Las piezas de fundición y las placas con espesores grandes, pueden limpiarse con chorro de arena, carburo de silicio o granalla metálica. La aplicación de una capa delgada de níquel, para ayudar a la adherencia del esmalte, se ha hecho de uso común. Esto se logra por desplazamiento o reducción en un baño que contenga una sal de níquel o por reducción galvánica usando un tanque recubierto de plomo, después se enjuaga y luego se seca y finalmente se le aplica el esmalte. La capa óptima de níquel para un horneado de 2 minutos a 843 °C (1550 °F) es de 538 a 1291 mg/m². La cantidad de níquel depositada después de un baño con ácido clorhídrico, parece ser influenciada por el contenido de hierro del baño y la cantidad de hidrógeno absorbida por el acero durante el baño. Se necesita una preparación especial de la superficie del hierro o el acero para la aplicación de esmaltes de una sola capa y para los esmaltes que se aplican a baja temperatura. Este tratamiento consiste frecuentemente en un decapado, con ácido y un depósito de una capa de níquel de mayor espesor que la depositada para el proceso de dos capas. Se determinó que el espesor óptimo de la capa de níquel para un depósito de esmalte blanco aplicado en una sola vez, es 1291 mg/m², mientras que para aplicaciones en donde se aplica primero una capa base con níquel y cobalto el óptimo fué entre 323 a 646 mg/m². Otra manera segura para lograr adherencia sin depositar capa base, es depositar en la superficie del hierro o acero -

una capa de un fosfato, a continuación se somete la pieza a un -- prehorneado para formar una película de óxido. El fosfato contro la la oxidación de tal modo que se forma una superficie lisa adhe rente, oxidada a la cual se puede adherir el esmalte aplicado en - una sola capa.

1.3.3 Naturaleza de los Esmaltes.

Los espesores de esmaltes típicos aplicados en dos capas, varían entre 0.127 mm. y 0.203 mm. Los espesores de esmaltes de una sola capa varían entre 0.076 mm y 0.203 mm. Seleccionado adecuadamente el acero, la fórmula del "Frit" y la preparación y además - controlando la atmósfera durante el horneado, se pueden lograr es pesores hasta de 0.0025 mm. En el proceso de aplicación en seco para los hierro fundidos se obtienen espesores de capas de 0.51 - mm o más.

El corte seccional de un depósito de dos capas, aplicado en acero muestra muchas burbujas atfapadas las que abundan más en la capa base que en la capa superficial. Estas burbujas se forman en la descomposición de los constituyentes del vidrio, tales como los - carbonatos, o del hidrógeno disuelto que es forzado a salir de la solución, durante el horneado. En estos casos se desea tener una estructura controlada de burbujas, ya que de este modo se realiza la ductibilidad de la capa. La localización de formaciones de -- gas no controladas provocan los defectos en las capas de vidrio,

conocidos con el nombre de escamas. Se ha encontrado que las burujas que evitan la formación de escamas, están localizadas en la primera capa de vidrio con un espesor de 0.0025 mm adyacente a la interfase, la cual está en el límite del espesor para depósitos de una sola capa. La aplicación de capas de fosfato, en el acero, ayudan a controlar la formación de escamas en aplicaciones de una sola capa.

La expansión térmica del esmalte, es menor que la de las capas adyacentes a ella. Esta diferencia se mantiene intencionalmente -- dentro de ciertos límites, de tal modo que durante el enfriamiento la capa de esmalte estará bajo compresión y por tanto en mejores condiciones para soportar los esfuerzos de tensión. La adición de una capa de esmalte adherente a una lámina delgada de acero o aluminio, contribuye a reforzar, permitiendo en algunos diseños el uso de una lámina de menor espesor comparada con el espesor que se usaría para una lámina no recubierta. Por ejemplo, una tira de acero con una capa de esmalte de 2.4 mm de espesor tiene un esfuerzo a la flexión casi dos veces mayor que el de la misma tira con el mismo esmalte pero con un espesor de 1.88 mm.

El origen de la adherencia del esmalte al metal no está muy definido. Se ha observado una correlación entre la rugosidad de la superficie y la adherencia pero la rugosidad no es la única razón. Si el horneado se efectúa en un atmósfera no oxidante, no se logra buena adherencia. La presencia de cobalto o níquel, este úl-

timo como óxido o laminar en la capa base, acentúa la adherencia como ya se ha expuesto. La adherencia al acero, aparentemente depende de la habilidad de los óxidos de hierro en la interfase, -- los cuales pueden ser disueltos en el esmalte durante el horneado, por tanto ayudando a que el esmalte "moje" la superficie de la -- pieza que se está recubriendo. Los óxidos se pueden originar durante el prehornado, o durante las etapas iniciales de horneado, en una atmósfera oxidante cuando el esmalte aún no está protegiendo. Durante las últimas etapas de horneado, los óxidos de hierro se pueden formar por la reducción de los óxidos de cobalto y níquel si es que están presentes. Los intentos para provocar la adherencia agregando óxidos de hierro al esmalte, no han dado resultados satisfactorios.

Se han hecho observaciones del níquel y el cobalto en la interfase, después de hornear, usando estos elementos en forma radioactiva (Co-60 y Ni-63), y se ha encontrado hierro precipitado o una aleación hierro cobalto al examinar las radiografías. El efecto -- que contribuye a la adherencia se atribuye a las fases metálicas en forma arborescente. También se ha enfatizado que contribuyen a la adherencia el enlace químico entre el metal, el óxido metálico y el esmalte. Las investigaciones continúan, para determinar con más precisión los grados en que estos y otros factores, como la acción galvánica afectan la adherencia.

La adherencia de los esmaltes se evalúa, deformando una muestra -

hasta que se quiebra la capa y midiendo el porcentaje del área de formada a la que la capa aún está adherida. La dureza de los esmaltes no se puede medir por técnicas convencionales pero se localiza entre 5 y 6 en la escala Moh. La mayor importancia de la dureza es la resistencia a la abrasión y al desgaste. Cuando está sujeta a la abrasión, la velocidad inicial de desgaste es relativamente baja pero se aumenta con el tiempo, hasta alcanzar un valor estable.

La resistencia a la torsión se evalúa torciendo un pedazo de ángulo de 250 mm de longitud cubierto de esmalte hasta que la capa se desprende en la parte del vértice. La resistencia a la torsión del esmalte blanco aplicado directamente a una pieza de metal calibre 16, se aumentó de 90° a 135°, disminuyendo el espesor de esmalte de 0.20 mm a 0.127 mm. La aplicación de una sola capa da valores más altos que los sistemas de dos capas.

La resistencia a los choques térmicos, de los esmaltes, se determina sometiendo muestras a ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento con agua. La temperatura inicial es de 246 ± 5.6 °C y se aumenta 13.9 °C en cada ciclo siguiente, hasta que la capa se fractura.

Si el esmalte puede llenar todos los requisitos mecánicos y físicos de fabricación y servicio, su valor como recubrimiento, radica en su habilidad para proteger los metales, al mismo tiempo que mantiene una apariencia agradable. Existen métodos estándar para

determinar su brillo especular y su reflectividad.

La resistencia química de los esmaltes generalmente es muy grande. En términos generales, los esmaltes blancos son más durables que los coloreados. La resistencia a los ácidos a temperatura ambiente se determina por su apariencia después de someterla a una solución de ácido cítrico al 10% durante 15 minutos. Los grados son: AA (no atacada), A, B, C y finalmente D, con esta letra se designa la pérdida completa del brillo. La resistencia a temperaturas elevadas, se indica por pérdida de peso, después de someter la muestra a una solución de ácido cítrico a 6% y temperatura de ebullición durante 2.5 horas. Los esmaltes de vidrio, son atacados por el ácido fluorhídrico y alcalis caústicos. Sin embargo, se han desarrollado fórmulas con buena resistencia a soluciones alcalinas como las presentes en los procesos de fabricación de detergentes.

Las propiedades de brillo, color, resistencia a la abrasión, naturaleza inerte, facilidad de limpieza y resistencia a la temperatura acoplada a la resistencia al choque térmico, permiten el uso de los recubrimientos de vidrio en una gran variedad de aplicaciones. Gran cantidad de reactores, son usados en las industrias: química, farmacéutica, alimenticia y de bebidas en donde la pureza del producto y la facilidad de limpieza del equipo son de suma importancia.

1.3.4 Vidrios, Cerámica.

Este es un campo nuevo en la tecnología del vidrio, que consiste en la conversión del vidrio a un compuesto formado por el vidrio mismo y pequeños gránulos o cristales. Se basa en la formación de núcleos heterogéneos y crecimiento de cristales, sin el uso de ningún dispositivo externo. Este proceso descubierto por Stookey, se logra por el uso de un ingrediente menor; el agente nucleante, que puede ser precipitado como un cristal o un líquido no miscible, en concentraciones de la siguiente magnitud: 10^{10} núcleos/ mm^3 de vidrio. El proceso ocurre a temperaturas a la que estas fases pequeñas pueden provocar que las fases mayores o cristales del vidrio formen núcleos y crezcan. Durante este tratamiento, ocurren cambios dimensionales de 1 a 2% dependiendo de la composición tiempo y temperatura, por lo cual los productos se deben soportar si es necesario, con el fin de reducir su deformación. Como agentes nucleantes se pueden usar además de los coloides metálicos, el óxido de titanio y titanatos, óxido crómico, pentóxido de fósforo, dióxido de zirconio, sulfuros de zinc y fluoruros.

Se han obtenido productos cerámicos muy densos, de grano fino combinado el proceso de formación de vidrio y los procesos de formación de cerámicas mencionadas anteriormente. Esto permite la fabricación de una nueva clase de materiales con propiedades útiles y únicas que no se logran con ningún otro método de manufactura.

El primer producto (Vidrio-cerámica), obtenido para fines comerciales, fué el 9606, un aluminosilicato de magnesio para el cual se usó como agente nucleante el dióxido de titanio. Este material se desarrolló inicialmente por sus propiedades eléctricas y dieléctricas a frecuencias ultra altas y temperaturas altas. Su aplicación más importante es en el campo de transmisores de microondas y cohetes teledirigidos.

El contenido de cristales de estos vidrio-cerámicas que está entre 20 y 50% aumenta considerablemente la estabilidad térmica, la resistencia al impacto y la resistencia al uso, de tal modo que puede emplearse para proteger los metales químicamente y termomecánicamente de por ejemplo la acción corrosiva del ácido sulfúrico a 345 °C, y el ácido clorhídrico a 600 °C, agentes oxidantes vigorosos a 260 °C y cloro y Tetracloruro de carbono a 315 °C, así como suspensiones abrasivas con ácido a 170 °C. The Pfaudler Co., produce un esmalte de alta resistencia para cubrir los reactores de acero, le denomina NUCERITE*

Este producto lo obtiene con un procesos similar al usado para vidrios-cerámica, pero su contenido cristalino es intermedio entre los vidrios opalinos y los vidrios cerámica.

1.3.5 Glasteel*

La compañía Pfaudler, produce esmaltes de alta resistencia para cubrir reactores de tipo intermitente y otros equipos como tube-

(*) Marca Registrada

rías, agitadores, mamparas, tanques de almacenamiento, etc., que se usan en el procesamiento de productos químicos.

Los tipos de esmalte que esta compañía aplica en sus reactores -- son los siguientes:

- a) Un vidrio de boro-sílice de alta calidad, comparable al usado para equipo de laboratorio.
- b) Un vidrio tipo cerámica que se obtiene como resultado de la cristalización controlada durante la fusión de cristales homogéneos, denominado NUCERITE*.

1.3.5.1 Vidrio de Boro-Sílice.

Este vidrio con un contenido de sílice entre 65 y 80% es muy semejante en su comportamiento químico a los vidrios blandos de carbonato de sodio, es resistente a casi todos los medios corrosivos, aún a altas temperaturas, con excepción del ácido fluorhídrico y de los álcalis concentrados a alta temperatura. Debido a su estabilidad estructural es inmune a los efectos de oxidación y reducción, por lo cual se puede usar en los siguientes procesos: Hidrólisis, Cloración, Sulfonación, Nitración, Electrólisis en medio ácido y recuperación de ácido crómico. Es resistente a sales inorgánicas fundidas, ya sea con características ácidas, neutras o débilmente básicas. Aún los halógenos (cloro, bromo y yodo), no atacan este tipo de vidrio.

Este vidrio protege a los reactivos químicos y productos que se -

(*) Marca Registrada

están procesando, contra posibles contaminaciones particularmente contra metales. Este es el caso de los fabricantes de productos orgánicos e inorgánicos. Podemos mencionar como ejemplo la síntesis de vitaminas y la producción de fosfato de zinc. Por tal razón el "Glasteel"* (este es el nombre que le da Pfaudler al material formado por el metal y la capa de vidrio), tiene gran aplicación en la fabricación de productos farmacéuticos, plásticos y colorantes, además como los recipientes se pueden esterilizar, -- también se obtiene la protección contra infección y contaminación bacteriana.

Considerando los aspectos de seguridad, del proceso desde el punto de vista de calidad, tenemos que estos dependen de la neutralidad química y biológica del material de construcción, esta ventaja que obtenemos con el "Glasteel"* es muy importante para productos sujetos a un control de calidad muy riguroso. Por otra parte la seguridad del proceso, también esta determinada por las propiedades de la superficie del vidrio. Las interfases, formadas al fundir el vidrio, no son únicamente lisas sino también estructuralmente saturadas, y por lo mismo anti-adhesivas. De este modo la superficie evita que se pegue, adhiera o coagule cualquier material, asegurando y facilitando las reacciones térmicamente y una transmisión constante de calor, por estas razones los equipos de acero vidriado tienen gran uso en las industrias de polimerización, además la facilidad de limpieza de las superficies de este mate--

(*) Marca Registrada

rial evitan largos tiempos de paro, lográndose de este modo ahorros en los costos de operación.

1.3.5.1.1 Sistema de identificación.

Actualmente, Pfaudler identifica sus tipos de vidrio por medio de un sistema de numeración de 4 cifras. Los primeros dos dígitos, representan la formulación del vidrio, el tercer dígito indica el color, como sigue:

- 001 - Azul cobalto
- 002 - Blanco
- 003 - Verde
- 004 - Color especial,

el cuarto dígito designa el tipo de inspección:

- 0001 - Inspección visual
- 0003 - Prueba a bajo voltaje
- 0005 - Prueba a alto voltaje

Ejemplo:

Formulación del vidrio $\overline{31}$ $\overline{15}$ Prueba a alto voltaje
Color azul cobalto

1.3.5.1.2 Selección del tipo de vidrio.

Tipo 3115 Para condiciones severas (Reactores)

Resistentes a todos los ácidos orgánicos e inorgánicos, a una temperatura mayor que 110 °C, excepto ácido fluor

hídrico y ácido fosfórico concentrado. Resistente a soluciones alcalinas desde 150 °C . . . 50 °C . . . dependiendo de la concentración.

Tipo 3113 Para tanques de almacenamiento

Para almacenar o procesar soluciones ácidas y alcalinas las cuales no exceden temperaturas de 82 °C en servicio continuo.

Tipo 3111 Particularmente útil en procesos de polimerización

Para productos químicos neutros a bajas temperaturas. - Principalmente usados para proteger productos de la contaminación y evitar la adherencia de coagulantes.

1.3.5.1.3 Aplicación del recubrimiento de vidrio.

La aplicación de este recubrimiento se hace siguiendo los procesos en húmedo y en seco para recipientes o para piezas de hierro fundido, respectivamente descritos en la parte inicial de esta sección, haciendo los cambios adecuados en los productos químicos y en los procesos para obtener equipos de buena calidad. El diagrama de flujo de la Fig. 1.9, describe el proceso utilizado por Pfaudler.

1.3.5.1.4 Resistencia química.

Vidrio tipo 3100.

FALLA

DE

ORIGEN.

SERVICIOS DE

MICROFILMACIÓN

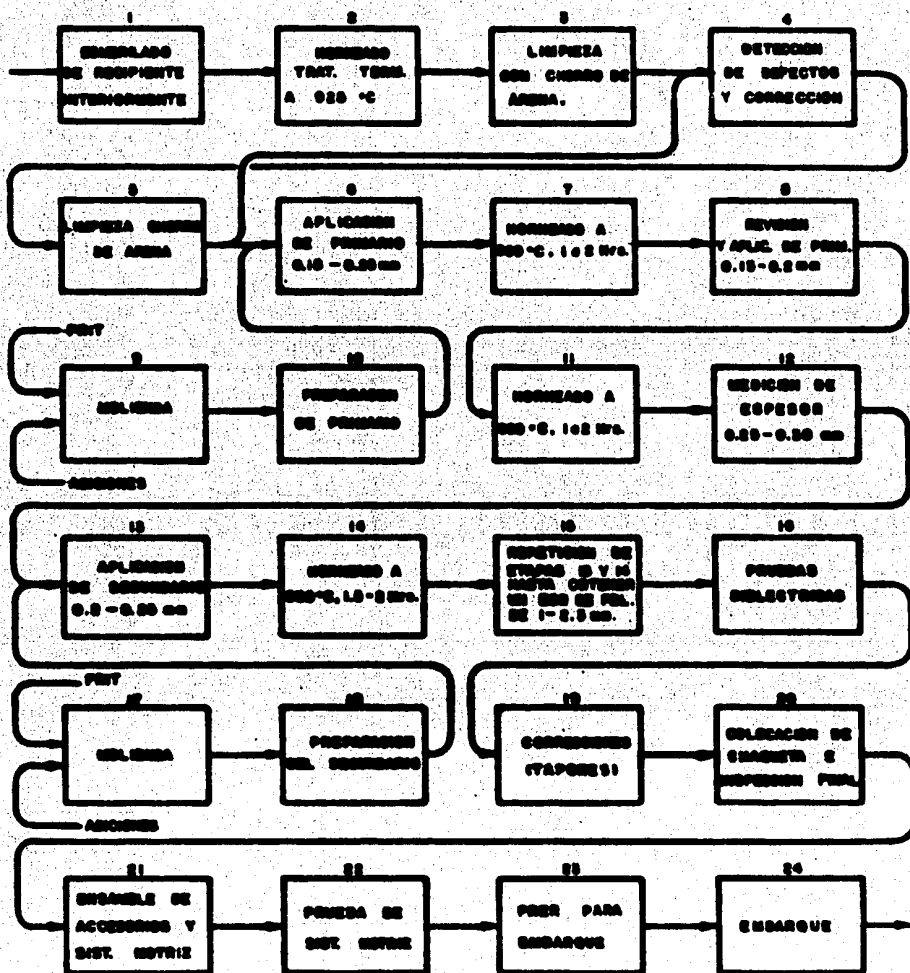


FIG. 1.0.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROCESO DE VORADO EN °PFAUDER

- a) Acidos. Las curvas de corrosión mostradas en los diagramas siguientes, para diferentes grados de corrosión por año, determinan los límites de aplicación para el vidrio, bajo uso continuo. Las líneas que continúan a la derecha de las curvas, consideran el uso ocasional, pero sin seguridad.

La resistencia al ataque por los ácidos, está basada principalmente en el contenido de sílice, esta resistencia depende en parte del estado físico de los ácidos o de los tipos. En relación con el estado, podemos dividir a estos en hidratados y anhídros. En el caso de los anhídros, no se presenta la hidrólisis ni la disociación, de ahí que se espera la resistencia óptima a la corrosión, para esta situación.

La influencia de la concentración es más importante. En términos generales a mayor concentración mayor aumento en la resistencia excepto para el ácido fosfórico. (Ver figuras - - 1.10 a 1.14).

- b) Alcalis. En procesos cuyas condiciones son completamente -- anhídras, las bases orgánicas y los compuestos organometálicos, incluyendo álcalis orgánicos, no presenta problemas en el vidrio. Esto, desafortunadamente no ocurre con las bases inorgánicas fuertes, lo cual se puede deducir de las gráficas (Ver figuras 1.15, 1.16 y 1.17).
- c) Agua. En estado líquido, puede ser comparada con los ácidos.

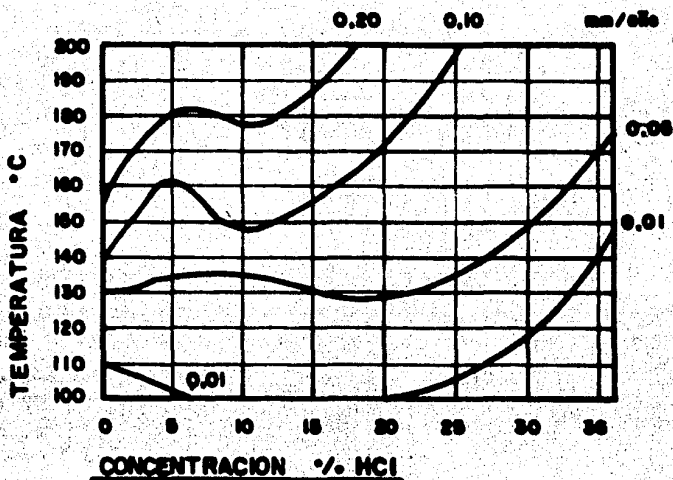


FIG. I.10.- GRADOS DE CORROSION EN PRESENCIA DE ACIDO CLORHIDRICO
 (ESTA GRAFICA PUEDE USARSE TAMBIEN PARA ACIDO BROMHIDRICO,
 YODHIDRICO Y CLOROACETICO.)

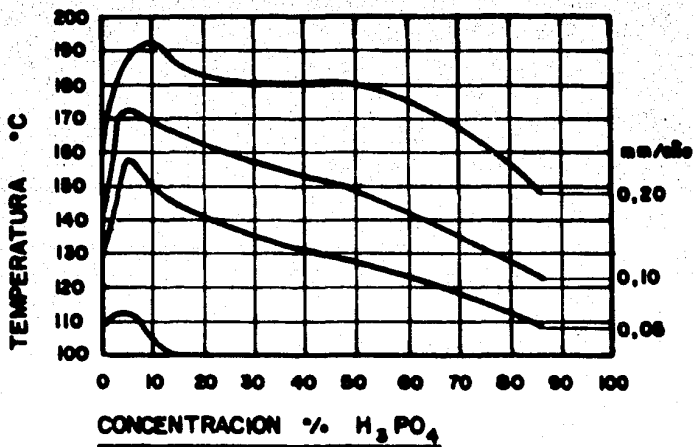


FIG. I.11.- GRADOS DE CORROSION EN PRESENCIA DE ACIDO FOSFORICO
 LOS DATOS DE ESTA GRAFICA SE OBTUVIERON CON ACIDO FOS-
 FORICO Q.P. , YA QUE EL GRADO TECNICO, ESTA CONTAMINADO
 CON ACIDO FLUORHIDRICO.

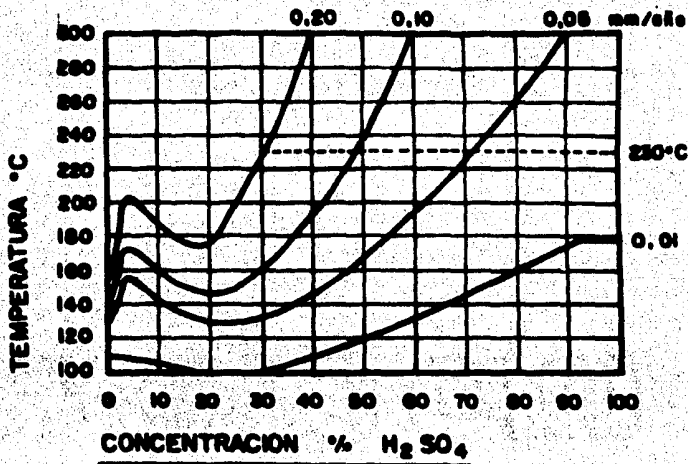


FIG. 1.12.- GRADOS DE CORROSION EN PRESENCIA DE ACIDO SULFURICO.
(ESTA GRAFICA TAMBIEN ES APLICABLE AL ACIDO SULFUROSO)

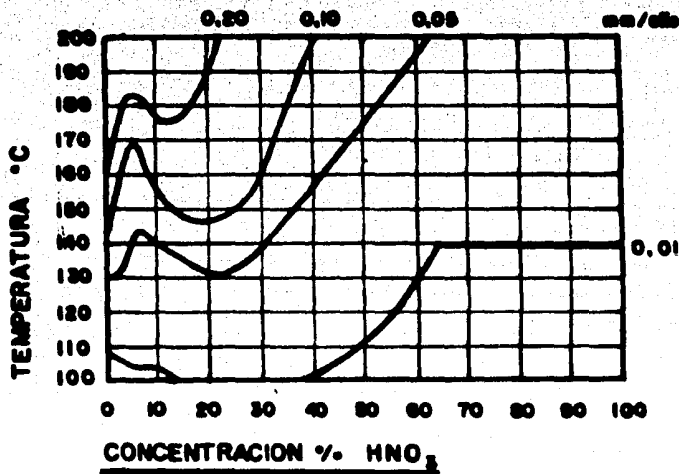


FIG. 1.13.- GRADOS DE CORROSION EN PRESENCIA DE ACIDO NITRICO.
(ESTA GRAFICA TAMBIEN ES APLICABLE AL ACIDO NITROSO)

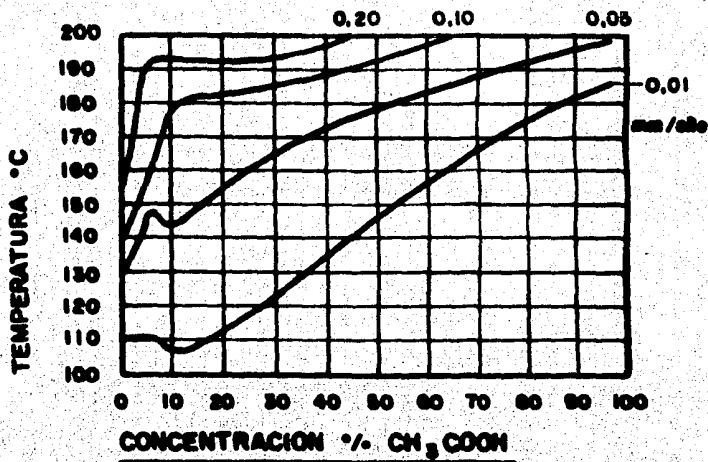


FIG. 1.14.-

GRADOS DE CORROSION EN PRESENCIA DE ACIDO ACETICO
 ESTA GRAFICA TAMBIEN REPRESENTA LAS CARACTERISTICAS
 DE COMPORTAMIENTO DEL VIDRIO A UN CIERTO NUMERO
 DE ACIDOS ORGANICOS MEDIANAMENTE FUERTES.

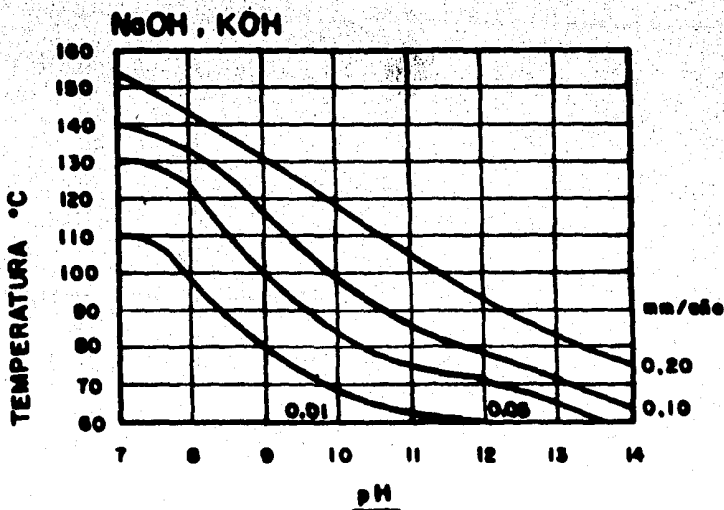


FIG. 1.15.-

GRADOS DE CORROSION EN PRESENCIA DE HIDROXIDO DE SODIO
E HIDROXIDO DE POTASIO

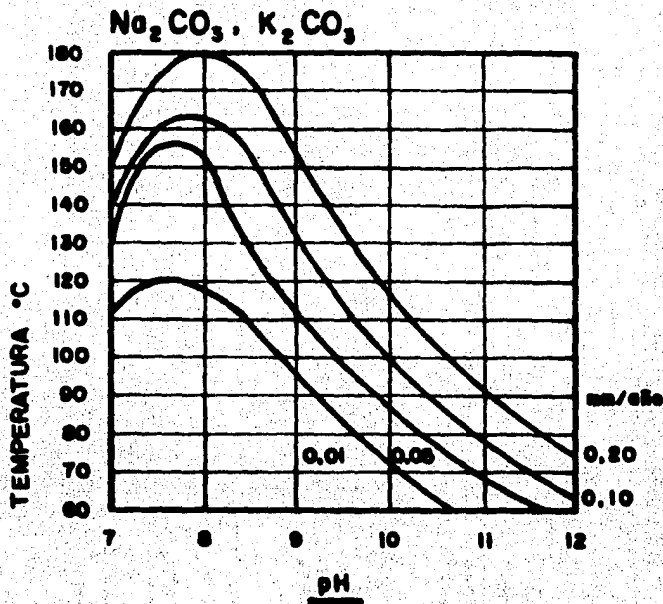


FIG. 1.16. GRADOS DE CORROSION EN PRESENCIA DE CARBONATO DE SODIO Y CARBONATO DE POTASIO.

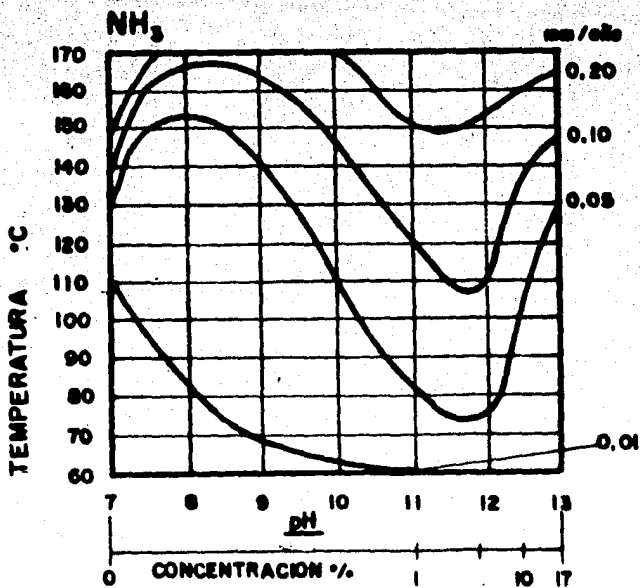


FIG. 1.17. GRADOS DE CORROSION EN PRESENCIA DE AMONIACO

Primeramente el agua disuelve las capas de vidrio superficiales, tornándose alcalina dejando las capas pasivas de sílice.

La alcalinidad en una gota de agua condensada, aumenta su pH a 9 debido a su diminuto volumen. En la siguiente etapa y -teniendo ya el agua propiedades alcalinas, disuelve los componentes ácidos de la estructura del vidrio. Este ataque alternante que ocurre con cada condensación de una gota, da como resultado el ataque típico del vapor saturado el cual representa siempre un serio problema por lo cual la temperatura máxima permitida para el vidrio 3100 para agua líquida y vapor saturado es 140 °C.

En la tabla No. 1.4 se presenta una lista de productos a diferentes concentraciones y temperaturas y el comportamiento del vidrio 3100 para cada uno de ellos, con respecto a la resistencia a la corrosión de estos productos. Esta tabla es ta basadas en experiencias prácticas.

1.3.5.2 Nucerite *.

Este compuesto es un vidrio tipo cerámica que se obtuvo como resultado de la cristalización controlada (formación de cristales), durante la fusión homogénea del vidrio.

Actualmente Pfaudler puede ofrecer Nucerites con diferente composición y concentración de cristales que son útiles especialmente

(*) Marca Registrada

FALLA

DE

ORIGEN.

SERVICIOS DE

MICROFILMACIÓN

TABLA N°1.4 - DATOS DE CORROSION PARA VIDRIO 3100* Y NUCERITE C20G*

Producto Químico	Concentración	Temp. °C	Grado de Resistencia	Producto Químico	Concentración	Temp. °C	Grado de Resistencia
Acetato de plomo		300	1	Hidrasina hidrato		100	1
Acético ácido		150	V.F.114	Hidrasina sulfato de	10% S.A.	150	1
Acrílico ácido		150	1	Hidrasina sulfato de	30%	70	1
Agua		150	V.F.110	Hidrasina sulfato de		150	1
Agua regia		300	1	Isocamílico alcohol		150	1
Aluminio acetato de	S.A.	110	1	Isopropílico alcohol	92%	P.E.	1
Aluminio clorato de	10% S.A.	P.E.	1	Láctico ácido	4% S.A.	80	1
Aluminio cloruro de		250	1	Lítio cloruro de	S.A.	100	1
Aluminio cloruro de		170	1	Magnésico carbonato	S.A.	150	1
Amino-etano		150	1	Magnésico sulfato	S.A.	180	1
Amino-Fenol		130	1	Malónico ácido		200	1
Amino-Fenol ácido sulfónico			V.F.117	Metanol			
Amoníaco (gas)	S.A.	P.E.	1	Metil éter del ácido		150	1
Amonio carbonato de	10% S.A.	150	1	O-hidroxí-benámico		300	1
Amonio cloruro de	S.A.	P.E.	1	Monocloroacético ácido	50% S.A.	315	1
Amonio nitrato de	S.A.	P.E.	1	Naftaleno		V.F.113	
Amonio fosfato de	S.A.	P.E.	1	Nítrico ácido		150	1
Amonio sulfato de	S.A.	320	1	Nitrobenzol		200	1
Amonio sulfato de	S.A.	80	1	Nitrogeno sulfato del		V.F.113	
Amonio sulfuro		184	1	Nitrato ácido		140	1
Anilina		220	1	Octanol		150	1
Antimonio cloruro de (III)		120	1	Orto-hidroxibenámico ácido		170	1
Antimonio cloruro de (IV)		120	1	Oleum (10% SO3)	50% S.A.	150	1
Azufre		200	1	Oxálico ácido	Cristales	160	1
Azufre dióxido de	S.A.	P.E.	2	Oxálico ácido		110	1
Bario hidróxido de	S.A.	150	1	Palmitico ácido	70%	P.E.	1
Barita		150	1	Paralítico ácido		150	1
Benzaldehído		250	1	Picrico ácido		P.E.	1
Benceno		150	1	Piridina		P.E.	1
Benzoico ácido		130	1	Piridina cloruro de	5% S.A.	P.E.	1
Benzil-cloruro	S.A.	150	1	Piroglúico ácido		90	1
Bórico ácido			V.F.110	Pirrolidina		200	1
Bromhídrico ácido		100	1	Potasio bisulfato de	S.A.	P.E.	1
Bromo		140	1	Potasio bromuro de	S.A.	P.E.	V.F.116
Butanol	S.A.	170	1	Potasio carbonato de	S.A.	P.E.	1
Calcio cloruro de (libre de CaO)		150	1	Potasio cloruro de	S.A.	P.E.	V.F.115
Carbamida		250	1	Potasio hidróxido de		P.E.	2
Carbónico ácido	S.A.	150	1	Sodio bicarbonato de	S.A.	P.E.	1
Carbónico ácido	S.A.	200	1	Sodio bisfosfato de	50% S.A.	300	1
Carbono tetracloruro de	S.A.	150	1	Sodio bisulfato de	25% S.A.	160	1
Clorhidroclorito de calcio		180	1	Sodio hidróxido de	S.A.	P.E.	V.F.116
Clorada parafina		180	1	Sodio carbonato de	S.A.	80	1
Clorada agua			V.F.110	Sodio cloruro de	S.A.	P.E.	1
Clorhídrico ácido		200	1	Sodio cloruro de	S.A.	P.E.	1
Cloro		150	1	Sodio citrato de	S.A.	80	2
Clorosulfónico ácido	S.A.	150	1	Sodio cloruro de	S.A.	150	1
Crómico ácido		200	1	Sodio cloruro de	S.A.	70	V.F.115
Crómico sulfúrico ácido	10% S.A.	P.E.	1	Sodio cloruro de	S.A.	140	1
Crítico ácido	5% S.A.	150	1	Sodio cloruro de	S.A.	130	1
Cúprico cloruro	S.A.	150	1	Sodio cloruro de	S.A.	110	1
Cúprico sulfato	S.A.	100	1	Sodio cloruro de	4% S.A.	80	2
Cianoacetamida		100	1	Sodio cloruro de	30% S.A.	180	1
Ciano acético ácido		220	1	Succínico ácido		150	1
Dicloro benzeno		150	1	Sulfídrico ácido		200	1
Dicloro acético ácido		100	1	Sulfuro de carbono			V.F.112
Dietilamina		150	1	Sulfúrico ácido		150	1
Dietilamina propanol		150	1	Sulfuroso ácido		200	1
Dimetil sulfato		100	1	Tánico ácido	75% S.A.	150	1
Eter		200	1	Tartárico ácido		150	1
Etil alcohol		100	1	Tetracloretileno		150	1
Fenol		100	1	Tolueno		150	1
Fenolftaleína		150	1	Tricloroacético ácido		80	1
Férrico cloruro	S.A.	20	3	Trisódico fosfato	5% S.A.	200	1
Fluor alcalino		150	1	Yodo		130	1
Formaldehído	2% S.A.	200	2	Yodhídrico ácido	60% S.A.	P.E.	1
Fórmico ácido	98%	180	1	Zinc bromuro de	S.A.	330	1
Fórmico ácido				Zinc cloruro de	S.A.	140	1
Fósforo oxiclорuro de (libre de P)	S.A.	110	1				
Fosfórico ácido (libre de P)		90	1				
Fosfórico etil éter							
Fósforo tricloruro de (libre de P)		100	1				
Fosfórico anhídrido		260	1				
Glicerina		100	1				
Glicol		150	1				
Grasas ácidas		150	1				

(*) Marcas registradas de THE PFANNKOPF CO.

NOTA : Los datos de esta tabla, están basados en la experiencia práctica y pruebas de laboratorio de productos vidriados de PFANNKOPF.

para recubrir aceros aleados, tales como el inconel, aceros de -- cromo y cromo-níquel. Las propiedades físicas que se pueden obtener de la unión de aceros para alta temperatura y Nucерites con una concentración alta de cristales, son óptimas.

Se tienen dos tipos de Nucерites:

- a) Nucерite C 20*. Se ha diseñado especialmente para cubrir aceros al carbono. Dependiendo del uso que se vaya a dar al reactor, la capa puede ser hasta de 2 mm. El proceso usado para su aplicación difiere bastante del usado para el recubrimiento con esmaltes de vidrio 3100, por ejemplo, se necesita un tratamiento térmico adicional, para lograr el crecimiento de los cristales y el control de la desvitrificación. La adhesión del Nucерite C 20* al acero al carbono, es comparable al del mejor esmalte vidriado. Haciendo un análisis con el servicio químico convencional de los esmaltes vidriados, el Nucерite C 20*, es superior con respecto a propiedades mecánicas y térmicas. Se pueden puntualizar las siguientes mejoras: temperaturas de fusión más altas, aumento de la conductividad térmica, mayor dureza de la superficie, mayor resistencia a la tensión, compresión y corte así como un módulo de elasticidad mayor consecuentemente un aumento inicial a la tensión en el recubrimiento. El vidrio remanente en el proceso de cristalización el cual está libre de cavidades y que tiene en dispersión una cantidad innumerable de --

(*) Marca Registrada

cristales no puede romperse. Cada rompimiento de la superficie causado por un efecto mecánico o térmico es detenido inmediatamente por un efecto de bloqueo de los cristales.

El empleo de Nucerite* directamente se aconseja para procesos a alta temperatura arriba de 300 °C en donde estará sujeto a la abrasión o bien donde debe actuar como aislante.

- b) Nucerite C 20G*. Este tipo de Nucerite, tiene una capa adicional de 0.2 a 0.3 mm de espesor de vidrio fundido sobre el Nucerite.

Aunque el Nucerite sin capa adicional de vidrio, tiene una buena resistencia química, su baja temperatura de fusión origina la necesidad de la aplicación extra de una capa de vidrio. Por otra parte, la capa final de vidrio le imparte a la superficie áspera de la cerámica, el acabado liso y terso típico de un cristal.

1.3.5.2.1 Propiedades químicas y térmicas.

Las propiedades químicas y las características superficiales del Nucerite C 20G* están determinadas por la capa de vidrio. De las tres capas de este material, la última capa es la que aporta prácticamente la extremada resistencia química, debido a que es rica en silicatos con una temperatura alta de fusión, además de que los mismos componentes constituyentes del vidrio, favorecen la re

(*) Marca Registrada

sistencia química. En caso de que la capa de vidrio sea dañada, quedará el Nucerite C 20*, el cual además de ser 3 a 6 veces el espesor de dicha capa exhibirá su excelente resistencia mecánica. Es conveniente puntualizar que la resistencia química del Nucerite C 20* (sin capa de vidrio), es un poco inferior que con capa - pero no tanto que no pueda ser utilizado sin la mencionada capa de vidrio.

- a) Estabilidad de oxidación y reducción. La estabilidad de la estructura es excelente contra todos los efectos causados -- por la oxidación o reducción. En la Fig. 1.18, se ha comparado el Nucerite y el vidrio para servicio con productos químicos contra otros materiales metálicos de uso común cuando están en presencia de ácidos. La posibilidad de aplicación a medios oxidantes o reductores, se indica por la localización y longitud de las barras para los materiales correspondientes. Se podrá observar que la gráfica se ha dividido en dos partes; soluciones ácidas con presencia de cloruros y soluciones ácidas sin presencia de cloruros.

Como aplicaciones particulares, se puede mencionar la hidrólisis, cloración, bromación, sulfonación, nitración, precipitación de minerales en medio ácido y recuperación de ácido - crómico.

- b) Productos inorgánicos. El Nucerite C 20G* tiene un alto grado de resistencia contra todos los ácidos inorgánicos, así como

(*) Marca Registrada

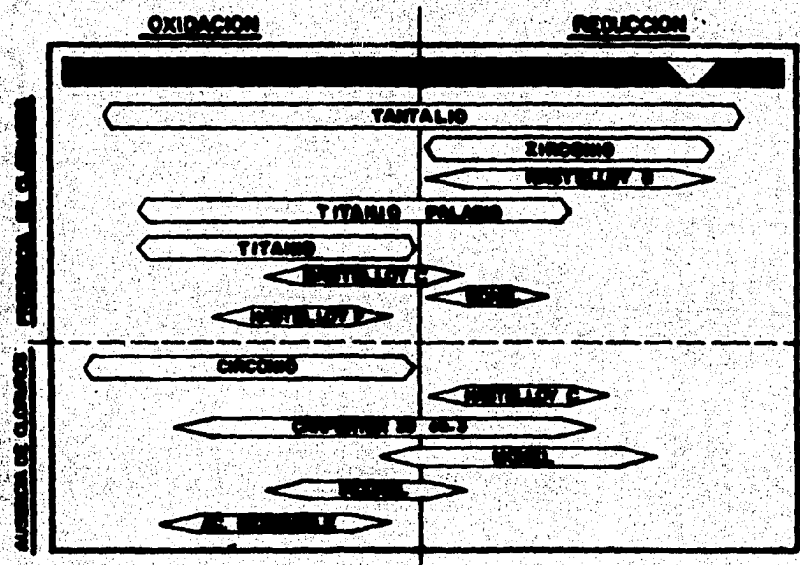


FIG. 1.16.- CAMPO DE APLICACION DEL VIDRIO Y EL NUCERITE EN COMPARACION CON OTROS MATERIALES SUJETOS A DIFERENTES MEDIOS.

a medios neutros o ligeramente alcalinos. No se han determinado efectos en presencia de agua a temperatura abajo de 100 °C. La máxima estabilidad se ha observado con líquidos ácidos anhidros y gases no condensables.

- c) Agua. Debido a la variable agresividad del agua, se ha dividido esta en: fase líquida, vapor saturado (condensable) y vapor sobrecalentado. En todos los casos, el Nucerite C 20G* es totalmente resistente al agua a temperaturas hasta de 100 °C. Arriba de 100 °C, la influencia de la temperatura, es perceptible primeramente con la condensación del vapor. A 140 °C y en servicio continuo provoca opacidad en la superficie. Para evitar este efecto, se recomienda aislar por el exterior la zona de vapores en el recipiente ó acidificar ligeramente el vapor, si es posible, por ejemplo con 0.5% de ácido acético. En la fase líquida, la influencia de la temperatura, se presenta solo cuando ésta es alta, aumentando rápidamente conforme se va elevando. El límite del material es 170 °C, en estas circunstancias el ataque se presenta en la fase líquida. En estos casos una ligera disminución del pH se convierte en una rápida elevación de la resistencia y quedando por lo tanto, la aplicación dentro de los límites del vidrio.

Para agua en fase líquida, así como vapor saturado, el límite de aplicación del Nucerite C 20G* es 140 °C. En el caso

(*) Marca Registrada

de vapor saturado, las pruebas de corrosión a 400 °C no presentan cambios en la película de vidrio de este material.

- d) Halógenos. La alta resistencia química del Nucerite C 20G*, permanece totalmente inafectada por la presencia del cloro, bromo y yodo que para otros materiales representan problemas serios.
- e) Fluor. Las excepciones son el ácido fluorhídrico y soluciones de compuestos de fluor. Estas sustancias, atacan a los silicatos aún a bajas concentraciones y temperaturas. La presencia de 0.02% de fluoruros en servicio no continuo y -- aún concentraciones de 0.001% en servicio continuo atacan al vidrio poniéndolo opaco y áspero. Tales cantidades, tan bajas, pueden resultar del contacto de ácidos calientes con una tubería recubierta de teflón, (PTFE) de cierta longitud.

Sin embargo, el Nucerite C 20G* puede usarse con soluciones contaminadas con fluoruros, si el proceso en cuestión permite la adición de ácido silícico en cantidades equivalentes a los compuestos de fluor. Estos ácidos, "neutralizan" los fluoruros de la solución de acuerdo con la reacción:



Por ejemplo, se pueden usar como productos neutralizadores - la gel de sílice, o el aerosil. Es aconsejable mezclarlo en

(*) Marca Registrada

el producto frío antes de llenar el reactor. Ya que cantidades despreciables de fluor pueden combinarse en el recipiente a temperatura ambiente, por seguridad, se recomienda agregar ácido silícico en cantidades equivalentes para "neutralizar" el contenido de fluoruros de la carga.

1.3.5.2.2 Limitaciones térmicas.

Los límites de aplicación del Nucerite C 20* y del Nucerite C 20G* están determinados por el grado de corrosividad que aumenta con el incremento de temperatura o por las propiedades físicas del Nucerite. El Nucerite C 20G*, permanece totalmente inerte a productos orgánicos, independientemente de su estado; a la mayor parte de ácidos inorgánicos, a sales neutras y a gases no condensables.

La resistencia del Nucerite C 20G* contra soluciones acuosas y un gran número de sales alcalinas, depende de la temperatura. Cuando se manejan soluciones acuosas de ácidos, en condiciones normales, la influencia de la temperatura aparece solo con valores mayores al punto de ebullición. En cambio cuando se tratan soluciones acuosas alcalinas, los límites de temperatura para la aplicación del Nucerite C 20G* disminuyen grandemente. La Fig. 1.19, muestra la resistencia del Nucerite C 20G* a condiciones ácidas y alcalinas en función de la temperatura. Está basada en el grado de corrosión de 0.1 mm/año y el promedio de una variedad de soluciones acuosas ácidas y alcalinas.

(*) Marca Registrada

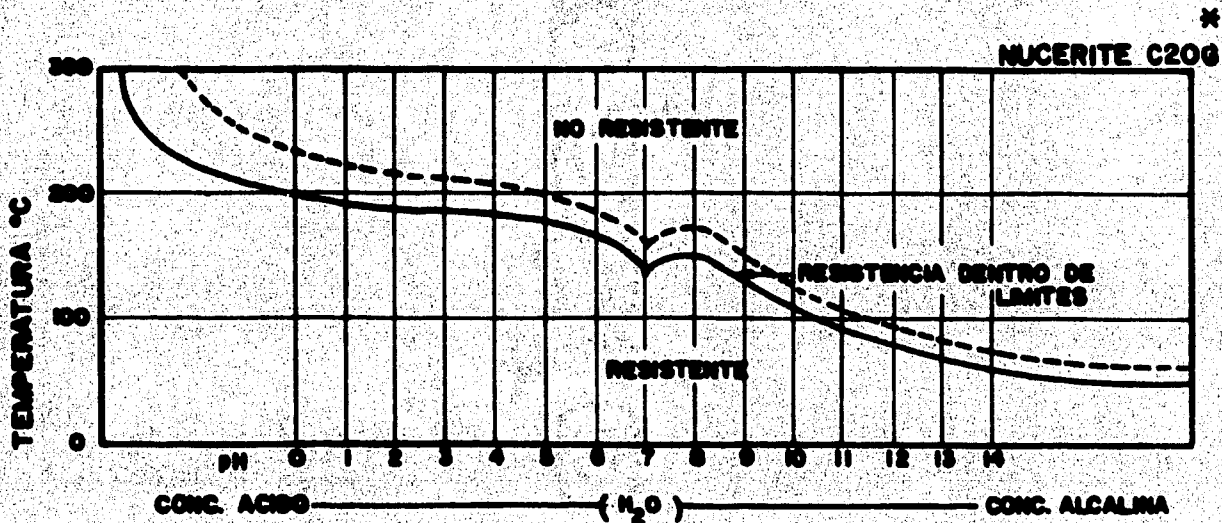


FIG. 1.18.- CURVA CARACTERISTICA DE RESISTENCIA A ACIDOS Y ALCALIS
(BASADO EN LA CURVA DE CORROSION DE 0.1mm/AÑO)

(*) MARCA REGISTRADA.

La información detallada de la influencia de la temperatura para los ácidos más comunes y álcalis se muestran en las figuras 1.10 a 1.17.

Las cristalizaciones durante el proceso de formado del Nucelite, elevan la temperatura a la que normalmente se reblandece el vidrio, por lo tanto el límite de aplicación para el Nucelite C 20*, se aumenta a 750 °C. Para el Nucelite C 20G* el límite está alrededor de los 450 °C. Se debe considerar que los aceros al carbono pueden usarse a temperaturas entre 300 y 400 °C en caso de temperaturas mayores, será necesario usar aceros resistentes al calor.

Hasta la fecha, no ha sido posible determinar el límite inferior de temperatura a la cual aún es posible la aplicación del Nucelite C 20G*. Los límites están determinados por los daños mecánicos que puede sufrir el metal base. El límite inferior en estos casos es de (-10 °C) para aceros no aleados.

La combinación de las tres capas del Nucelite C 20G* conduce a diferentes coeficientes de expansión. Esto determina la pérdida de los esfuerzos a compresión en la última capa (la de vidrio) al aumentar la temperatura. Por tanto la resistencia al choque térmico disminuye. Deben evitarse diferencias de temperatura muy elevadas entre el interior y el exterior de la pared del recipiente. Aún con estas consideraciones, el Nucelite C 20G* resiste el cho-

(*) Marca Registrada

que térmico en un 30% más que el vidrio 3110. Para determinar -- las diferencias de temperatura a que puede operarse un recipiente recubierto con Nucerite, ver Capítulo 5.

1.3.5.2.3 Conductividad térmica.

La estructura de los cristales, permite excelentes propiedades de transmisión de calor para el Nucerite C20G* comparándolo con los esmaltes vidriados. Los coeficientes de transferencia mejoran en un 30%. Ver la conductividad térmica del Nucerite C 20*, del Nucerite C 20G* y del vidrio 3100 en la Fig. 1.20.

1.3.5.2.4 Resistencia al impacto.

Nuevamente la estructura de los cristales del Nucerite C20* detiene el crecimiento de las grietas, en la matriz del vidrio. Los impactos que normalmente rompen esmaltes vidriados en forma de una concha, no afectan el Nucerite C20*, ó dejan en el solamente una pequeña marca superficial en forma de aplastamiento. Se ha observado que como en los esmaltes vidriados, la resistencia al impacto del Nucerite C 20G* aumenta rápidamente con el espesor de la capa y disminuye en las curvaturas convexas y con la disminución del radio de las esquinas.

(*) Marca Registrada

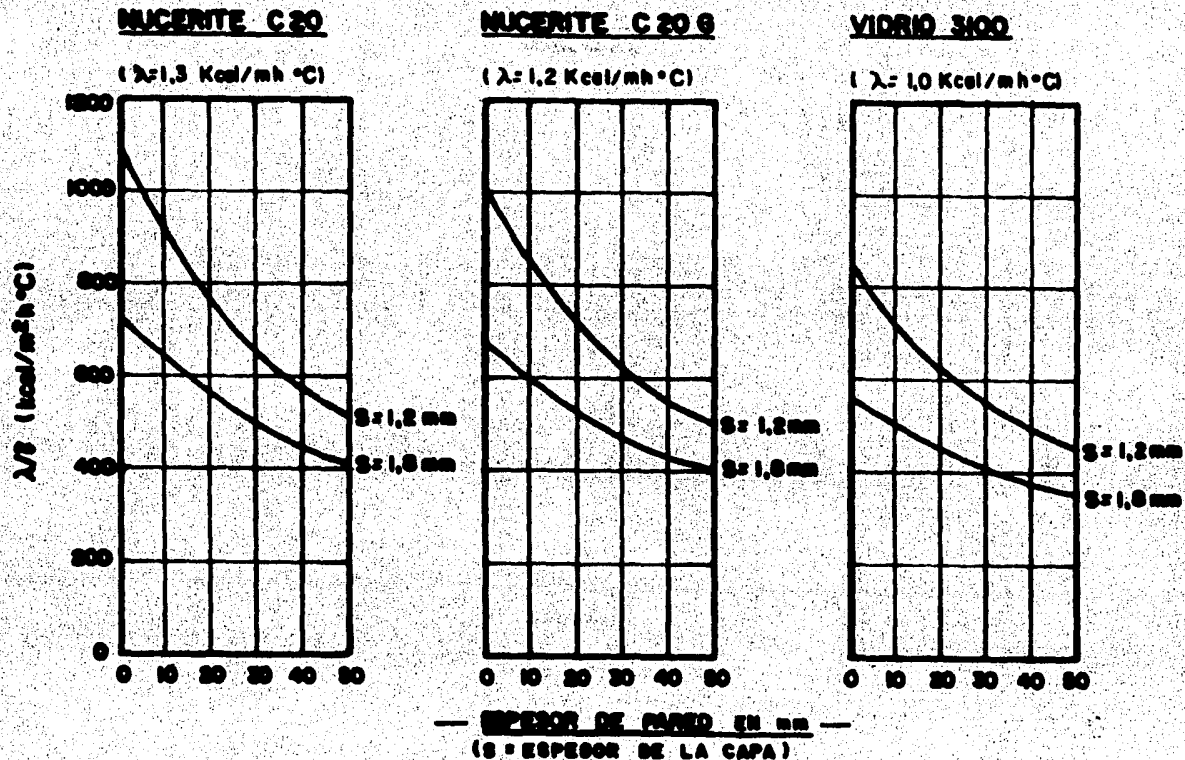


FIG. 1.20.- CONDUCTIVIDAD TERMICA.

C A P I T U L O 2

CONDICIONES DE AGITACION

C A P I T U L O 2.

2. CONDICIONES DE AGITACION.

Como se ha mencionado muy brevemente en la Introducción, la agitación mecánica en un proceso, es necesaria para lograr un buen mezclado, aumentar el área entre las fases y aumentar la transmisión de calor. En sistemas heterogéneos, la velocidad del proceso puede ser una función del diámetro y de la velocidad del impulsor, - del agitador, aunque el área entre las fases depende de la potencia absorbida por unidad de volumen por el sistema. Para un sistema dado y un tipo de impulsor, la potencia necesaria para la agitación se puede obtener usando las ecuaciones propuestas por -- Rushton. Cualquiera que sea el caso, deberán considerarse las -- condiciones en que se está efectuando una agitación y los diferentes aspectos que intervienen, de los cuales podemos mencionar: -- los fluidos, el proceso, el agitador, el recipiente, entre los -- más importantes.

2.1 MOVIMIENTO DEL FLUIDO.

El propósito primario del mezclado de fluidos, es distribuir componentes rápidamente de una manera irregular y lograr homogeneidad. Una vez lograda esta condición, el siguiente paso puede ser una reacción química o el aumento del área de transmisión entre dos fases. El mezclador o agitador, produce en el fluido única--

mente efectos mecánicos. La descarga de la corriente originada por el impulsor, inicia ciertos modelos o patrones de movimiento sobre la masa completa del fluido; esto es el aspecto macroscópico del movimiento del fluido. La turbulencia originada por la discontinuidad de las velocidades adyacentes a la descarga de la corriente del fluido, y por los límites y efectos de separación en la masa del fluido, es el aspecto microscópico del movimiento del fluido. Ambos, el gran movimiento a escala macroscópica, o sea el flujo de la masa y el movimiento pequeño a escala microscópica o sea la turbulencia, son generalmente necesarios para lograr un mezclado rápido. La turbulencia, es generada y distribuida a través del flujo de la masa y lleva la turbulencia a todas las partes del recipiente. Algunas operaciones de mezclado necesitan relativamente, grandes flujos de masa para obtener un mezclado efectivo, mientras que otras necesitan relativamente grandes cantidades de turbulencia. De aquí que es muy valioso entender como un agitador puede lograr una relación deseada de flujo de masa y turbulencia, y a continuación como puede ser determinada la relación óptima para una aplicación particular, sea esta para una simple operación de mezclado o para una reacción química.

Un resultado importante de la turbulencia y su generación es que el momento es transmitido desde corrientes que se están moviendo rápidamente a zonas de fluido con menor movimiento. Por medio de este mecanismo, el fluido es arrastrado y mezclado con las co --

rrientes del flujo que tienen mayor velocidad.

2.2 POTENCIA - FLUJO - TURBULENCIA.

En condiciones normales, durante un proceso de mezclado natural, (corrientes por convección), los componentes de un fluido, se moverán y difundirán libremente. Un agitador, se emplea para producir un movimiento forzado, de tal modo que los componentes se muevan más rápidamente. Para tal fin, se debe gastar energía para causar el movimiento del fluido, de ahí que, sea esencial conocer la potencia necesaria para hacer girar el impulsor, y así poder conocer el tamaño del equipo y el costo de la energía. Por otra parte se pueden lograr grandes o pequeñas relaciones de flujo de masa a turbulencia para la misma potencia, dependiendo del tamaño y velocidad de giro del impulsor. Así pues, diferentes tipos de flujo se pueden alcanzar con la misma potencia consumida, dimensionado adecuadamente los impulsores de tal modo que las necesidades óptimas de un proceso para una aplicación particular sean satisfechas.

La Fig. 2.1, muestra las diferencias entre el flujo de masa y la turbulencia, que pueden lograrse con la misma potencia con impulsores dimensionalmente similares. Un impulsor grande en diámetro, girando a baja velocidad produce una relación flujo a turbulencia muy grande, mientras que un impulsor de diámetro pequeño girando a alta velocidad, dará una relación flujo a turbulencia pequeña.

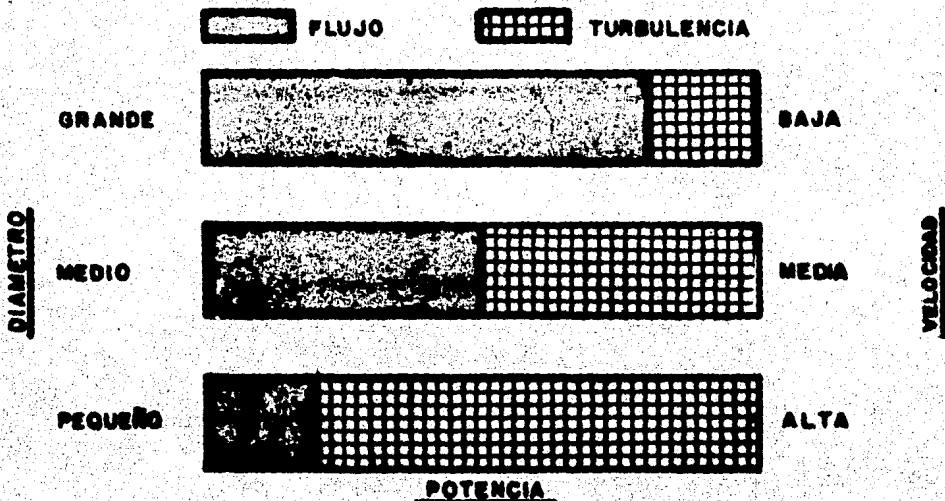


FIG. 2.1 — EFECTO DEL TAMAÑO Y VELOCIDAD DEL IMPULSOR EN EL FLUJO Y LA TURBULENCIA A POTENCIA CONSTANTE.

DOS PROCESOS DIFERENTES, "A" Y "B"

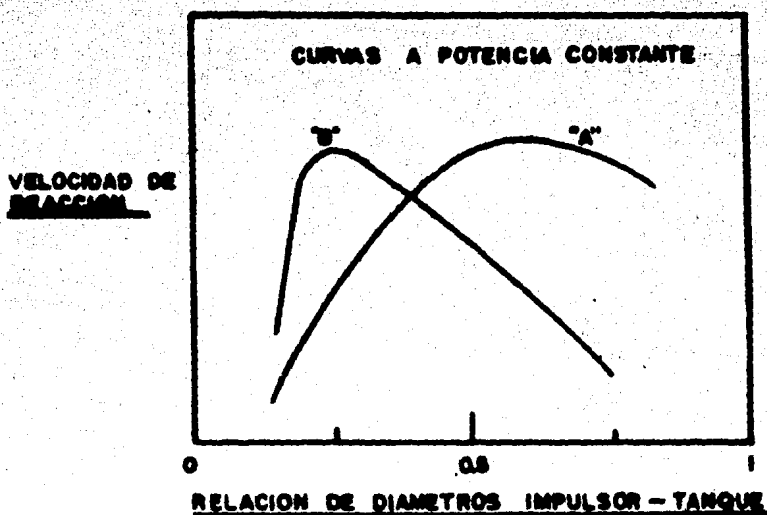


FIG. 2.2.— EFECTO DEL TAMAÑO DEL IMPULSOR SOBRE LA VELOCIDAD DE REACCION A IGUAL CONSUMO DE POTENCIA.

En algunas reacciones en las cuales es necesario el mezclado, se obtienen mejores resultados, con flujo grande y turbulencia pequeña, esto se ilustra en la curva "A" de la Fig. 2.2. Esta curva -- que es característica de operaciones de mezclado, muestra que la velocidad de mezclado, tiende a aumentar conforme aumenta el tamaño del impulsor hasta llegar a un máximo (por supuesto que la velocidad del mismo impulsor disminuye), con un consumo de potencia constante.

La curva "B" de la misma Fig. 2.2, es característica de las operaciones de contacto gas-líquido. En este caso, el grado de transferencia entre las fases aumenta a un máximo para impulsores de diámetro pequeño y luego disminuye conforme se aumenta el diámetro del impulsor. El significado es que se logra una mayor turbulencia con un diámetro de impulsor pequeño. En esta operación es más importante la turbulencia que el flujo.

Ya que es muy fácil ajustar la relación flujo/turbulencia, variando el diámetro y la velocidad del impulsor, podría parecer que se pudiera obtener cualquier relación deseada con solo ajustar estas dos variables. Sin embargo, las consideraciones mecánicas nos limitan la libertad de variar estas relaciones para un impulsor dado.

Conforme tendemos hacia impulsores muy grandes a baja velocidad - con un consumo constante de potencia el torque transmitido aumen-

ta grandemente. Esto significa que el reductor de velocidad que debemos usar, aumenta de tamaño y por tanto se encarece de ahí -- que caemos en las limitaciones económicas. Por otra parte, si in tentamos aplicar la potencia con un impulsor pequeño a velocidad elevada, podemos caer en problemas de vibración excesiva y fle- - xión de la flecha lo cual nos puede traer como resultado, daños - al sello mecánico de la flecha, y por lo tanto fugas y fallas del sistema de agitación completo.

Estos factores han determinado el diseño de diferentes tipos de - impulsores.

El diseño del impulsor puede afectar el patrón de flujo en algu- - nos casos, pero son los aspectos mecánicos los que gobiernan el - criterio del diseño.

El hecho de cambiar de un diseño de impulsor a otro, para resol- - ver un problema ocasionado por aspectos mecánicos, introduce el - factor de la relación flujo-turbulencia a tal grado que no es po- - sible determinarlo teóricamente, por lo cual deberá hacerse expe- - rimentalmente. Es siempre aconsejable considerar las limitacio- - nes mecánicas en la fabricación del equipo y efectuar pruebas pi- - loto con tipos de impulsores que pueden servir de modelos en una escala mayor o a dimensiones reale del equipo.

2.3 IMPORTANCIA DEL TIPO DE IMPULSOR.

En vista de que se ha establecido que la relación de flujo y tur-

bulencia, se pueden variar para un valor de potencia definido, usando diferentes tamaños de impulsores similares dimensionalmente, no es muy conveniente experimentar con una gran variedad de formas y tipos de impulsores. La gran mayoría de las operaciones de mezclado, se logran actualmente con propelas o hélices tipo marino, turbinas con hojas planas o curvas, o con paletas planas. La selección entre estos tipos, está basado en dos consideraciones: el patron de flujo deseado y el costo neto del agitador y su operación. Cuando en el recipiente se proveen mamparas adecuadas o el agitador es localizado correctamente (posición o inclinación) o bien la viscosidad del fluido es tan grande que no existe la -- formación de vórtice, se producen dos tipos de corrientes de flujo con estos impulsores, es decir:

- a) Corrientes verticales provocadas por impulsores tipo propela.
- b) Corrientes horizontales, o radiales provocadas por impulsores tipo turbina o tipo paleta.

La posición de los impulsores, con respecto al fondo del recipiente, a la superficie del líquido y a la pared del tanque pueden tener efectos muy importantes en los modelos o patrones de flujo. - Se pueden encontrar efectos muy peculiares e inesperados aún con turbinas o impulsores, a menos que sean localizados en una posición correcta en el fluido que se está agitando. Por esta razón, se ha puesto especial atención al estudio de los tres tipos principales de impulsor, para lograr el tipo o patrón deseado de movi

miento de fluido y como reproducirlo en equipo de aplicación a escala industrial. En la práctica, evitar cambios en los patrones de flujo durante el mezclado es muy importante; sobre todo cuando en un proceso se han alcanzado las condiciones de régimen permanente, y más aún si se considera que cuando un patrón de flujo -- cambia, también cambia la demanda de potencia del impulsor.

2.4 CONSIDERACIONES TECNICAS.

Para producir agitación y mezclado en fase líquida, son muchos -- los tipos de impulsores usados. Para tal fin es necesario suministrar energía y esto se logra generalmente haciendo girar un imulsor. El grado a que la energía o potencia son suministradas - como se ha visto anteriormente no dependen únicamente del tipo -- del impulsor y de su velocidad de rotación, sino también de las - características del fluido, de la forma del recipiente y de la localización relativa de todos los componentes o partes del sistema, tales como mamparas, serpentines y soportes. De aquí que para determinar el comportamiento de un impulsor es necesario tomar en - cuenta el sistema completo en el cual se está moviendo el agita--dor.

Muchos investigadores han trabajado en aspectos de agitación para establecer métodos de cálculo y diseño de sistemas de agitación. de los investigadores que han aportado material en este tema, podemos mencionar a A. Mcl. White, J.H. Rushton, E.W. Everett, J.Y. Oldshue, A.T. Gretton, etc., a continuación se establece un resumen

de algunos aspectos desarrollados en los trabajos de estos investigadores.

El movimiento de un fluido puede definirse en términos de longitud, masa, tiempo y fuerza para los cuales se usan las siguientes literales L, M, T, y F. Estas son las cuatro dimensiones fundamentales de la mecánica, que si se usa para representarlas, el sistema de unidades inglesas, quedará: el pie para la longitud, el slug para la masa, el segundo para tiempo y la libra para la fuerza. La segunda Ley de Newton, relaciona las cuatro dimensiones y en términos de fuerza se expresa como:

$$F = Ma$$

en la que "a" es aceleración o sea (L/T^2) de donde

$$F = \frac{ML}{T^2}$$

Así que la fuerza y la masa están relacionadas por la longitud y el tiempo, y es posible reducir a tres el número de dimensiones fundamentales para describir el movimiento de un fluido, es decir las dimensiones de masa longitud y tiempo (M-L-T) o pueden ser usadas las dimensiones de fuerza, longitud y tiempo (F-L-T).

Las propiedades de un fluido tales como peso, densidad, viscosidad, tensión superficial y otras similares pueden definirse con las mismas dimensiones M-L-T o F-L-T.

La forma geométrica de un fluido está definida por el recipiente

o por los límites dentro de los cuales se está moviendo el fluido y está definido en términos de longitud.

2.4.1 Principios de Similitud.

Ya que el movimiento del fluido, las propiedades del fluido y las condiciones de frontera pueden describirse en las mismas unidades dimensionales, debe ser posible relacionarlas de tal modo que movimientos similares de un fluido en dos diferentes fronteras, o dos fluidos diferentes, puedan relacionarse entre si. Esta técnica se usa para mostrar la similitud de la mecánica de fluidos en movimiento.

Los principios de similitud, son de gran utilidad para delinear hechos dinámicos. Debe considerarse que únicamente ciertos principios son aplicados a un fluido que está en movimiento en un tanque, en el cual está ocurriendo una operación de mezclado. No cabe duda que la similitud perfecta en el movimiento entre dos sistemas raramente se alcanza, pero una aproximación a la similitud es frecuentemente suficiente para problemas prácticos, y los resultados matemáticos de similitud derivados del análisis dimensional, pueden ser usados en plantas piloto o modelo u otras operaciones.

A continuación se describen los tres tipos de similitudes existentes.

2.4.1.1 Similitud Geométrica.

Relaciona únicamente formas físicas. Hay similitud geométrica, cuando dimensiones correspondientes guardan la misma relación, así que esta existe cuando dos piezas de equipo de diferente tamaño tienen la misma forma.

2.4.1.2 Similitud Cinemática.

Significa similitud de movimiento. Dos movimientos son similares si los patrones o cambios descritos por el movimiento del fluido son semejantes, y cuando las relaciones de velocidades entre puntos correspondientes en cada sistema son los mismos. La similitud geométrica, está implícita en la similitud cinemática.

2.4.1.3 Similitud Dinámica.

Esta se refiere a masas y fuerzas. Dos movimientos son similares dinámicamente, si son similares cinemáticamente, y si la relación de fuerzas en puntos correspondientes son iguales.

2.4.2 Análisis Dimensional.

Las variables que afectan el movimiento del fluido son de tres tipos:

- a) Las dimensiones lineales tales como: D, T, H, C, S, L, W, J, (ver tabla 2.1), las cuales definen totalmente las condiciones de los límites geométricos y de forma para el tanque y -

TABLA No. 2.1 NOTACION

VARIABLES ESTUDIADAS Y GRUPOS USADOS PARA LAS CORRELACIONES

Símbolo	Definición y Dimensión	Grupo Adimensional en el cual es Usado	Función Exponencial para el Grupo o Relación
P	Potencia, pie-lb/seg	N_p	
hp	Caballos de potencia $P \div 500$		
N	Velocidad del impulsor, Rev/seg	N_{Fr} N_p N_{Re}	n
ρ	Densidad del fluido, slug/pie ³ ó lb-masa/pie ³	N_{Re} N_p	m
μ	Viscosidad del fluido, lb-masa/(pie)(seg)	N_{Re}	m
ν	Viscosidad cinemática, pie ² /seg	N_{Re}	m
g	Constante gravitacional, pie/(seg)(seg)	N_{Fr} N_p	n
D	Diámetro del Impulsor, pie	N_p N_{Fr} N_p	n m
T	Diámetro del tanque, pie	T/D	t
H	Altura del nivel del líquido, pie	H/D	h
C	Distancia del impulsor al fondo del tanque, pie	C/D	c
R	Número de mamparas	R/4	r
J	Ancho de las mamparas, pie	J/D	j

TABLA No. 2.1 (Continúa)

Símbolo	Definición y Dimensión	Grupo Adimensional en el cual es Usado	Función Exponencial para el Grupo o Relación
S	Paso o inclinación de las hojas del impulsor	S/D	s
B	Número de hojas del impulsor	B	b
L	Longitud de las hojas del impulsor, pie	L/D	l
W	Ancho de las hojas del impulsor, pie	W/D	w
N _{Fr}	Número de Froude	$\frac{DN^2}{g}$	n
N _p	Número de potencia	$\frac{P_g}{\rho N^3 D^5}$	
N _{Re}	Número de Reynolds	$\frac{D^2 N \rho}{\mu}$	n
F	Fuerza, lb		
L	Longitud, pie		
M	Masa, slug, (F/a)		
T	Tiempo, seg.		
a	Aceleración (L/T ²)		
Ø	Función N _p o N _p / (N _{Fr}) ²		

el impulsor. También B, el número de hojas del impulsor y R, el número de mamparas, ayudan a describir la forma del impulsor y la pared del tanque, pero en este caso no se relacionarán con F-L-T, sino simplemente como referencia.

- b) Las propiedades del fluido tales como: densidad y viscosidad.
- c) Las características cinemáticas y dinámicas del flujo, tales como: velocidad, consumo de potencia o fuerzas de resistencia y la fuerza de gravedad. La velocidad de las corrientes del fluido (flujo), se puede considerar como una función de la velocidad del extremo del impulsor, o se πDN , siendo la velocidad proporcional a N, el número de revoluciones del agitador en la unidad de tiempo. La potencia consumida por el impulsor, es utilizada para producir el flujo de la masa de fluido y también para vencer la fuerza de gravedad.

Para analizar el movimiento del fluido considerando las dimensiones fundamentales F-L-T, Buckingham desarrollo una técnica, a la cual llamó teorema "Pi". El Teorema "Pi", establece que si una variable (por ejemplo P, potencia) depende de un número de variables independientes (por ejemplo, las mencionadas en párrafos anteriores, las cuales definen condiciones de límites cinemáticos y dinámicos), estas variables pueden ser expresadas en una relación general funcional, tal como:

$$f(D, T, H, C, S, L, W, J, \rho, \nu, g, N, P) = 0 \quad (1)$$

continuando, si estas 13 variables pueden darse en términos de tres de las dimensiones fundamentales de las unidades (F-L-T), la ecuación puede ser expresada como una función de las 13 - 3 ó sea 10 términos Π adimensionales y cada uno de estos términos, tendrá 3 + 1, ó sea cuatro variables de las cuales solo una necesita cambiarse de término en término.

Para que cada término sea dimensionalmente homogéneo, debe contener potencias idénticas de cada dimensión. En conveniente escoger una longitud, una velocidad y la densidad para tres de las cuatro variables de cada término y utilizar las diez variables restantes con un exponente (-1), separadamente en los diez términos Π . De este modo la ecuación general queda expresada por:

$$f' (\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{10}) = 0$$

Usando el diámetro del impulsor D, como característica o referencia para la longitud; la velocidad del impulsor, N, para la velocidad y ρ para la densidad del fluido, los valores de los términos Π se pueden evaluar como sigue:

$$\Pi_1 \text{ (para el diámetro } T, \text{ del tanque)} = D^{x_1} N^{y_1} \rho^{z_1} T^{-1}$$

substituyendo dimensiones y resolviendo:

$$\Pi_1: L^x \left(\frac{L}{T}\right)^y \left(\frac{FT^2}{L^3}\right)^z T^{-1} = L^0 T^0 F^0$$

$$L: x - 4z - 1 = 0$$

$$T: -y + 2z = 0$$

$$F: z = 0$$

Por lo tanto:

$$\left. \begin{array}{l} Z : 0 \\ Y : 0 \\ X : 1 \end{array} \right\} \text{ así que } \pi_1 = \frac{D}{T}$$

Es evidente que si dos variables de dimensiones similares aparecen juntas en un grupo, las otras variables desaparecen, por lo cual $\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6$ y π_7 , de acuerdo con esta observación pueden ser escritas como:

$$\frac{D}{H} \cdot \frac{D}{C} \cdot \frac{D}{S} \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{D}{W} \text{ y } \frac{D}{J}$$

respectivamente:

$$\pi_8 \text{ (para } Y) = L^2 \left(\frac{1}{T}\right)^2 \left(\frac{FT^2}{L^4}\right) \left(\frac{L^2}{T}\right)^{-1} = L \cdot T \cdot F$$

$$L : \quad X - 4z - 2 = 0$$

$$T : \quad -Y + 2z + 1 = 0$$

$$F : \quad z = 0$$

Por lo tanto:

$$\left. \begin{array}{l} Z : 0 \\ Y : 1 \\ X : 2 \end{array} \right\} \text{ así que } \pi_8 = \frac{D^2 N}{Y}$$

De manera similar:

$$\pi_9 = \frac{D N^2}{g}$$

y . . .

$$\pi_{10} = \frac{D^5 N^3 \rho}{P}$$

Además de los diez términos π , hay otras dos relaciones más que pueden usarse para considerar las variaciones en número de hojas del agitador y número de mamparas en el tanque. Estas pueden ser representadas por:

$$\left(\frac{B}{N_0} \right) \text{ y } \left(\frac{R}{N_0} \right)$$

El número de referencia "No" se determina seleccionándolo según convenga.

Combinando todos los grupos se puede escribir la siguiente relación:

$$f \left(\frac{D}{T}, \frac{D}{H}, \frac{D}{C}, \frac{D}{S}, \frac{D}{L}, \frac{D}{W}, \frac{D}{J}, \frac{D^2 N}{V}, \frac{DN^2}{g}, \frac{D^5 N^3 \rho}{P}, \frac{B}{N_0}, \frac{R}{N_0} \right) = 0 \quad (2)$$

Todos los términos son adimensionales, cuando se usa un sistema de unidades congruente.

Esta relación, básicamente tiene tres parámetros diferentes: los que definen los límites de frontera y forma (los primeros siete y los últimos dos); los pertenecientes a la acción de la viscosidad y la gravedad y los que caracterizan al patrón o forma general de flujo.

Las condiciones de frontera, estan definidas por la longitud o relación de cifras.

Los dos términos que caracterizan a la fuerza de la viscosidad y a la fuerza de gravedad, se les denomina particularmente con los nombres de Número de Reynolds (N_{Re}) y Número de Froude (N_{Fr}):

$$N_{Re} = \frac{D^2 N}{\nu}$$

y como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Se puede también presentar por:

$$N_{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu}$$

$$N_{Fr} = \frac{DN^2}{g}$$

El término $\frac{D^2 N^3 \rho}{P}$, caracteriza la forma de flujo. Es conveniente invertirlo de tal modo que la potencia P, aparezca en el numerador y poderlo denominar como número de potencia N_p . Además deberá tenerse en cuenta que la densidad al derivarse, tenía unidades de potencia y que el término es adimensional tal y como fué derivado, sin embargo en Ingeniería Química, es una costumbre utilizar la densidad " ρ ", en lb-masa/pie cúbico, en lugar de las unidades de fuerza, es decir slug/pie cúbico, por tanto dividiendo " ρ " en lb/pie cúbico entre "g" (32.2 pie/seg-seg), el número de potencia puede ser representado por:

$$N_p = \frac{P g}{\rho N^3 D^5}$$

en donde " ρ " tiene como unidades : lb-masa/pie cúbico.

Cualquiera de los términos Π puede considerarse como una variable dependiente en la ecuación general, pero se ha encontrado que el número de potencia encierra las características esenciales del flujo, de ahí que es usado como la variable dependiente. Por otra parte, es más conveniente usar D en el denominador en las relaciones de dimensiones, así que la ecuación (2), se puede representar:

$$N_p = K (N_{Fr})^m (N_{Fr})^n \left(\frac{T}{D}\right)^i \left(\frac{H}{D}\right)^j \left(\frac{C}{D}\right)^k \left(\frac{S}{D}\right)^l \left(\frac{L}{D}\right)^m \left(\frac{W}{D}\right)^n \left(\frac{J}{D}\right)^i \left(\frac{B}{N_0}\right)^k \left(\frac{R}{N_0}\right)^l \quad (3)$$

Esta es la ecuación general que relaciona las variables físicas encontradas con más frecuencia en la operación de mezclado, considerando un solo impulsor, alineado con el eje vertical de un tanque de fondo plano. La ecuación puede ser adoptada para otras formas de tanques, fondos,, otras posiciones del impulsor, para impulsores múltiples y otras variables. Cuando se cuenta con una cantidad suficiente de hechos experimentales para evaluar las relaciones de las funciones indicadas por los exponentes, entonces es posible predecir el comportamiento de los movimientos del fluido y las fuerzas que intervienen y es posible también establecer los consumos de potencia para operaciones efectuadas por ejemplo en plantas piloto o modelo.

La ecuación (3), esta escrita en forma exponencial, esto es por

conveniencia por simbología. Los valores de los exponentes se -- han determinado con márgenes muy amplios en algunos casos y con -- márgenes limitados en otros. Ocasionalmente los exponentes son -- constantes para un grupo de datos muy extenso y en otros varian -- continuamente para el mismo grupo de datos. Sin embargo, no se -- ha logrado una relación más simple que ligue todas estas varia -- bles, de cualquier manera, esto nos orienta hacia generalidades -- importantes y hacia su utilización práctica.

2.4.2.1 Significado de la Ecuación General de Flujo.

Los últimos nueve términos de la ecuación (3), definen las condi -- ciones de los límites geométricos que afectan el movimiento del -- fluido. Son los parámetros de la similitud geométrica. Si se -- mantienen fijos para una serie de experimentos, es posible simpli -- ficar la ecuación y entonces se puede escribir . . .

$$N_p = K (N_{re})^m (N_{fr})^n \quad (4)$$

Esto permite la evaluación de las variables presentes en los gru -- pos de esta ecuación. Contrariamente, si los Números de Reynolds y Froude, se mantienen constantes o se hacen despreciables, es po -- sible evaluar los parámetros correspondientes a los límites geomé -- tricos.

Los Números de Reynolds y Froude, son parámetros que describen -- condiciones cinemáticas. El Número de Reynolds, toma en cuenta -- los efectos de la viscosidad, cuando las fuerzas de la viscosidad

son las dominantes. Cuando controlan las fuerzas de la viscosidad, la similitud cinemática no puede existir a menos que los valores del Número de Reynolds sean iguales en las dos situaciones de flujo que se están comparando. El Número de Froude toma en cuenta las fuerzas de gravedad, cuando juega un papel importante en la determinación del movimiento del fluido. Los valores del Número de Froude, deben de ser iguales para tener un flujo similar cuando las fuerzas de gravedad controlan el movimiento. Si las fuerzas de gravedad y viscosidad juegan un papel importante (como cuando existe remolino en una operación de mezclado), entonces deberán mantenerse constantes ambos, el Número de Reynolds y el Número de Froude, al comparar una determinada operación, con un patrón en una planta piloto o modelo.

Para presentar los datos gráficamente, es conveniente usar el Número de Reynolds como abscisa en gráficas de rayado logarítmico. Esta es la técnica usual en la presentación de datos en la dinámica de fluidos. Es conveniente enfatizar que se ha seguido aquí por conveniencia, que al movimiento en un tanque en donde se está efectuando la operación de mezclado, es posible aplicar el mismo tratamiento analítico que el utilizado para otro tipo de fenómenos de flujo de fluidos.

Para lograr una forma más adecuada, la ecuación (4) puede representarse por:

$$B = \frac{NP}{(N_{F_r})^2} = K (N_{R_0})^m \quad (5)$$

y para muchos casos en los que $(N_{Re})^n$ es igual a la unidad, o su efecto es despreciable.

$$\phi = N_p = K (N_{Re})^m \quad (6)$$

La gran mayoría de las operaciones de mezclado en la industria, pueden ser manejadas con esta ecuación.

Se ha encontrado que las relaciones más útiles de comportamiento de los impulsores y su efecto en operaciones de mezclado, pueden obtenerse graficando ϕ ó N_p VS N_{Re} en papel cuyas coordenadas - sean logarítmicas, usando varias dimensiones para los parámetros de frontera. Ver Fig. 2.3.

Para obtener los resultados en términos de potencia la ecuación - (6) puede representarse por:

$$P = \frac{K}{g} \rho N^3 D^5 \left(\frac{D^2 N \rho}{\mu} \right)^m \quad (7)$$

Las ecuaciones (4) y (7), pueden usarse para caracterizar los impulsores en diferentes medios debido a que presentan similitudes dimensional y dinámica. Al graficar la ecuación se obtendría una curva característica, para el impulsor y el medio específicos.

2.4.2.2 Conclusiones.

DE los experimentos efectuados por Rushton y sus colaboradores, podemos obtener las siguientes conclusiones:

a) Las ecuaciones (4) y (5), se pueden utilizar para caracteri-

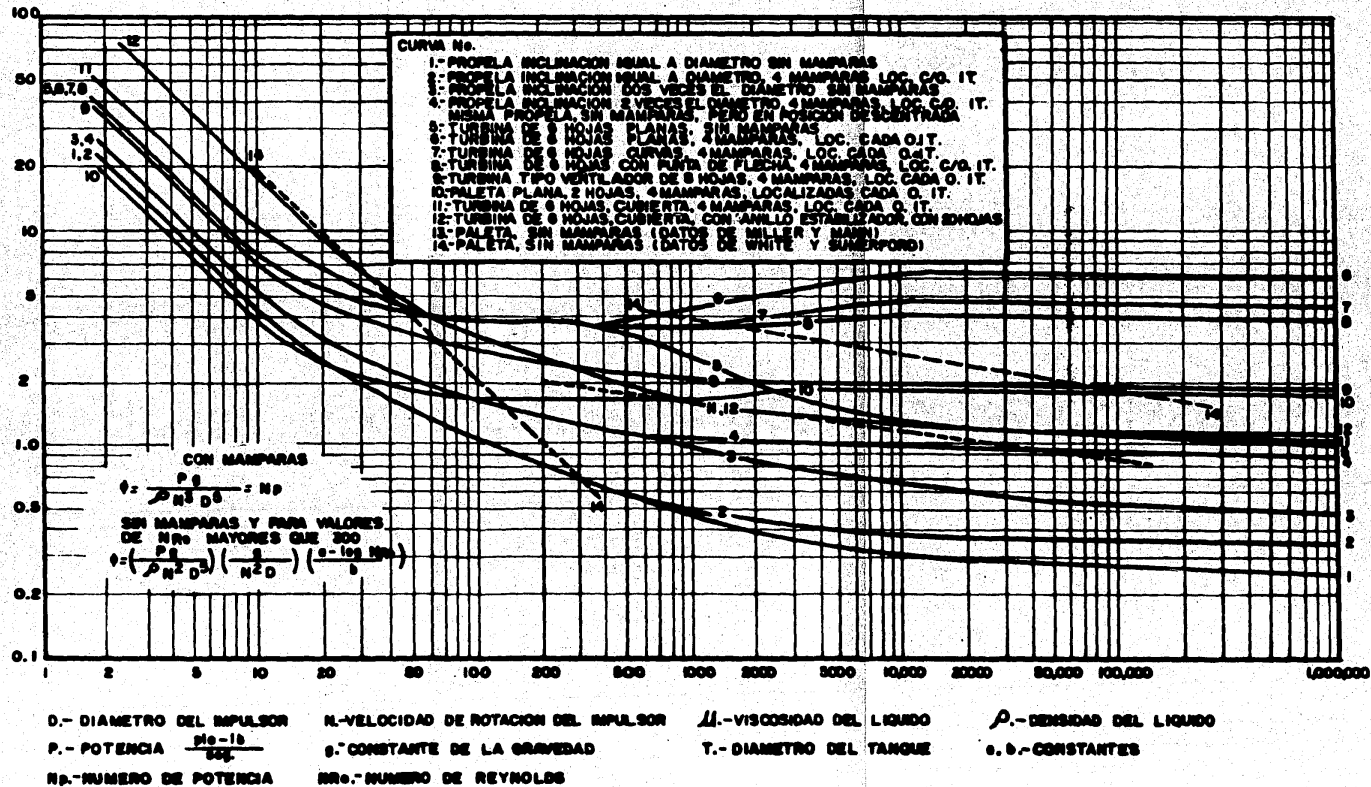


FIG. 23 : RELACION NRe/Np PARA DIFERENTES IMPULSORES

zar a los impulsores en una operación de mezclado y los resultados pueden graficarse como se muestra en la Figura 2.3, con el propósito de comparar los diferentes parámetros y sus efectos.

- b) Los impulsores funcionando en un recipiente cilíndrico vertical, con fondo plano, localizado dicho impulsor a una distancia igual a su diámetro, medida desde el fondo del recipiente, la flecha que soporta al impulsor alineada verticalmente y coincidiendo con el centro del tanque, considerando el diámetro del tanque igual a tres veces el diámetro del impulsor y la altura del líquido en el tanque igual a un diámetro del tanque, tienen las características mostradas por las curvas en la Fig. 2.3.
- c) La ecuación:

$$P = \frac{K}{\rho} N^3 D^5 \quad (8)$$

que es una simplificación de la ecuación (7), se aplica a cualquier impulsor cuando trabaja con valores de Número de Reynolds elevados, en donde la pendiente de la curva es igual a cero, es decir $m=0$, ver Fig. 2.3. Este es el caso en que se tiene instaladas mamparas en el recipiente o bien el agitador esta descentrado. El valor de K es igual al valor de θ a un valor del Número Reynolds de 100,000 y solamente para el impulsor y el medio que se están considerando aplicándose a valores de Números de Reynolds en donde la pendiente

te es cero.

La ecuación (8), muestra que en la región turbulenta, el consumo de potencia por el impulsor es proporcional a N^3 , D^5 y a la densidad del fluido. La potencia consumida en esta zona es totalmente independiente de la viscosidad, así que los cambios en la viscosidad no tendrán efecto sobre el consumo de potencia, siempre y cuando dichos cambios sean de tal magnitud que disminuyan el Número de Reynolds a valores menores de 10,000.

d) La ecuación:

$$P = \frac{K}{\mu} \rho N^2 D^5 \quad (9)$$

que es otra simplificación de la ecuación (7), se aplica a cualquier impulsor cuando trabaja con valores de Números de Reynolds menores que 10. Los valores de K pueden ser calculados igualándolos a los valores de ϕ a un Número de Reynolds igual a 5. Las variables relacionadas con las dimensiones físicas del equipo, tienen un efecto muy pequeño en los valores de K para esta ecuación. Se determinó que el paso de la propela, fué la única variable que tubo un efecto marcado sobre K.

En la ecuación (9), se puede observar que en la zona donde gobierna la viscosidad, el consumo de potencia del impulsor es proporcional a N^2 , D^5 y a la viscosidad del fluido. Al -

mismo tiempo, dicha ecuación es independiente de la intensidad, siempre y cuando la densidad del fluido no cambie a tal grado que cambie el valor del Número de Reynolds, más allá de 10, lo cual ocasionaría que el sistema trabajara en la zona de transición.

- e) En operación con mamparas, en el rango de transición, en donde no es posible aplicar ni la ecuación (8) ni la (9), podría aplicarse la ecuación (5), pero ya que las pendientes de las curvas Número de Reynolds-Número de Potencia no son consistentes, la ecuación resultante con exponentes fraccionarios es de mínimo valor e importancia práctica, debido a que sería aplicable a una condición limitada solamente.

- f) Cuando los impulsores se trabajan sin mamparas, y hay presencia de remolinos, se aplica la ecuación (4), y el exponente del Número de Froude es una función del Número de Reynolds, y posiblemente también de la posición del impulsor. Solamente a valores de Número de Reynolds elevados, la pendiente de la línea graficada ($N_{R_0} - N_p$) es constante, por lo cual es poco lo que se puede lograr mediante la simplificación de la ecuación (4). Con valores elevados del Número de Reynolds, las características apenas se alcanzan a describir quedando limitadas a la aplicación de la ecuación (1).

2.5 CONSIDERACIONES PRACTICAS

Un sistema de agitación, está formado generalmente por:

2.5.1 El Recipiente o Tanque.

2.5.2 El Agitador.

2.5.3 Accesorios,

2.5.1 Recipientes.

Estos pueden variar en forma y tamaño, dependiendo de las necesidades del proceso. Normalmente son de forma cilíndrica vertical, cerrados o abiertos. El fondo del tanque puede ser plano con las esquinas redondeadas pero es preferible que sea curvo (torisférico, elíptico o esférico), de tal forma que se eviten zonas en las cuales las corrientes del fluido podrían no penetrar. La profundidad o nivel del líquido conviene que sea igual en dimensión al diámetro del recipiente. Se deben prever los soportes o boquilla adecuados para sostener el agitador. Se deben considerar los accesorios necesarios para su correcta operación, tales como: serpentines, chaquetas y boquillas para: carga, descarga, drene e instalación de instrumentos para medición de nivel y temperatura.

2.5.2 Agitadores.

Los agitadores están formados a su vez por: el sistema motriz, la flecha y el impulsor.

2.5.2.1 El Sistema Motriz.

Es el dispositivo que hace rotar a la flecha y al impulsor y de--

pendiendo de la velocidad de giro (revoluciones por minuto), este puede ser un motor acoplado directamente o bien un sistema formado por un reductor de velocidad de engranes, acoplado directamente a la flecha del agitador y un motor acoplado directamente al reductor. La relación de reducción y tamaño del reductor, dependerán de las necesidades de agitación por lo que se refiere a velocidad (rpm) y potencia que se necesita para trabajar el sistema. El motor eléctrico deberá seleccionarse de acuerdo con las limitaciones de la zona donde estará localizado el reactor. Esto determinará si el motor es a prueba de goteo totalmente cerrado con ventilación o a prueba de explosión, etc. La continuidad o intermitencia de la operación, determinarán el factor de servicio que se debe escoger para el reductor.

2.5.2.2 La Flecha.

Es el primer elemento a diseñarse, después de haber seleccionado el tipo de agitación. El material de construcción debe ser compatible con el servicio y la corrosividad de los reactivos y productos del proceso y debe trabajar con un deflexión mínima. Los factores a considerar en el diseño mecánico de la flecha son:

- a) La longitud necesaria, la cual queda determinada por la geometría del reactor.
- b) El peso del impulsor.
- c) La velocidad de rotación. Las dimensiones de la flecha se

seleccionan de tal modo que haya seguridad en la velocidad de trabajo para el agitador, basándose en la velocidad crítica de la flecha y el impulsor. La velocidad crítica de rotación de un sistema es la velocidad a la cual las frecuencias de la vibración inducidas y la natural del sistema son las mismas.

- d) El torque transmitido. Los esfuerzos de torsión, resultan del movimiento de giro que imprime el sistema motriz y la resistencia que opone el fluido debido a la viscosidad e inercia.
- e) El tipo de soporte que sostendrá la flecha.
- f) Los materiales de construcción.

2.5.2.3 El Impulsor.

Es el dispositivo que provoca el movimiento del fluido, originando que este circule en corrientes, en todo el recipiente y retornando después de cierto tiempo a dicho impulsor.

Los impulsores se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje longitudinal de la flecha, y los que generan corrientes en dirección radial o tangencial. A los primeros se les denomina impulsores de flujo vertical y a los segundos impulsores de flujo radial.

Los tres principales tipos de impulsores son: propelas, paletas

y turbinas, posiblemente hay otros tipos o variantes en general - los mencionados resuelven el 95% de los problemas de agitación.

2.5.2.3.1 Propelas.

Una propela es un impulsor de flujo vertical de alta velocidad, - para fluidos de baja viscosidad. Las propelas pequeñas, giran a velocidades de 1,150 a 1,750 rpm, mientras que las grandes giran entre 400 y 800 rpm. Las corrientes de fluido saliendo de la propela, viajan a través del líquido en una dirección dada, hasta -- que son desviadas por el fondo o la pared del recipiente. Debido a la persistencia de las corrientes del fluido originadas por la propela, estos agitadores son muy efectivos en recipientes de -- gran tamaño.

El giro de una propela, traza un espiral, y si no hubiera deslizamiento entre la propela y el líquido, una revolución completa movería el líquido longitudinalmente una distancia fija, la cual dependería del ángulo de inclinación de las hojas de la propela. - La relación de esta distancia al diámetro de la propela se conoce como "el paso de la propela". En la Fig. 2.4, (a), (b) y (c), se muestran varios diseños de propelas. La más común es la de tres hojas denominada "marina", las dentadas, las de cuatro hojas y otras son empleadas en aplicaciones especiales.

Este tipo de impulsores, raramente exceden diámetros de más de -- 450 mm independientemente del recipiente. En un tanque donde la

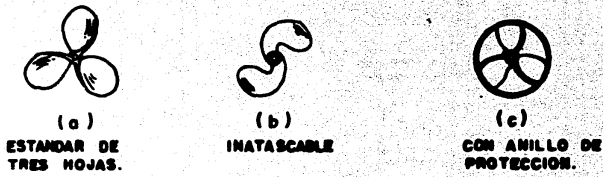


FIG. 2.4 - PROPELAS

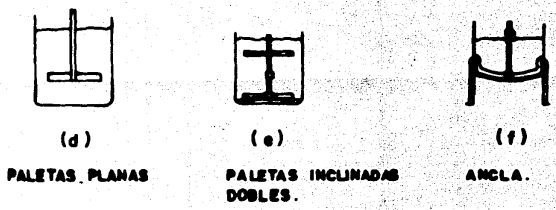


FIG. 2.5 - PALETAS

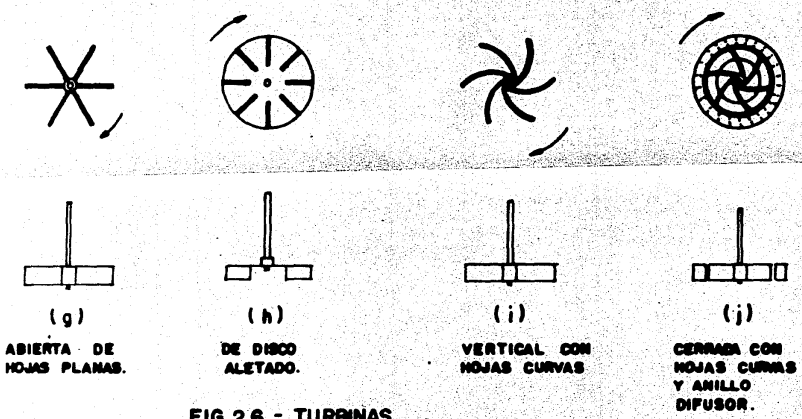


FIG. 2.6 - TURBINAS

DIFFERENTES TIPOS DE IMPULSORES

altura del líquido sea muy grande, se pueden instalar dos o más -
propelas en la misma flecha, dirigiendo el flujo en la misma di-
rección o en dirección opuesta.

2.5.2.3.2 Paletas.

En la Fig. 2.5, (d), (e) y (f), se muestran varios impulsores ti-
po paleta. Para problemas simples de agitación, un agitador sen-
cillo consiste de una paleta plana sujeta a una flecha vertical.
Es común el uso de agitadores con paletas de dos y cuatro hojas.
Algunas veces, las paletas son inclinadas, la mayor parte de e-
llas son verticales. Estos tipos de impulsores giran a veloci-
dades bajas en el centro del recipiente moviendo el líquido radial
y tangencialmente, el movimiento vertical es mínimo, a menos que
las hojas de las paletas sean inclinadas. En tanques donde la al-
tura del líquido es muy grande, se pueden montar varias paletas -
en la misma flecha espaciadas adecuadamente. En el diseño mo^{str}a-
do en la Fig. 2.5 (f), las hojas siguen el contorno de la forma -
del recipiente, de tal modo que casi rozan su superficie o pasan
a una distancia muy pequeña de ella. A esta paleta se le conoce
con el nombre de "ancla". Este tipo de agitadores son útiles pa-
ra evitar la formación de depósitos en las superficies de los re-
cipientes, sobre todo cuando hay transmisión de calor como en el
caso de un recipiente enchaquetado, pero son deficientes para mez-
clar. Generalmente trabajan en conjunto con una paleta u otro a-
gitador, girando a alta velocidad y en sentido opuesto.

En aplicaciones industriales la velocidad de giro de las paletas es de 20 a 150 rpm. La longitud total de las paletas de un impulsor de este tipo es de 50 a 80% del diámetro interior del recipiente y el ancho es de una sexta a una décima parte de la longitud de la paleta.

En un recipiente sin mamparas y a bajas velocidades la agitación que se obtiene es mediana, a velocidades elevadas las mamparas son necesarias, de otra forma el líquido se desplazaría siguiendo el contorno del recipiente a una velocidad elevada pero con un mezclado muy bajo.

2.5.2.3.2 Turbinas.

La Fig. 2.6 (g), (h), (i) y (j), muestran entre otros algunos de los diseños para este tipo de impulsor la mayor parte de ellos se mejjan impulsores tipo paleta con hojas múltiples y cortas, montadas en una flecha y girando a altas velocidades, en el centro del recipiente. Las hojas pueden ser rectas, curvas, inclinadas o verticales. El impulsor puede ser abierto, semicerrado o cubierto. Su diámetro es de 30 a 50% del diámetro del recipiente. Las turbinas son efectivas en un margen muy amplio de viscosidades. En líquidos con baja viscosidad, este impulsor genera corrientes muy fuertes que se mantienen en todo el recorrido dentro del recipiente, rompiendo las zonas estacionarias. Cerca del impulsor, se origina una zona de corrientes rápidas, turbulencia elevada y

corte intenso. Los principales tipos de corrientes son: tangencial, y radial, la componente tangencial provoca remolinos y vórtice el cual debe evitarse con el uso de mamparas o por un anillo difusor si se desea que el impulsor sea más efectivo.

La turbina semiabierta conocida como "disco aletado", ver Fig. -- 2.6 (j), es usada para disolver o lograr la dispersión de un gas en un líquido. El gas se dosifica en la zona inferior del impulsor, en el centro, las aletas envían las burbujas grandes hacia afuera y las rompen en burbujas pequeñas. Esto aumenta en gran escala el área entre las fases (gas-líquido).

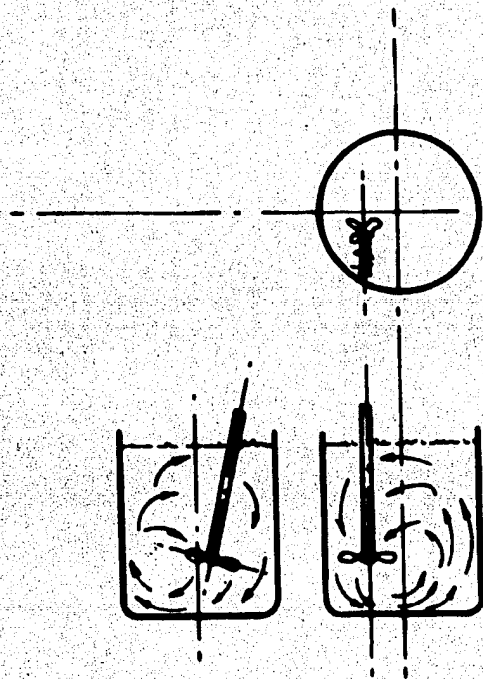
2.5.3 Accesorios.

Mamparas, anillos de aire y rompedores de espuma.

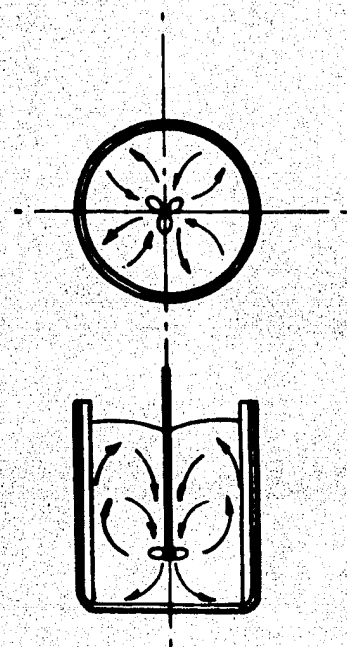
2.5.3.1 Mamparas.

Las corrientes circulares de fluido que siguen el contorno del recipiente y los remolinos se pueden evitar por medio de cualquiera de los siguientes métodos:

- a) En tanques pequeños, el impulsor se puede montar descentrado como se ve en la Fig. 2.7, en estas condiciones la flecha del agitador se localiza fuera de la línea central perpendicular al tanque y además inclinado con respecto a un plano perpendicular imaginario.
- b) En tanques grandes, el agitador puede montarse en un lado --



**FIG.2.7.- MONTAJE DE PROPELA
DESCENTRADA**



**FIG.2.8.- CORRIENTES DE FLUIDO
EN UN RECIPIENTE CON
MAMPARAS Y AGITADOR
DE PROPELA LOCALIZADO
EN EL CENTRO.**

del recipiente con la flecha y posición horizontal pero en ángulo con respecto al radio.

- c) En tanques grandes con agitadores verticales, el mejor método es el uso de mamparas, las cuales impedirán la formación de corrientes circulares y remolinos sin interferir con las corrientes radiales o longitudinales.

Una mampara consiste de una pieza rectangular generalmente del mismo material del tanque instalada verticalmente a lo largo del recipiente perpendicularmente a este. Este tipo de mamparas y los cambios de dirección que provocan en las corrientes del fluido, se muestran en la Fig. 2.8. A menos que el tanque sea muy grande, la instalación de 4 mamparas es suficiente para evitar la formación de corrientes y remolinos.

En el caso de que el impulsor sea una turbina, el ancho de la mampara, debe ser no mayor que un doceavo del diámetro del recipiente. Para los impulsores tipo propela, es suficiente con un ancho equivalente a un dieciseisavo del diámetro del tanque. Cuando se trata de mezclar soluciones las mamparas se instalan pegadas a la pared del tanque, cuando se trata de mantener sólidos en suspensión en el seno del líquido, se debe conservar una distancia de aproximadamente 20 mm entre la pared del tanque y la orilla de la mampara.

2.5.3.2 Anillos de Aire.

Se le denomina así, a los dispositivos usados para distribuir algún gas en el seno de un fluido. Generalmente consisten de un anillo tubular, en el cual se hacen perforaciones de diámetros adecuados para lograr una buena distribución de gas, de tal modo que no se llegue a "inundar" el impulsor. Normalmente se les localiza en la parte inferior del recipiente, abajo del impulsor.

Existen dos tipos de dispersión de gas: sistemas en los que controla la transferencia de masa y sistemas en los que controla la reacción. Cuando controla la transferencia de masa, se puede mejorar el sistema aumentando la velocidad de burbujeo o aumentando la velocidad de agitación a un punto óptimo. Un sistema en el cual controla la velocidad de la reacción no es sensible a los cambios de velocidad en el agitador, en tal caso será suficiente con lograr una buena distribución del gas.

Es conveniente mencionar que un anillo de aire es útil para dispersar un gas en el seno de un líquido, pero no se le deberá usar como un medio de agitación, ya que además de no ser efectivo, pues el tiempo para lograr el mezclado sería muy largo, el consumo de potencia sería también mucho mayor que el utilizado por un agitador para lograr el mismo propósito.

2.5.3.3 Rompedores de Espuma.

En muchas reacciones se producen espumas, que van a alojarse a -

La superficie del fluido que se está agitando, lo que muchas veces impide ver a través de la mirilla del reactor, cualquier cambio en color, textura o aspecto, la producción de espuma no se podría evitar, porque puede ser un resultado de la reacción, pero es posible instalar en la flecha del mismo agitador, dispositivos que rompan o barran la espuma como el mostrado en la Fig. 2.9.

2.6 AGITACION EN REACTORES VIDRIADOS.

Los principios de agitación que se han mencionado en forma general en párrafos anteriores, son los mismos que se aplican a los problemas de agitación de reactores vidriados, pero ya que un reactor vidriado es un equipo especial por lo que se refiere a su construcción, existen algunas diferencias con respecto a los demás equipos, las cuales puntualizamos a continuación.

2.6.1 Aplicación.

El uso o aplicación de un recipiente vidriado y sus accesorios, queda limitado a operaciones de mezclado de fluidos (líquido-líquido, líquido-gas), y algunos en donde intervenga un sólido en polvo pero que no sea abrasivo.

2.6.2 Agitadores.

En estas partes no existe separación entre el impulsor y la flecha, están formados de una sola pieza y excepto en casos muy especiales, normalmente son de dos tipos ancla y propela.

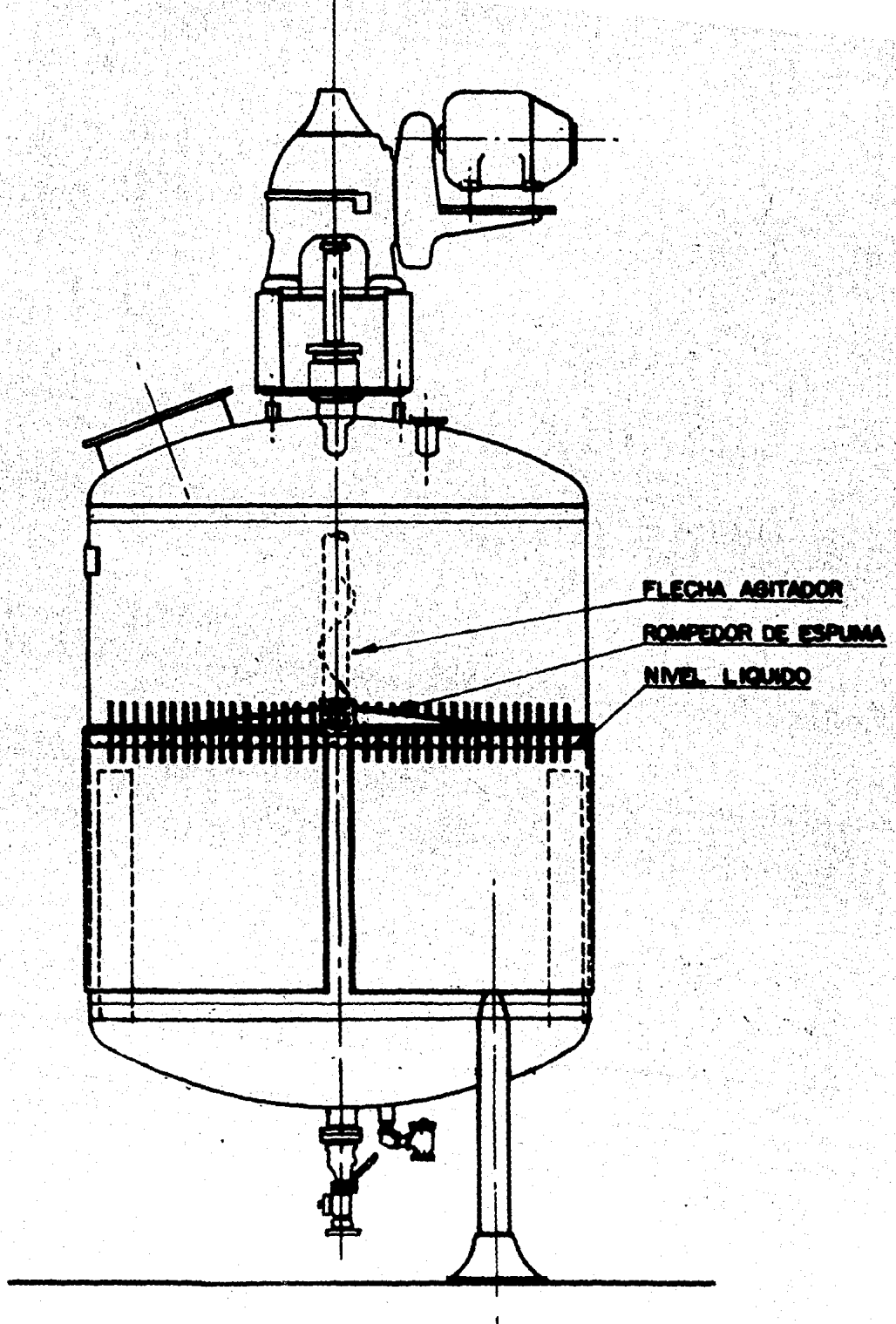
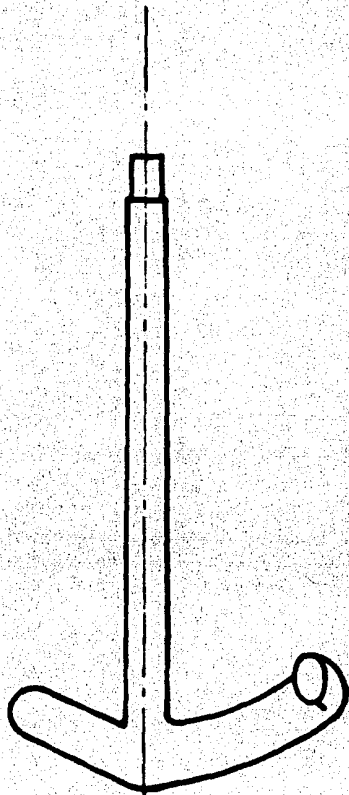


FIG. 2.9.- DISPOSITIVO PARA ROMPER LA FORMACION DE ESPUMA

- a) El agitador tipo Ancla, ver Fig. 2.10, se utiliza en procesos donde la viscosidad es muy alta, y es necesaria una velocidad baja de agitación, también es usado para procesos en donde el material tiende a pegarse en la paredes del recipiente disminuyendo la transmisión de calor, en realidad este tipo de agitador no mezcla más bien agita considerando -- que cuando se ha seleccionado no es posible utilizar mamparras.
- b) El agitador tipo propela ver Fig. 2.10, es de aplicación universal. Está formado por tres aspas curvadas hacia atrás, - obteniendo con esto la ventaja de poderlo localizar muy cerca del fondo del recipiente y siguiendo su contorno. La inclinación de las aspas impulsa el fluido hacia las paredes y hacia arriba y durante el arranque, tiene la ventaja de producir bajos pares de torsión.

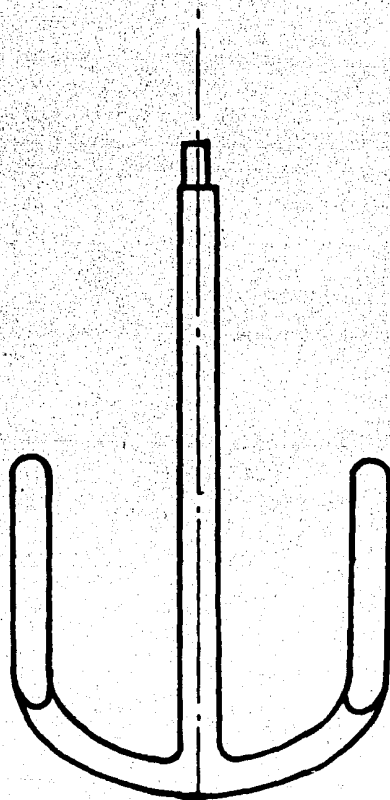
La velocidad periférica de este tipo de agitadores esta limitada a 183 m/min como mínimo y 549 m/min como máximo. El -- diámetro del agitador es aproximadamente 75 a 80% del diámetro del tanque y para este agitador si es posible el uso de mamparras.

Como podrá observarse en la Fig. 2.10 el tipo de impulsor de este agitador no corresponde exactamente a una propela, por su figura, por la longitud de las hojas y por la forma misma de las hojas. Se deberá considerar que su diseño tiene que



AGITADOR TIPO PROPELA

FIG. 2.10.- AGITADORES USADOS EN REACTORES VIDRIADOS



AGITADOR TIPO ANCLA

ser muy especial para poder depositar la capa de vidrio en sus paredes.

2.6.3 Mamparas.

Estos accesorios por ser vidriados, también se salen de la figura y forma de instalación de las mamparas típicas. En primer lugar, no es posible sujetarlas directamente a la pared del recipiente y en segundo lugar, su forma debe llenar ciertos requisitos para lograr la adherencia del vidrio, de cualquier manera se ha diseñado de tal forma que es posible obtener los resultados esperados de una mampara típica.

Las hay de tres tipos, ver Fig. 2.11.

- a) Mamparas tipo "h", las cuales son usadas en reactores con capacidad hasta de 11,355 l.
- b) Mamparas tipo "D", las cuales son usadas en reactores con capacidad mayor a 11,355 l.
- c) Mamparas tipo "Dedos", las cuales son usadas específicamente para polimerizadores. Esta mampara puede tener los dedos hacia abajo o hacia arriba. Generalmente todas las mamparas se instalan colgando de una de las boquillas de la tapa superior del recipiente, pero este tipo de mamparas también es posible instalarlas en una boquilla de la tapa inferior, lo cual en procesos como el de obtención de "PVC" (cloruro de -

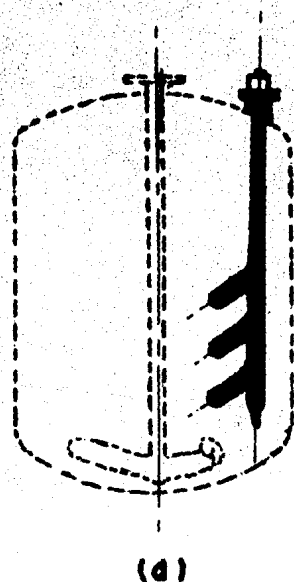
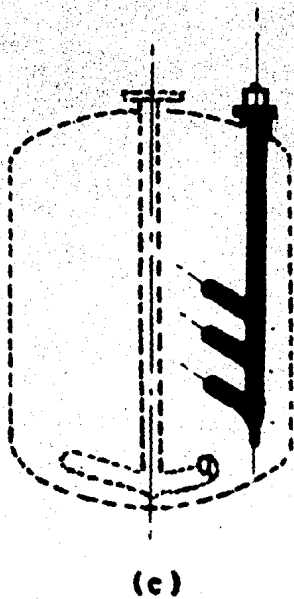
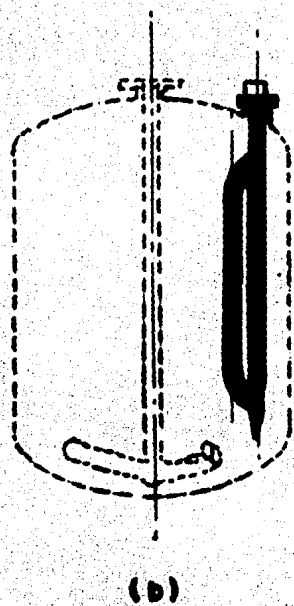
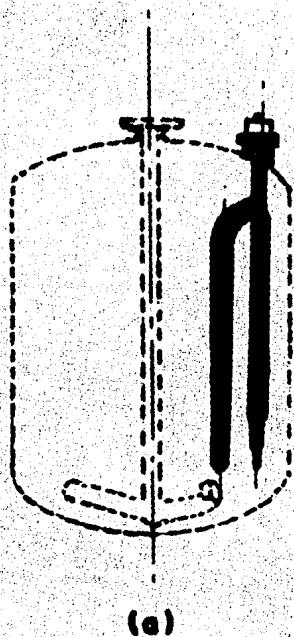


FIG. No.2.II.-MAMPARAS EN REACTORES VIDRIADOS.

- (a)- TIPO "B"
- (b)- TIPO "B"
- (c)- TIPO "DEDOS HACIA ARRIBA"
- (d)- TIPO "DEDOS HACIA ABAJO"

polivinilo) ofrecen algunas ventajas: Primero, elimina la zona anular que podría formarse en una mampara colgada de una boquilla de la tapa superior, evitándose de este modo la acumulación de material y el "crecimiento" del polímero en esta zona. Segundo, evitando el uso de la boquilla de la tapa superior, se evita una posible fuga de vapores. Finalmente, una mampara inferior esta normalmente sumergida durante el proceso disminuyendo la posibilidad de "crecimiento" del producto.

2.7 CALCULO DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR LOS AGITADORES.

Por lo que se ha visto anteriormente, los conceptos que deben ser aplicados a los problemas de agitación, están representados claramente por los siguientes términos:

2.7.1 Consumo de Potencia del Impulsor.

2.7.2 Necesidades de Potencia del Proceso.

2.7.1 Consumo de Potencia.

La cantidad de potencia consumida por el impulsor, es aquella que se necesita para hacer rotar dicho impulsor, con un tamaño y diseño dados, a una velocidad determinada, en un tanque con una configuración específica que contiene un fluido de ciertas propiedades físicas. El consumo de potencia para el impulsor es función de factores tales como: diámetro del impulsor, velocidad y diseño, -

mamparas del tanque y viscosidad y densidad del fluido. El consumo de potencia por el impulsor, es independiente de los resultados alcanzados en la agitación. Ello significa simplemente, que bajo un cierto conjunto de condiciones, es necesario un valor de torque cuantitativo para hacer girar el impulsor a una velocidad dada en el seno del fluido. El producto del torque y la velocidad, se expresan en unidades de potencia.

2.7.2 Necesidades de Potencia.

Es la potencia que debe ser aplicada al fluido en un recipiente, en condiciones óptimas, por un impulsor, para lograr los resultados deseados en un proceso. Este resultado puede ser: suspensión de un sólido en un líquido, el mezclado de una variedad de productos líquidos miscibles, el contacto de un líquido con un gas o con otro líquido no miscible para obtener transferencia de masa o bien, para obtener una buena transferencia de calor, o simplemente un mezclado satisfactorio. La necesidad de potencia del proceso es función de las características del sistema y del resultado particular deseado en el proceso.

Con estos dos conceptos en mente, el ingeniero sabe que tiene dos tareas que completar en la selección de un sistema de agitación: Primero, deberá determinar la potencia que debe aplicarse al fluido para alcanzar los resultados deseados, es decir las necesidades de potencia del proceso. Segundo, haciendo uso del concepto de consumo de potencia para el impulsor deberá determinar como --

dar la potencia necesaria al sistema.

Antes de introducirnos en los conceptos de cálculo de un problema de agitación, convendrá establecer cual será la base de comparación para determinar si una agitación es buena o no. Siguiendo el criterio de The Pfaudler Co., se puede establecer que la base es el tiempo necesario para lograr la mezcla de un lote de dos fluidos. Así, los términos comúnmente usados de una manera muy vaga para establecer el grado de agitación como "suave", "medio" y "violento" o "rápido" pueden quedar muy precisas si establecemos que:

- a) "Suave": equivale a aproximadamente 25 min.
- b) "Medio": equivale a aproximadamente 5 min.
- c) "Violento" o "Rápido": equivale a aproximadamente 1 min.

(si se desean más datos con respecto al tiempo de mezclado, referirse a las investigaciones realizadas por K. W. Norwood y A. B. Metzner, en las que determinaron los patrones de flujo y las velocidades de mezclado en recipientes agitados).

Las necesidades de potencia de un sistema de agitación no pueden ser calculadas fácilmente, aún en los sistemas más simples a menos que se cuente con información específica, como la desarrollada por investigadores como H. Rushton y colaboradores y algunas compañías (Mixco, Philadelphia Gear, Pfaudler, etc.) que se han visto en la necesidad de determinar las características de sus --

sistemas de agitación para poderlos ofrecer con la garantía de -- que funcionarán. A continuación se da un método típico de cálculo, aplicando los datos de la compañía Pfaudler y por lo tanto, - útil para los productos de esta compañía.

Pasos:

- a) Seleccionar el tipo y diámetro del impulsor.
- b) Seleccionar o especificar el tipo y cantidad de mamparas.
- c) Determinar o fijar la velocidad de operación.
- d) Calcular el N usando la fórmula:

$$N = \frac{10.75 \times G.E. \times N \times D^2}{\mu}$$

Donde:

G.E. = Gravedad específica.

N = Velocidad del agitador en RPM.

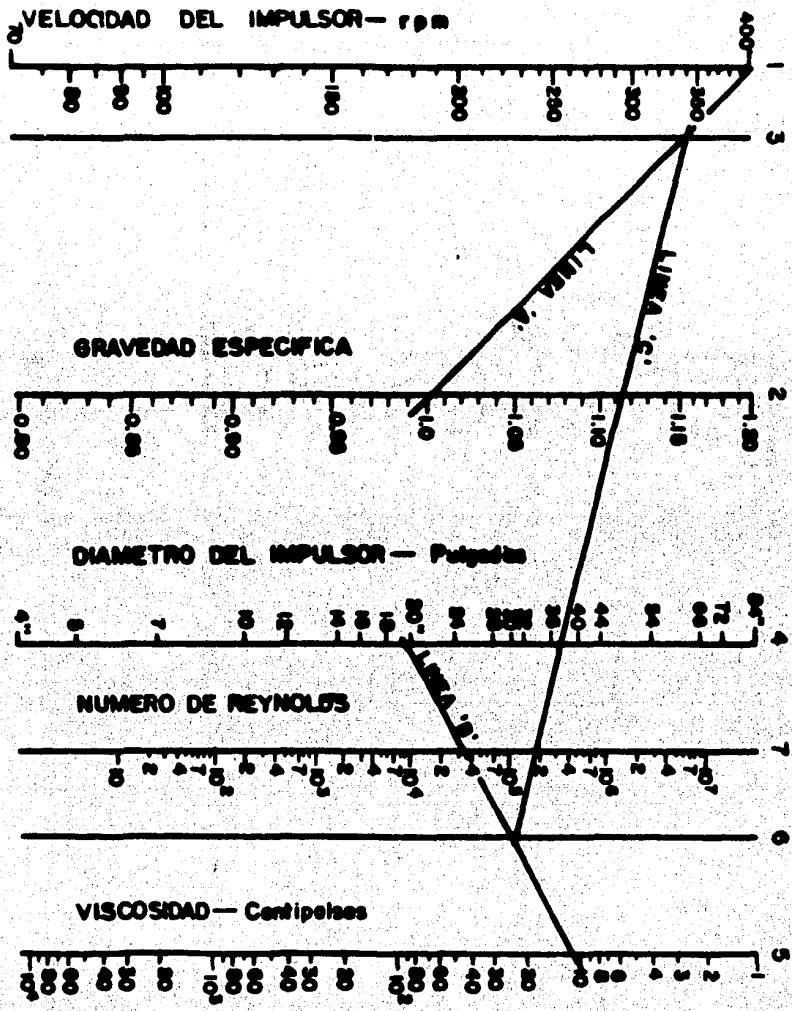
D = Diámetro del impulsor en pulgadas.

μ = Viscosidad en centipoises

o bien usando el nomograma de la Fig. 2.12.

- e) Determinar el tiempo de mezclado usando la Fig. 2.13.
- f) Determinar el tiempo máximo en que se logrará el mezclado con la fórmula:

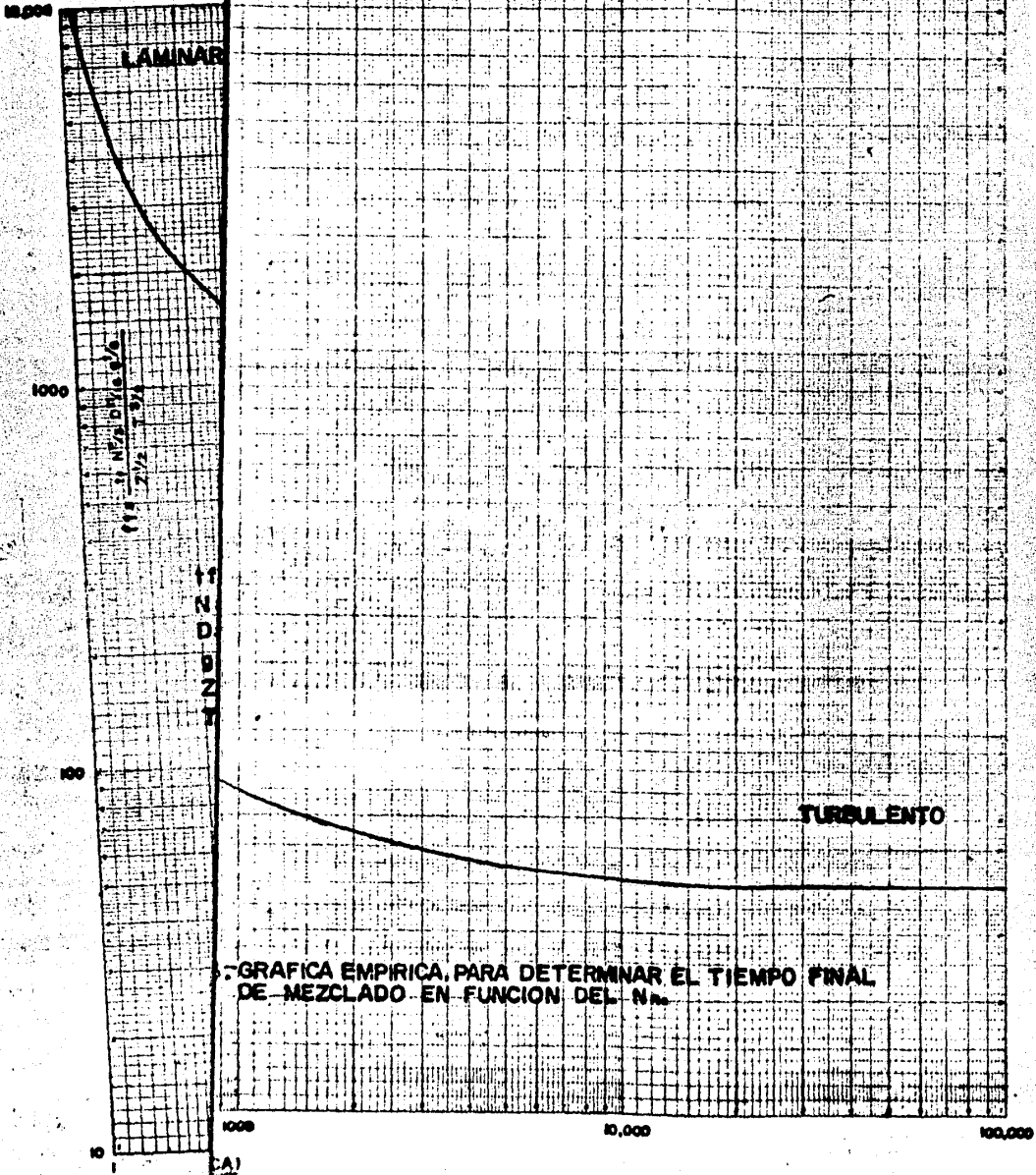
FIG. 2.12 - CALCULO DEL NUMERO DE REYNOLDS PARA ABITACION



2 CYCLES X 3 CYCLES



HAUFFMAN



GRAFICA EMPIRICA, PARA DETERMINAR EL TIEMPO FINAL DE MEZCLADO EN FUNCION DEL N_{Re}

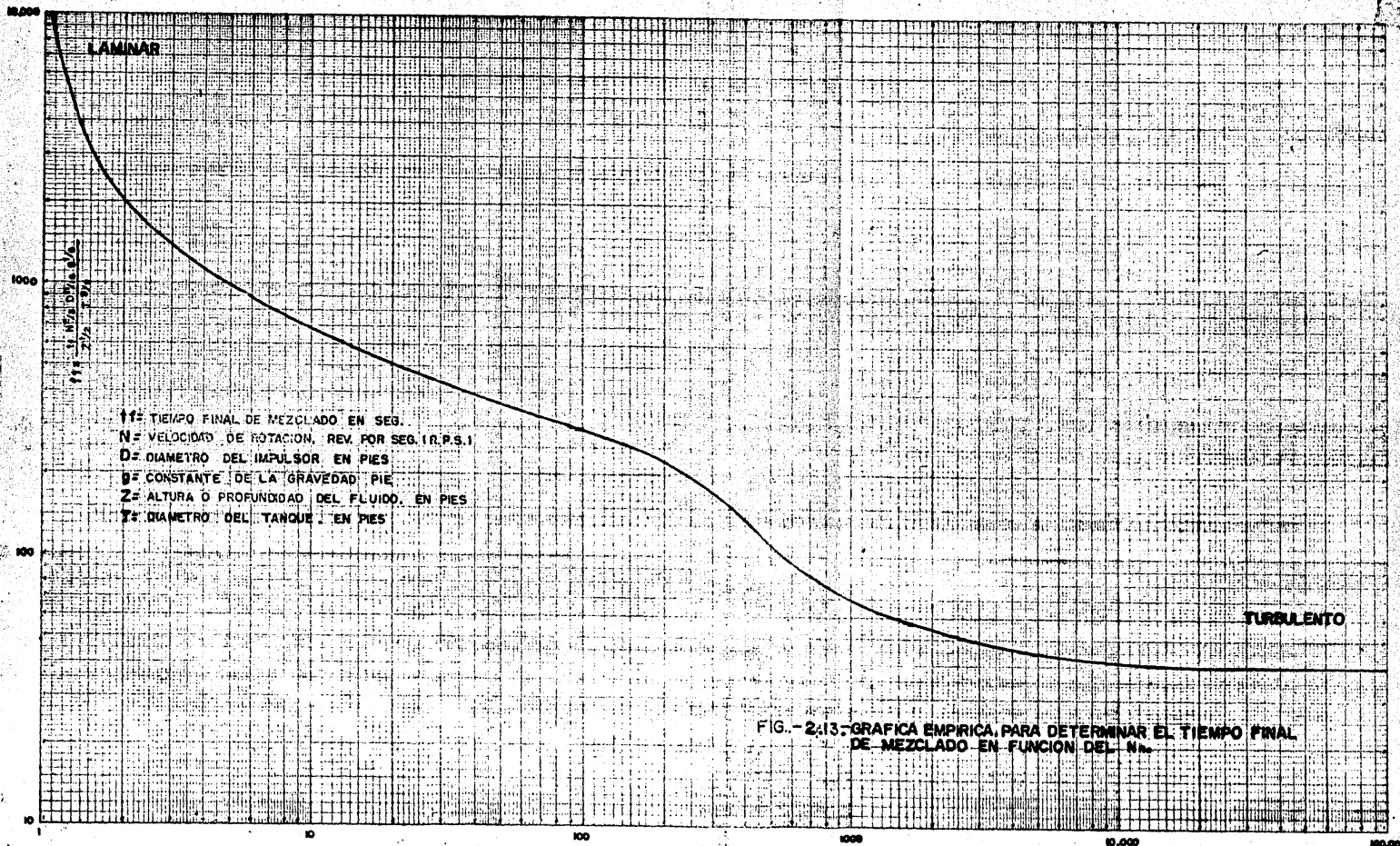


FIG.-2.13.-GRAFICA EMPIRICA, PARA DETERMINAR EL TIEMPO FINAL DE MEZCLADO EN FUNCION DEL N_{Re} .

$N_{Re} = \frac{N \cdot D^2 \cdot \rho}{\mu}$ (RPM) (PULG.) (GRAV. ESPECIFICA)
 CENTIPOSES

$$t_f = \frac{f \times Z^{1/2} \times T^{3/2}}{N^{2/3} \times D^{11/10} \times 1.784} = \text{segundos}$$

Donde:

t_f = Tiempo de mezclado.

f = Factor de la Fig. 2.13.

Z = Espesor o profundidad del líquido en el recipiente.

T = Diámetro del tanque.

N = Velocidad del agitador RPS (Rev. Por Seg.).

D = Diámetro del impulsor en pies.

- g) Comparación del tiempo obtenido en el inciso "f" y el supuesto o esperado. Si no se obtiene el tiempo esperado, se tendrá que cambiar la velocidad e iniciar de nuevo los pasos. - Esto se repetirá hasta que se juzgue conveniente.
- h) Calcular la potencia consumida por el impulsor y determinar los HP que debe tener el motor usando la fórmula:

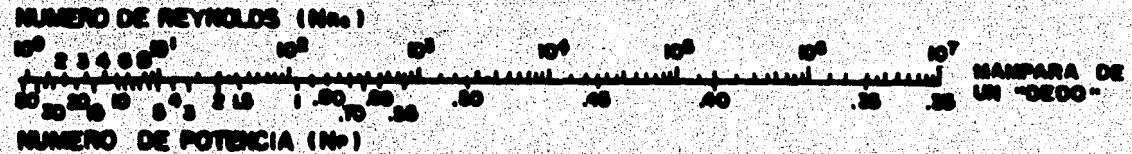
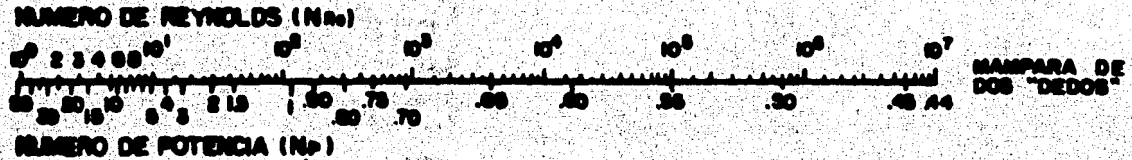
$$HP = 3.52 \times 10^3 \times N_p \times G.E. \times \left(\frac{RPM}{60}\right)^3 \times \left(\frac{D}{12}\right)^5$$

Donde:

N_p = Número de potencia (usar nomograma de la Fig. 2.14).

G.E. = Gravedad específica.

AC. VIBRADO
 IMPULSOR DE
 3 ASAS



AC. INCORDABLE
 TURBINA DE
 6 HOJAS

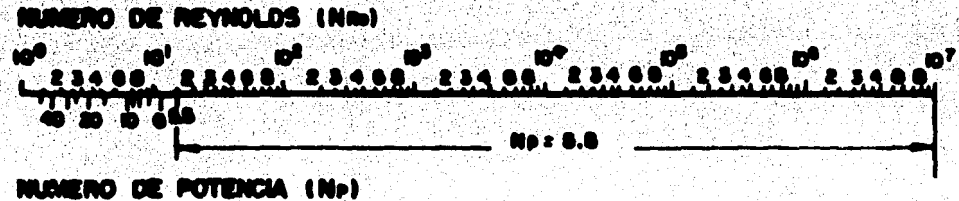


FIG. 2.14.-
 RELACION (N_{Re}) A (N_p) PARA AGITADORES DE "PFAUDLER"
 (TOMADO DE "SPEED-POWER CALCULATOR", BOLETIN DE
 THE PFAUDLER Co. ROCHESTER, N.Y.)

N = Velocidad del agitador en RPM (Rev. Por Min.).

D = Diámetro del agitador en pulgadas.

o bien usando el nomograma de la Fig. 2.15.

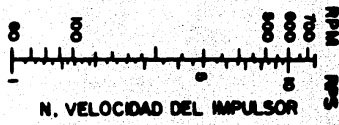
- i) A la potencia calculada en el inciso "h", se le deberá agregar un 10% más por pérdidas en caso de utilizar un sistema reductor de engranes y 0.5 HP por pérdidas debido al sello, en el caso de que este sea mecánico.

Finalmente el motor se deberá especificar para la potencia próxima siguiente equivalente a un motor de uso comercial.

$$N_p \text{ . NUMERO DE POTENCIA: } \frac{P \cdot 98}{\rho \cdot 10^3 \cdot 0^3}$$



ρ DENSIDAD DEL FLUIDO, Lb/ft³



D, DIAMETRO DEL IMPULSOR, pie

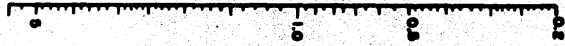


FIG. 2.18 -- CALCULO DE POTENCIA REQUERIDA

C A P I T U L O 3

DISPOSITIVOS DE TRANSMISION DE CALOR

C A P I T U L O 3

3. DISPOSITIVOS DE TRANSMISION DE CALOR.

La transmisión de calor es un fenómeno que ocurre en casi todos los procesos y que es necesario controlar, ya sea para aumentar o para disminuir la temperatura, dependiendo de que el proceso sea endotérmico o exotérmico. La transmisión de calor depende de muchos aspectos entre los cuales podemos mencionar: los reactivos y sus propiedades físicas, (densidad, viscosidad y estado físico), materiales de construcción del reactor, la agitación y la temperatura alcanzada durante la reacción; muchos de estos factores son variables y dependen del proceso mismo. En muchos procesos habrá necesidad de proporcionar calor a la reacción, en la mayor parte de ellos será necesario quitar calor, es decir enfriar. Para calentar o enfriar un reactor intermitente, se cuenta con dispositivos que instalados interna o externamente, ayudan a controlar la reacción y de este modo es posible lograr la conversión deseada en la reacción, evitando o manteniendo al grado mínimo la formación de subproductos.

Los dispositivos más comunes usados para agregar o quitar calor son:

3.1 CAMBIADORES DE CALOR.

3.2 CHAQUETAS.

3.3 SERPENTINES.

3.1 CAMBIADORES DE CALOR.

Estos dispositivos son un medio externo para controlar la temperatura. Son usados, cuando por ejemplo, el calor de una reacción no puede ser disipado a la velocidad necesaria para mantener la reacción bajo control, o bien a que no fué posible considerar en el reactor el área necesaria. Normalmente se establece un circuito, que va del reactor a una bomba, de la bomba al cambiador de calor y del cambiador de calor al reactor, haciendo circular la cantidad adecuada del fluido por este circuito, para mantener el control de la temperatura, dicho fluido se regresa a través de un tubo sumergido en el cual a veces se instala un eductor, proveyendo además de este modo al reactor, con una agitación adicional. Otras veces el cambiador de calor se utiliza en reactores en donde se efectúa una reacción en la que es posible hacer una vaporización parcial de uno de los componentes, el cual se condensa posteriormente y se regresa al sistema en forma de condensado, como ocurre en los procesos de nitración de compuestos aromáticos.

Por no formar el cambiador de calor parte integral del reactor, no se considera en este capítulo el estudio de estos dispositivos.

3.2 CHAQUETAS.

Las chaquetas son el medio óptimo para calentamiento o enfriamiento de reactores o recipientes, en términos de control de temperatura, eficiencia y calidad del producto.

El uso de las chaquetas como un medio para transmitir calor, ofrece las siguientes ventajas:

- a) Todos los líquidos pueden ser utilizados como medio de enfriamiento o calentamiento, así como vapor de agua y otros vapores orgánicos a altas temperaturas.
- b) La circulación del fluido, la temperatura y la velocidad de transmisión de calor, pueden ser controladas con exactitud.
- c) Los materiales de fabricación de la chaqueta se pueden seleccionar de tal forma que sean más económicos, que los del recipiente.
- d) Los problemas de contaminación, limpieza y mantenimiento son prácticamente nulos.
- e) Se logra la eficiencia, economía y flexibilidad máximas.

3.2.1 Tipos de Chaquetas.

Las chaquetas son principalmente de tres tipos:

3.2.1.1 De Hoyuelos.

3.2.1.2 De Medias Cañas.

3.2.1.3 Convencional.

Esta variedad da al Ingeniero Químico, la posibilidad de escoger el medio de transmisión de calor adecuado en el diseño de reactores intermitentes para procesos específicos.

3.2.1.1 Chaqueta de Hoyuelos.

El diseño de la chaqueta de hoyuelos, Fig. 3.1 (a), permite su construcción de lámina delgada de diferentes metales, sin sacrificar la resistencia mecánica necesaria para soportar las presiones de operación, obteniéndose como resultado un ahorro considerable en los costos, si se le compara con la chaqueta convencional. El ahorro aumenta sobre todo con reactores grandes, o con chaquetas que trabajarán a presiones elevadas.

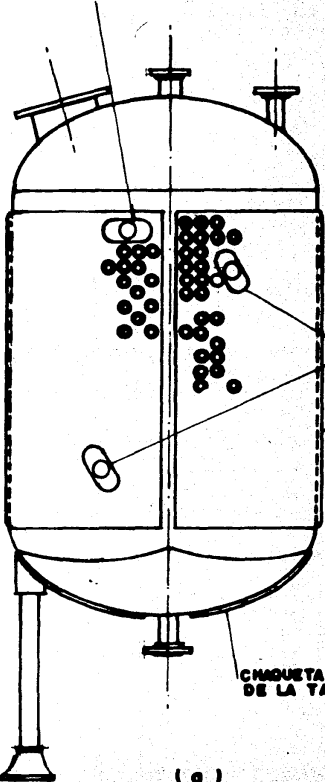
El diseño está aprobado por la organización de ingeniería de E.U.: "National Board of Boiler Pressure Vessels Inspectors" y puede ser estampado con el sello de "The ASME Unfired Pressure Vessels Code", en chaquetas que trabajarán a presiones hasta de 21.13 Kg/cm² (300 lb/pulg²). Para tal efecto se calculan los espesores del material para soportar estas presiones.

Cuando una chaqueta de este tipo se utiliza para enfriamiento, se pueden instalar separadores espaciados, de acuerdo con las necesidades, para asegurar una circulación efectiva del fluido de enfriamiento.

Las chaquetas de hoyuelos se pueden fabricar de una gran variedad de materiales, entre los cuales se pueden mencionar el acero al carbono, acero inoxidable tipos 304, 304L, 316, 316L, así como "Inconel" e "Incoloy".

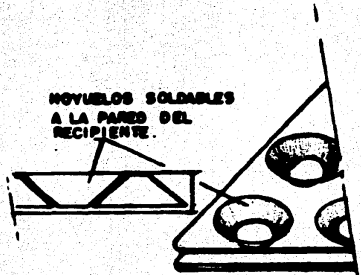
De la comparación de costos entre esta chaqueta y las chaquetas -

BOQUILLA DE SALIDA 31mm (1 1/8")



(a)

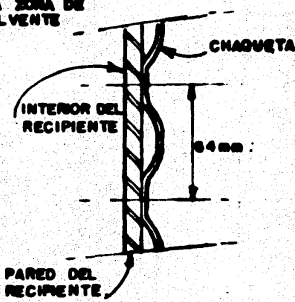
NOVUELOS SOLDABLES
A LA PARED DEL
RECIPIENTE.



(b) DETALLE DE FABRICACION

BOQUILLAS DE ENTRADA
31mm (1 1/8")

CHAQUETA ZONA DE
LA ENVOLVENTE



(c) DETALLE DE FABRICACION.

FIG. 3.1.- CHAQUETA DE NOVUELOS

convencional y de medias cañas, obtenemos lo siguiente:

- a) Es más económica que la chaqueta convencional, si el factor que determina el espesor de los materiales para el recipiente es la presión de lado de la chaqueta, como regla general se puede establecer que si la presión interna es mayor 1.67 veces el valor de la presión externa, la presión externa no será el factor gobernante.
- b) Es más económica que la chaqueta de medias cañas, si la presión interna del recipiente es muy baja y el recipiente es tan pequeño que el uso de un acero chapado ("Clad steel") no es económico.

Sin embargo, en recipientes con volúmenes menores que 1893 l (500 gal), no es conveniente usar una chaqueta de hoyuelos.

3.2.1.2 Chaqueta de Medias Cañas.

El diseño de este tipo de chaqueta ver Fig. 3.2 (a), proporciona velocidad y turbulencia elevadas y la circulación se puede controlar tan rígidamente, que es posible producir un coeficiente de película elevado. Lo anterior, más la rigidez estructural que se obtiene, hacen de la chaqueta de medias cañas, un diseño particular aplicable a una amplia variedad de procesos.

Esta chaqueta se recomienda especialmente para servicios a alta temperatura y con todos los tipos de fluidos usados para transmi-

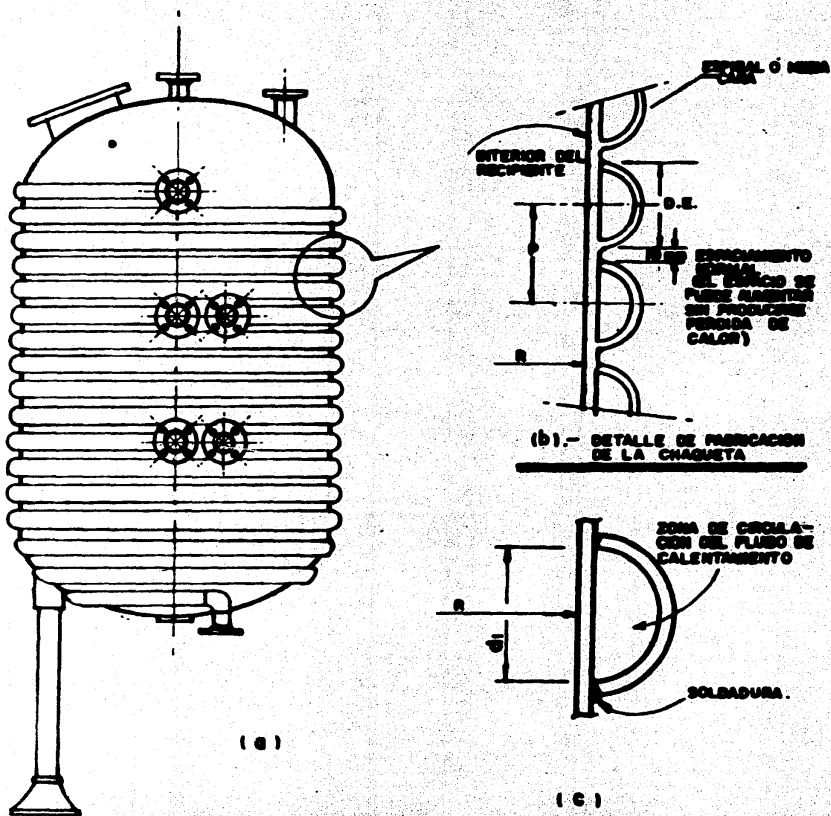


FIG. 3.2.-CHAQUETA DE MEDIAS CAÑAS

tir calor. El diseño es ideal para el uso con aceites calientes, debido a la resistencia estructural del equipo. Se puede usar eficientemente con agua y en muchos casos, es mejor que las chaquetas convencional o de hoyuelos, por la buena distribución del fluido que se logra y por la facilidad para calcular la caída de presión a través de ella. Cuando se usa vapor de agua como medio de calentamiento, se deberán localizar boquillas extras para purgar rápidamente los condensados y evitar el flujo de las dos fases. Además de los fluidos mencionados usados para calentamiento, es posible utilizar los glicoles para enfriamiento. Ya que no existen limitaciones para la cantidad y localización de boquillas de entrada y salida, esta chaqueta puede dividirse en secciones múltiples como se muestra en la Fig. 3.2 (a), con lo que se obtiene la máxima eficiencia y flexibilidad. De este modo es posible utilizar el área total de transmisión de la chaqueta o parte de ella, lograndose además la posibilidad del procesamiento de lotes de productos de diferentes volúmenes en el mismo recipiente. (Esto no es posible con las chaquetas de hoyuelos o convencional, ya que el costo de procesamiento de volúmenes menores a la capacidad del reactor sería elevada y por tanto antieconómico). Por otra parte el hecho de utilizar una sección de calentamiento de la chaqueta, reduce la caída de presión del fluido que se utiliza como medio transmisor, finalmente, otro aspecto quizás el más importante que se logra con la chaqueta de medias cañas es permitir la disminución del espesor de la pared del recipiente, que en la fabricación de reactores con aceros aleados o con "Clad Steel", sig-

nifica un ahorro económico muy importante.

Para obtener la máxima transmisión de calor, la distancia o espaciamiento entre las espiras de los tubos, es de 19 mm (3/4"). Sin embargo, si el coeficiente de transmisión de calor de la película interna es extremadamente bajo, el espacio entre las espiras se puede aumentar sin pérdida de superficie de calentamiento, debido a la equivalencia que tiene la media caña soldada a la pared del recipiente, con un tubo aletado.

Las chaquetas de medias cañas, son fabricadas normalmente de acero al carbono. Para temperaturas mayores de 149 °C o menores de -29 °C, la chaqueta debe fabricarse del mismo material que el recipiente para evitar problemas por las diferencias en los coeficientes de dilatación. Entre los materiales que pueden utilizarse para tal propósito están los aceros inoxidables así como el inconel, el monel y el níquel.

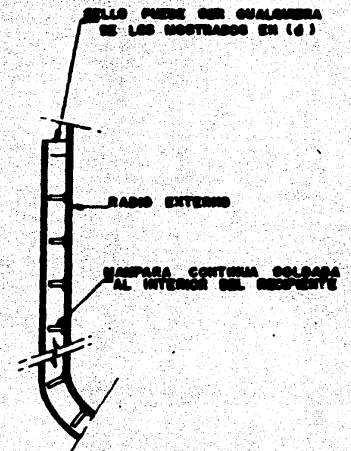
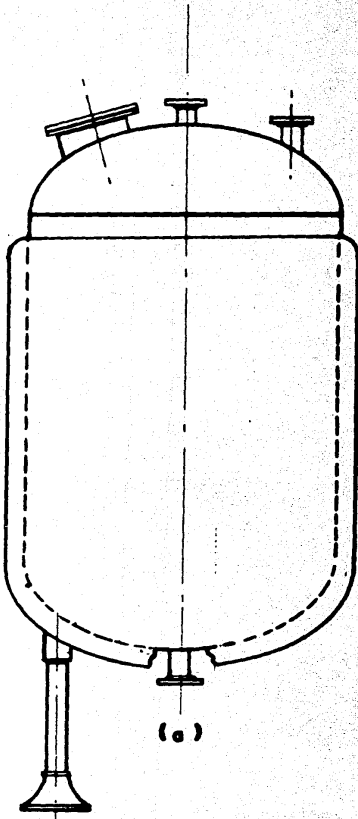
Las dimensiones estándares de las medias cañas son: 60 mm, 89 mm y 114 mm, para el diámetro exterior. Cuando se fabrican de acero al carbono los espesores de pared son: 4.8 mm para tubos de 60 mm de diámetro y 6.4 mm para tubos de 89 y 114 mm de diámetro. Cuando se fabrican de aceros aleados el espesor de la pared es de 3.2 mm para todos los diámetros. En caso de hacer una comparación en costos entre esta chaqueta y las de hoyuelos y medias cañas, se deben tomar como guía los siguientes puntos:

- a) Como en el caso de la chaqueta de hoyuelos, si la presión de la chaqueta es el factor que determina el espesor de la pared del recipiente, la chaqueta de medias cañas será más económica que la convencional.
- b) Si la presión en el interior del recipiente es bastante grande o el recipiente es tan grande que el uso de "Clad steel" es económico, entonces la chaqueta de medias cañas, será más baja en costo que la chaqueta de hoyuelos y que la chaqueta convencional, y por supuesto si al mismo tiempo la condición No. 1 se satisface, será menos costosa que la convencional.
- c) Con recipientes cuyo volumen es menor que 1893 l (1500 gal) no es práctico usar la chaqueta de medias cañas.

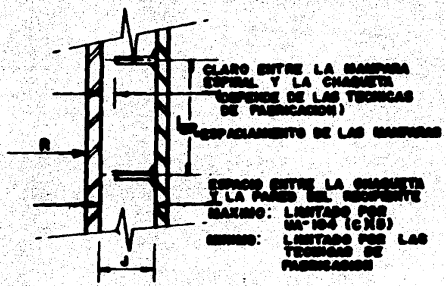
3.2.1.3 Chaqueta Convencional.

Las chaquetas convencionales Fig. 3.3 (a), se usan para recipientes de volumen pequeño (menor que 1893 l - 500 gal -), sin embargo, es necesario considerar que como en los reactores vidriados, este es el único tipo de chaqueta que es compatible con la aplicación de la capa de vidrio en el recipiente; en estos equipos se usan hasta para 18925 l (5000 gal). También se usa para altas presiones, en los casos en los que la presión interna del recipiente es mayor que el doble de la presión a que trabajará la chaqueta.

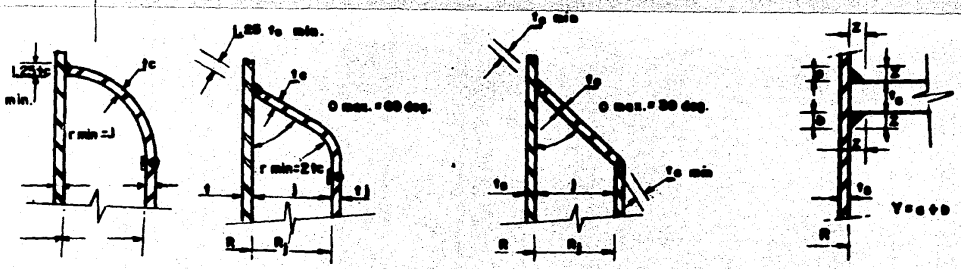
Descrita de un modo simple, la chaqueta convencional es una cu -



(b) DETALLE DE FABRICACION



(c) DETALLE DE FABRICACION



(d) DIFERENTES TIPOS DE SELLO

FIG.3.3.- CHAQUETA CONVENCIONAL.

bierta extra alrededor de todo el recipiente o parte de él, con un espacio anular (generalmente concéntrico), entre la pared exterior del recipiente y la pared interior de la chaqueta. Cuando es necesario, se instalan mamparas para controlar la circulación del fluido que transmite el calor.

En la Fig. 3.3 (b) se muestran varios arreglos.

Aunque la chaqueta convencional es aún la más popular en aplicación, actualmente su uso ya no es tan frecuente como en el pasado. Esto ocurre especialmente con recipientes enchaquetados que son fabricados de diferentes aleaciones.

La configuración normal de este tipo de chaqueta, se muestra en la Fig. 3.4 (a). Esta configuración asegura la máxima eficiencia en la transmisión de calor al utilizar el área máxima del recipiente en contacto con la chaqueta. En la misma figura, se muestra una sección en corte, nótese que la superficie de transmisión de calor útil, en el interior de la chaqueta, se extiende hasta la parte más alta, cercana a la unión de la tapa y envolvente del recipiente.

Una variante al arreglo anterior, frecuentemente usada es la mostrada en la Fig. 3.4 (b), y se logra dividiendo la parte recta en dos o más secciones de chaqueta, separadas una de otra, o bien si se desea el recipiente puede ser enchaquetado únicamente en la parte recta Fig. 3.4 (c), lográndose una cobertura completa o una

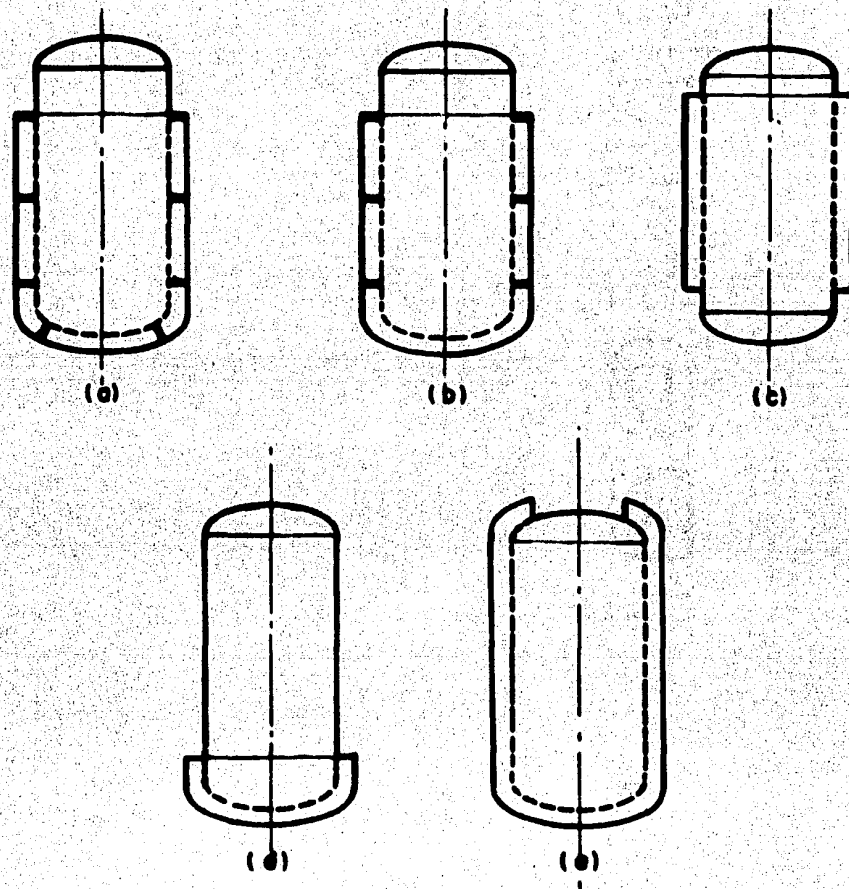


FIG. 3.4.- DIFERENTES CONFIGURACIONES PARA LA CHAQUETA CONVENCIONAL

cobertura parcial, finalmente se puede fabricar una chaqueta que cubra únicamente la tapa, ver Fig. 3.4 (d), o bien una chaqueta que cubra casi todo el recipiente ver Fig. 3.4 (e).

3.2.2. Cálculos de Transmisión de Calor

La ecuación de Stanton, es la ecuación base para calcular la Transmisión de calor en un anillo, la cual es aplicable a los tres tipos de chaquetas, convencional, de hoyuelos y de medias cañas, tal ecuación es:

$$= 0.023 N_{Re}^{-0.2} N_{Pr}^{-2/3} C_p G \left(\frac{\mu_w}{\mu} \right)^{0.14}$$

Esta fórmula varía para cada tipo de chaqueta, ya que cada una de ellas tiene un radio hidráulico equivalente, D_M , diferente. El valor del D_M es cuatro veces el área de flujo, dividida entre el perímetro húmedo.

Para una chaqueta convencional el D_M se calcula de la siguiente manera (ver Fig. 3.3 (c):

$$\text{Area de flujo} = J \times l_{BP}$$

$$\text{Perímetro húmedo de transmisión de calor} = l_{BP}$$

$$D_M = \frac{4 \times J \times l_{BP}}{l_{BP} (12 \text{ pulg/pie})} = \frac{J}{3} \text{ (en pies)} \times 304.8 = \text{mm}$$

Para una chaqueta de medias cañas, tenemos (ver Fig. 3.2 (b)

$$D = \frac{4 \times 0.5 (\pi/4) (d_i)^2}{d_i (12 \text{ pulg/pie})} = 0.1308 d \times 304.8 = \text{mm}$$

Para la chaqueta de hoyuelos tenemos, (ver Fig. 3.1 (b)).

$$D_H = \frac{4 \times 0.412}{2.5 (12 \text{ pulg/pie})} = 0.05493 \text{ pie} \times 304.8 = 16.74 \text{ mm}$$

NOTA: Hay 10.5 mm (0.412 pulg cuadradas), promedio, de área de -- flujo entre las líneas de centro de las soldaduras de los hoyuelos, para una distancia de 63.5 mm (2 1/2") entre centros de hoyuelos, en un paso cuadrado.

Al revisar el coeficiente de película en la chaqueta de hoyuelos, nos encontramos que el calculado será bajo debido a que la velocidad en este tipo de chaqueta está limitada a aproximadamente 0.61 m/seg (2 pie/seg) debido a la caída de presión por pie (los hoyuelos provocan una turbulencia muy grande). Comparando la caída de presión en esta chaqueta con una sección anular que tenga la misma sección transversal de flujo, pero sin hoyuelos, la caída de presión en la chaqueta de hoyuelos es de 10 a 12 veces mayor que la de la sección mencionada.

Usando la relación de que la caída de presión es proporcional al cuadrado de la velocidad, y el coeficiente de película es proporcional a la relación de velocidades elevadas a una potencia cuyo valor es 0.8, el coeficiente de película podría ser aumentado de 2 a 2.5 veces, considerando la turbulencia causada por los hoyuelos. (En algunos casos, el valor del Número de Reynolds, para la

chaqueta de hoyuelos, está localizado en una región de flujo laminar, sin embargo la turbulencia provocada por los hoyuelos puede determinar que el flujo no sea laminar).

3.2.3 Métodos de Cálculo para Determinar la Caída de Presión.

El cálculo de la caída de presión a través de la chaqueta, es de gran importancia, sobre todo en los casos en que se desea obtener un coeficiente de transmisión de calor elevado en el lado de la chaqueta a expensas de una gran velocidad del fluido. Si la caída de presión calculada es mayor que la disponible, por ejemplo de una bomba de desplazamiento positivo, la presión de la bomba podría exceder la presión de diseño de la chaqueta y dañarla; en el caso de que se estuviera usando una bomba centrífuga, la velocidad del fluido se ajustaría a la presión disponible de la bomba centrífuga, obteniendo como resultado un coeficiente de transmisión de calor de película bajo. Para una velocidad dada la caída de presión en una chaqueta de hoyuelos o de medias cañas, es mayor que en una chaqueta convencional, debido a la turbulencia del fluido que se origina en las primeras.

En los casos en los que controla el coeficiente de transmisión de calor de la película de fluido en el interior del reactor, se pueden obtener valores óptimos para el coeficiente total de transmisión de calor con una velocidad relativamente baja del fluido de calentamiento o enfriamiento en el lado de la chaqueta.

La fórmula básica para calcular la caída de presión en el interior de secciones anulares, es la ecuación de Fanning la cual tiene la forma siguiente:

$$\Delta P = \frac{4 f G^2 L}{2gPD (144)} = \frac{1b}{\text{pulg}^2} \div 14.2 = \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Para flujos en los que el Número de Reynolds es mayor que 10,000 se usa:

$$f/2 = \frac{0.023}{\left(\frac{D_H G_1}{\mu}\right)^{0.2}}$$

En una chaqueta convencional el radio hidráulico equivalente es:

$$D_H = \frac{4 \times (\text{Area transversal de flujo})}{\text{Perímetro mojado}}$$

$$D_H = \frac{4 \times J_{SP} \times J}{(2 J_{SP} + 2J) (12 \text{ pulg/pie})} = \frac{J_{SP} \times J}{6(J_{SP} + J)}$$

En una chaqueta de medias cañas es:

$$D_H = \frac{4 \times 1/2 (T d_i 2/4)}{(d_i + 1/2 T) (12 \text{ pulg/pie})} = (0.0509 d_i) \times 304.8 = \text{mm}$$

El factor de fricción:

$$f/2 = \frac{0.023}{(D_H G_1 / \mu)^{0.2}}$$

es principalmente para tubos lisos, es decir sin rigosidad.

En las cartas que grafican Número de Reynolds VS factor de Fric--

ción se muestra que para un mismo valor de Números de Reynolds el tubo comercial, tiene un factor de fricción aproximadamente 15% mayor que para el equivalente en tubo liso. De aquí que para recipientes con chaqueta de medias cañas fabricadas con tubo de acero al carbono, se recomienda agregar el correspondiente 15% al valor de la caída de presión por pie de tubo en el cálculo efectuado.

Para determinar la longitud del trayecto recorrido por el fluido con el fin de usar esta longitud, en la ecuación de Fanning, para las chaquetas convencional con mamparas y de medias cañas, estas se pueden comparar con un serpentín. La caída de presión en un serpentín se puede calcular del siguiente modo:

Cada sección de 90° del serpentín se puede considerar como un codo de 90°. Usando la figura 3.5 se puede calcular la resistencia originada por estos codos. Para lo cual se debe considerar el diámetro exterior del recipiente como el diámetro medio de la espira "R" y como diámetro de la espira a -- "d", (en el caso de la chaqueta de medias cañas, el número de "espiras" es el número de vueltas de las medias cañas alrededor del recipiente. En la chaqueta convencional el número de espiras esta basado en el número de pasos de la mampara en espiral). En ambos casos se debe usar el concepto de radio hidráulico equivalente.

Basándose en una relación R/D_M dada, es posible obtener la -

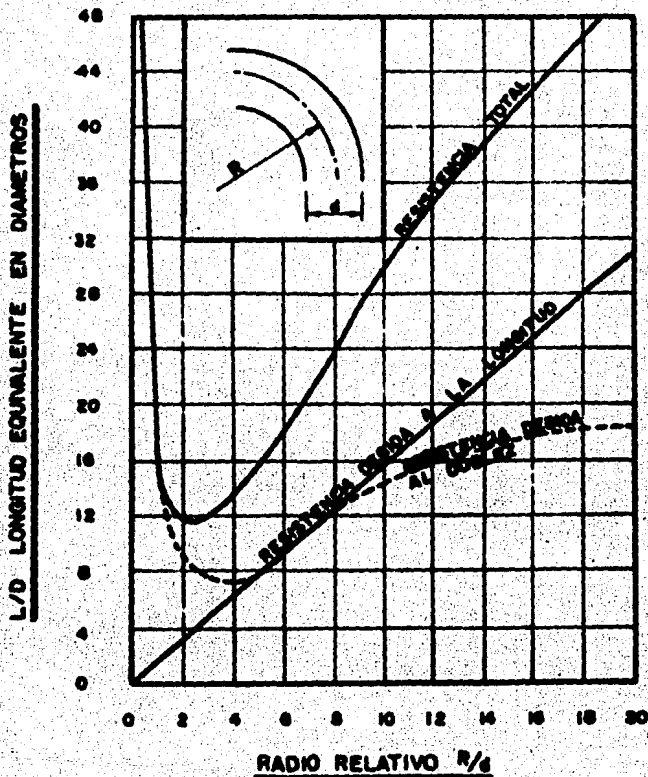


FIG. 3.8 - RESISTENCIA DE DOBLECES

Esta gráfica muestra la resistencia al flujo de los dobleces de 90° en términos de longitud equivalente de tubería recta.

La resistencia de dobleces de más de 90° se calcula usando la siguiente fórmula:

$$L/D = (n-1) \times Re + Rb/2 + R$$

En donde:

n = codos de 90° en un serpentín = Número de espiras $\times 4$.

Re = Resistencia debida a la longitud de un dobléz de 90° , en L/D .

Rb = Resistencia debida a un dobléz de 90° , en L/D .

R = Resistencia total debida a un dobléz de 90° , en L/D .

Ejemplo: Un serpentín con 4 espiras, es decir 16 dobleces de 90° con un radio relativo, $R/d = 5$, tiene la siguiente longitud equivalente en diámetros de tubería:

$$L/D = (16-1) \times 8 + 8/2 + 16 = 196$$

resistencia de un dobléz, la resistencia debida a la longitud y la resistencia total, con la Fig. 3.5. La longitud equivalente total en diámetros de tubería, se obtiene multiplicando el número de vueltas del serpetín por cuatro, lo cual nos da el número de dobles de 90° ; de esta cantidad, restar un dobléz, multiplicar el resultado por el valor de la resistencia debida a la longitud, sumar la mitad de la resistencia debida al dobléz, y finalmente sumar la resistencia debida a un dobléz de 90° . Ver ejemplo Fig. 3.5.

Después de determinar la longitud equivalente total en diámetros de tubo multiplicar por el D_w con lo cual obtendremos la longitud total de tubería. La caída de presión por cada pie de tubo multiplicada por la longitud total, dará la caída de presión total, sin incluir las caídas de presión originadas por la entrada y salida.

Debido a la turbulencia creada por los hoyuelos, el cálculo de la caída de presión para la chaqueta de hoyuelos es algo complejo, para este caso se han preparado gráficas de datos experimentales como la de Brighton mostrada en la Fig. 3.6. Estas gráficas deberán usarse con ciertas reservas sobre todo si se utilizan fluidos de enfriamiento o calentamiento diferentes.

3.2.4 Selección de la Chaqueta para la Aplicación Específica.

Durante el proceso de diseño, se deberán analizar diferentes posi

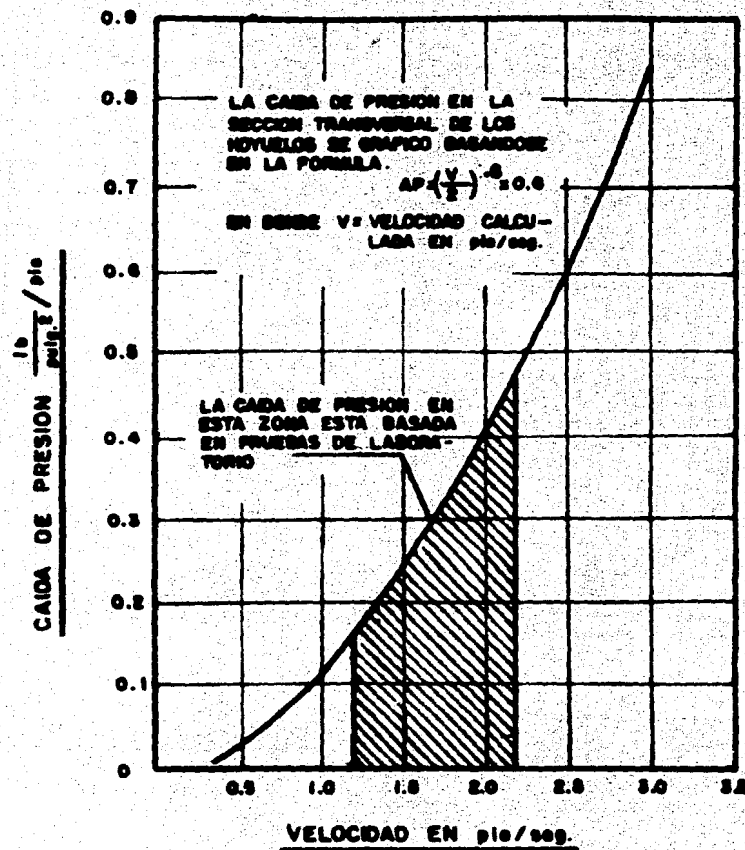


FIG 3.6.- GRAFICA PARA DETERMINAR LA CAIDA DE PRESION EN CHAQUETAS DE HOYUELOS

bilidades antes de decidir el tipo de chaqueta para un recipiente y proceso específicos. Hay que considerar que no con cualquiera de ellas es con la que se logrará la máxima eficiencia del fluido que se usa para transmitir el calor.

3.2.4.1 Agua.

Para evitar la posibilidad de corrosión por fatiga debido a la -- presencia de cloruros en el agua, la chaqueta de hoyuelos debe fabricarse de aleaciones con un contenido elevado de níquel, para lo cual conviene considerar que es un material muy costoso. Para la chaqueta de medias cañas puede usarse como ya se mencionó, placa de acero al carbono de 6.4 mm (1/4") de espesor, asimismo para la chaqueta convencional es posible usar acero al carbono. En el caso de las chaquetas de medias cañas, el espesor del recipiente puede disminuirse considerablemente, obteniéndose con esto algunas ventajas económicas sobre la de tipo convencional. El uso de las chaquetas de medias cañas de acero al carbono es aplicable para recipientes de gran tamaño especialmente los fabricados de "Clad steel". Si se va a utilizar en servicios de enfriamiento con agua, o para vapor a presiones menores que 3.2 Kg/cm² (45 - psi), es posible usar esta chaqueta fabricada de acero al carbono para un recipiente fabricado de acero inoxidable.

En servicios en donde es necesario utilizar volúmenes grandes de agua para mantener una ΔT_{ML} (diferencia de temperaturas media lo-

garítmica), elevada, los mejores resultados se obtienen con la chaqueta convencional. Los espacios pequeños en la chaqueta de hoyuelos, provocan una caída de presión demasiado elevada. En muchas aplicaciones la chaqueta de medias cañas, tendrá que dividirse en secciones múltiples o zonas para evitar los problemas de volúmenes grandes de agua por sección de flujo, lo cual origina una caída de presión elevada. Para lograr una buena distribución del fluido en las diferentes zonas será necesario la utilización de un cabezal. El ahorro que se tiene en el recipiente al ser de menor espesor, con este tipo de chaqueta generalmente paga los aumentos de costo por este tipo de aditamentos.

3.2.4.2 Vapores de Dowtherm.*

El Dowtherm, es un producto de la compañía Dow Chemical y es una mezcla de 26.5% de difenil y 73.5% de óxido de difenilo. A presión atmosférica hierve a 258 °C (496 °F) y a 5.63 Kg/cm² (80 psig) hierve a 354 °C, (670 °F); las presiones de vapor en estas condiciones son 44.7 Kg/cm², (635 psig) y 176.1 Kg/cm², (2500 psig), para soportar estas presiones se tendrán que considerar espesores de pared muy gruesos.

La chaqueta convencional que puede tener una distancia variable entre la pared de esta y el recipiente, es muy efectiva cuando se usa con el Dowtherm como fluido térmico. Ya que este producto tiene una entalpia baja (aproximadamente un décimo de la de vapor

* Marca Registrada

de agua), es necesario usar un espacio anular mayor para un determinado flujo de calor, que el que sería necesario usando vapor de agua. Para esto se deberá considerar que la chaqueta debe diseñarse de acuerdo con las especificaciones establecidas por el Código ASME, (American Society of Mechanical Engineers). El espacio anular máximo permitido, está limitado por la sección UA-104 párrafo (c) (5) de este Código. La dimensión mínima para este mismo espacio, está limitado por la técnica y habilidad del fabricante para lograrlo.

En el caso de la chaqueta de hoyuelos, el espacio entre la pared del recipiente y la chaqueta es suficiente para dar cabida al volumen de vapor de "Dowtherm" sin tener una caída de presión elevada. Sin embargo para muchas instalaciones en las que se va a usar vapor de "Dowtherm" es necesaria una línea de alimentación con un diámetro de cuando menos 152 mm (6"). Normalmente la boquilla más grande que puede instalarse en un cabezal de una chaqueta de hoyuelos es 76 mm (3"), por tanto será necesario instalar en esta chaqueta varios cabezales, para poderse conectar a la línea de 152 mm (6"). En los casos en los que el flujo de vapor de "Dowtherm" es más elevado, es necesarios hacer más grandes los cabezales. Si se usa una chaqueta de medias cañas con "Dowtherm" es necesario instalar varias entradas y salidas para evitar la innundación parcial de las medias cañas con condensados de este fluido. Estas variantes serán ventajosas sólo para procesos en donde se necesite una chaqueta en secciones o de zonas múltiples.

3.2.4.3 Vapor de Agua.

Las chaquetas de hoyuelos y la de medias cañas, ofrecen grandes ventajas económicas sobre la convencional cuando se usa como fluido de calentamiento el vapor de agua. La Sección VIII del Código ASME, limita el uso de la chaqueta de hoyuelos a 21.1 Kg/cm^2 (300 psi) y la de medias cañas a 52.8 Kg/cm^2 (750 psi). Entre mayor es la presión de operación del vapor, mayor es la economía obtenida con la chaqueta de hoyuelos, y mejor aún resulta la de medias cañas. Aún considerando que el peso específico del vapor aumenta con el incremento de presión; los espacios estrechos que deja la chaqueta de hoyuelos no crea ninguna dificultad.

Con gastos elevados en la chaqueta de medias cañas posiblemente convenga utilizar secciones múltiples, para evitar que los condensados cubran demasiado el área de transferencia. Si en algunas ocasiones el coeficiente de la película interno es bajo, (en valores de 10 a 25) se pueden obtener ventajas económicas, reduciendo el número de espiras en la tapa y en la envolvente.

3.2.4.4 Aceite Caliente, "Dowtherm" y "Therminol" en Fase Líquida.

Con el uso de estos fluidos las temperaturas son altas y las presiones son bajas, por lo cual los esfuerzos a los que se somete el recipiente cubierto por la chaqueta, son bajos, dando como resultado que las chaquetas de hoyuelos y las de medias cañas son una solución mejor a un problema específico, en comparación con

la chaqueta convencional.

Con estos fluidos, además de ser necesario un espesor de pared mucho mayor en la de tipo convencional en comparación con los otros dos diseños, la convencional, necesita juntas de expansión para aliviar los esfuerzos originados por la diferencia en expansión térmica entre el recipiente interior y la chaqueta. Estos esfuerzos son originados por una diferencia de temperaturas o una diferencia de materiales (por ejemplo recipiente de acero inoxidable y chaqueta de acero al carbono), por otra parte el sello para unir y cerrar la chaqueta con la envolvente del tanque, podría ser más costoso.

La chaqueta de medias cañas, es superior a la de hoyuelos por su gran resistencia estructural. En aplicaciones a temperaturas elevadas y durante los incrementos de temperatura, se generan momentos de flexión elevados en las boquillas de la chaqueta, debido al alargamiento de las tuberías y de la pared del recipiente. Los cabezales de interconexión de la chaqueta de hoyuelos normalmente son de material muy delgado y no tienen ni la capacidad estructural para absorber los esfuerzos desarrollados ni las características mecánicas para transmitir los esfuerzos a la pared del recipiente. Los tubos de la chaqueta de medias cañas son de material más grueso y están unidos directamente a la pared del recipiente, por medio de soldaduras en ambos lados, obteniéndose como resultado que este tipo de chaquetas puede soportar cargas o esfuerzos originados por las tuberías, de cualquier modo, estos es-

fuerzos deben considerarse al diseñar este tipo de chaqueta para evitar distorsiones.

Los recipientes con chaqueta de hoyuelos se usan sin ninguna dificultad con aceite y "Dowtherm" calientes, sin embargo, se deberán considerar las siguientes observaciones:

- a) Utilizar el material adecuado para la chaqueta, de tal modo que su coeficiente de expansión térmica no difiera mucho del coeficiente de expansión térmica del recipiente.
- b) Diseñar los cabezales de interconexión para evitar concentración de esfuerzos, o bien usar mangueras flexibles para eliminar los esfuerzos externos en las conexiones de la chaqueta y en los cabezales de interconexión.

En las chaquetas convencional y de hoyuelos, el recorrido del fluido y su velocidad son controlados por mamparas que solamente se sujetan al recipiente interior. En aplicaciones para enfriamiento en las que el medio de enfriamiento tiene una viscosidad elevada, la caída de presión puede elevarse razonablemente, en tal caso habrá una gran tendencia del fluido a pasar por las ranuras de las mamparas. Esto se puede evitar haciendo un ajuste apropiado de las mamparas a la chaqueta durante el proceso de fabricación; es conveniente tomar en cuenta esto, durante una selección, ya que por este motivo se agregará un costo extra al recipiente. la construcción de la chaqueta de medias cañas es tal que no es posible tener fugas o derivaciones, lo cual ayuda a mantener un

coeficiente adecuado de transmisión de calor del lado de la chaqueta, bajo cualquier condición. En algunos casos es posible trabajar hasta con velocidades de 4.6 m/seg (15 pie/seg).

Si el coeficiente de la película del interior del tanque es el que controla el fenómeno de transmisión, cualquier fuga o derivación en la chaqueta convencional no tiene importancia y puede considerarse sin ningún efecto.

Si la combinación de los coeficientes de la película de la chaqueta y el interior de el recipiente es menor que 50, el espesor de la pared del metal no tendrá ningún efecto apreciable, sobre el valor de coeficiente total "U", pero si el valor es mayor que 50, las chaquetas de medias cañas y hoyuelos con las cuales es posible usar un espesor de pared mucho menor en comparación con la chaqueta convencional, afectarán el coeficiente total "U" aumentándolo.

Para recipientes en los que la presión interna es más del doble de la presión del lado de la chaqueta, lo más económico es la chaqueta convencional. El recipiente deberá calcularse para ambas presiones, externa e interna. Si el espesor necesario para presión externa es 3.2 mm (1/8") mayor que el espesor necesario para presión interna en un recipiente fabricado de un acero inoxidable, entonces las chaquetas de hoyuelos y de medias cañas tendrán mayores ventajas económicas sobre la de tipo convencional.

3.2.5 Límites de Aplicación para Presión y Temperaturas.

3.2.5.1 Chaqueta Convencional.

Este tipo de chaqueta no tiene limitaciones por lo que se refiere al diseño, sin embargo, si la presión en la chaqueta excede los 7 kg/cm^2 (100 lb/pulg^2) el espesor de la pared del recipiente debe ser mayor y la transmisión de calor a través de la pared se reduce. En el caso de un reactor de acero inoxidable, resulta un recipiente muy costoso. Para usos a temperaturas elevadas, se deberán considerar las expansiones térmicas diferenciales entre el metal del recipiente y el de la chaqueta, así como, también la diferencia de espesores entre las dos paredes.

3.2.5.2 Chaqueta de Hoyuelos.

Este tipo de chaqueta está limitada a una presión de 21.1 kgs/cm^2 (300 lb/pulg^2). Por lo que se refiere a temperatura se han construido recipientes para trabajar a $371 \text{ }^\circ\text{C}$ ($700 \text{ }^\circ\text{F}$). A tales temperaturas es necesario que la chaqueta sea fabricada de un metal que tenga el mismo coeficiente de expansión térmica que el del metal empleado para el recipiente. Se deben tomar precauciones adicionales usando mangueras flexibles para evitar esfuerzos sobre los cabezales de la chaqueta, al hacer la interconexión con el sistema de calentamiento.

3.2.5.3 Chaqueta de Medias Cañas.

Se han diseñado y construido recipientes para trabajar a $42.3 - -$

kg/cm² (600 lb/pulg²), a 382 °C (720 °F). Por lo que se refiere a limitaciones de temperatura, una chaqueta de medias cañas de acero al carbono puede utilizarse con un recipiente de acero inoxidable hasta temperaturas de 149 °C (300 °F), a temperaturas mayores que esta la chaqueta deberá ser también de acero inoxidable. Esta chaqueta es mejor para usos a temperaturas y presiones elevadas.

3.2.6 Superficie Disponible para Transmitir Calor.

Con una chaqueta convencional no existe duda acerca del área con que se dispone para la transmisión: es siempre el área cubierta por la chaqueta.

En chaquetas de medias cañas, algunos autores consideran que los espacios entre las medias cañas no son útiles para la transmisión de calor, lo cual no es muy razonable ya que dichos espacios actúan como si fueran aletas de las medias cañas.

Con respecto a la chaqueta de hoyuelos también algunos autores -- mencionan que las zonas centrales de los hoyuelos no son útiles para la transmisión de calor. Se puede considerar la misma analogía ya mencionada que la temperatura de la chaqueta es transmitida por conducción a la pared del recipiente, como si se tratara de una superficie distendida.

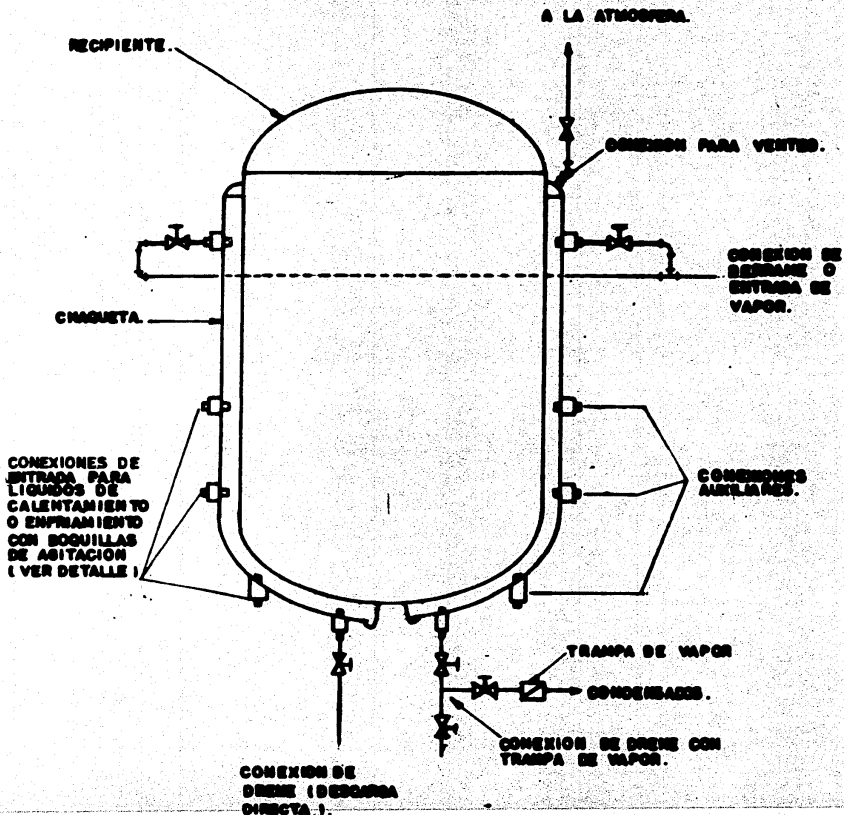
3.2.7 Las Chaquetas en los Reactores Vidriados.

Debido a las características de fabricación de un reactor vidriado

do, la única chaqueta que puede ser instalada en estos equipos es la de tipo convencional, los factores que norman su diseño, fabricación y operación, son los mismos que se han mencionado en páginas anteriores, para este tipo de chaquetas. En reactores vidriados, esta chaqueta cubre normalmente toda la sección cilíndrica del recipiente y la tapa inferior, las presiones de diseño pueden ser hasta de 6.3 kg/cm^2 (90 psi) y temperaturas de $177 \text{ }^\circ\text{C}$ ($350 \text{ }^\circ\text{F}$) pueden ser de una o varias secciones y con mamparas, generalmente en espiral o sin mamparas. Se instalan las boquillas necesarias para purgar el aire (en la parte más alta posible), para la (s) entrada (s) y salida (s) del fluido de calentamiento o enfriamiento, para la purga inferior y en algunos casos se instalan boquillas para toberas de agitación, ver Fig. 3.7, sobre todo cuando se usa como medio de calentamiento algún líquido y se quiere producir en él una gran turbulencia.

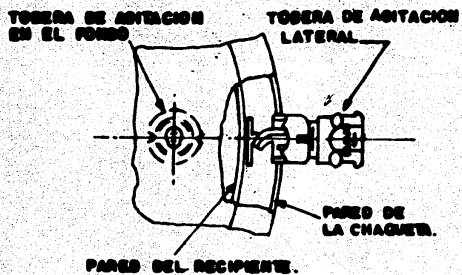
Generalmente se usan como fluidos de calentamiento o enfriamiento los siguientes:

- a) Vapor de agua.
- b) Aceites, therminol, dowtherm, etc., en medio líquido.
- c) Agua. Los mejores resultados se obtienen con agua tratada. Deberá contener alguna sustancia inhibidora de la corrosión.
- d) Salmuera. Esta puede utilizarse como líquido de enfriamiento, pero deberá mantenerse neutra. Jamás deberá usarse al--



NOTAS:

- 11.- LA FLECHA EN LA TOBERA INDICA LA DIRECCION DEL FLUJO AL INSTALARLA.
- 21.- INSTALAR DE TAL MODO QUE SE OBTENGA UN FLUJO EN EL SENTIDO DE LAS MANECILLAS DEL RELOJ.



VISTA EN SECCION DE LA INSTALACION DE UNA TOBERA DE ASITACION

FIG.3.7.- INTERCONEXION TIPICA DE UN REACTOR VIDRIADO.

ternativamente salmuera y agua caliente o vapor, en estas -- condiciones el grado de corrosión sería muy elevado.

- e) Amoniaco, etileno, glicerina, glicol, etc. Son líquidos que se pueden usar alternativamente como enfriadores. El amoniaco jamás deberá usarse alternativamente con agua caliente o vapor.

En la Fig. 3.7 se muestra una interconexión típica de un reactor vidriado con chaqueta convencional.

3.3 SERPENTINES.

Son uno de los medios más económicos para tener una superficie de transmisión de calor. Normalmente se fabrican rolando secciones largas y rectas de tubos de cobre, acero, acero inoxidable o de - alguna otra aleación, en forma de espiral, simple o doble, en la que la entrada y salida, se localizan de acuerdo con las conve- - niencias para conetarse al recipiente.

Los serpentines se instalan en recipientes cilíndricos verticales, con o sin agitación, previendo el espacio libre necesario entre - el serpentín y la pared del recipiente para permitir la circula-- ción de los fluidos de la reacción. Los serpentines se sujetan a uno o varios soportes verticales, en algunos casos es posible uti- lizar como soportes las mamparas del recipiente. Las espiras del serpentín normalmente van desde el fondo del recipiente hasta el nivel al que estará cargado el reactor, ver Fig. 3.8 (a). Cuando

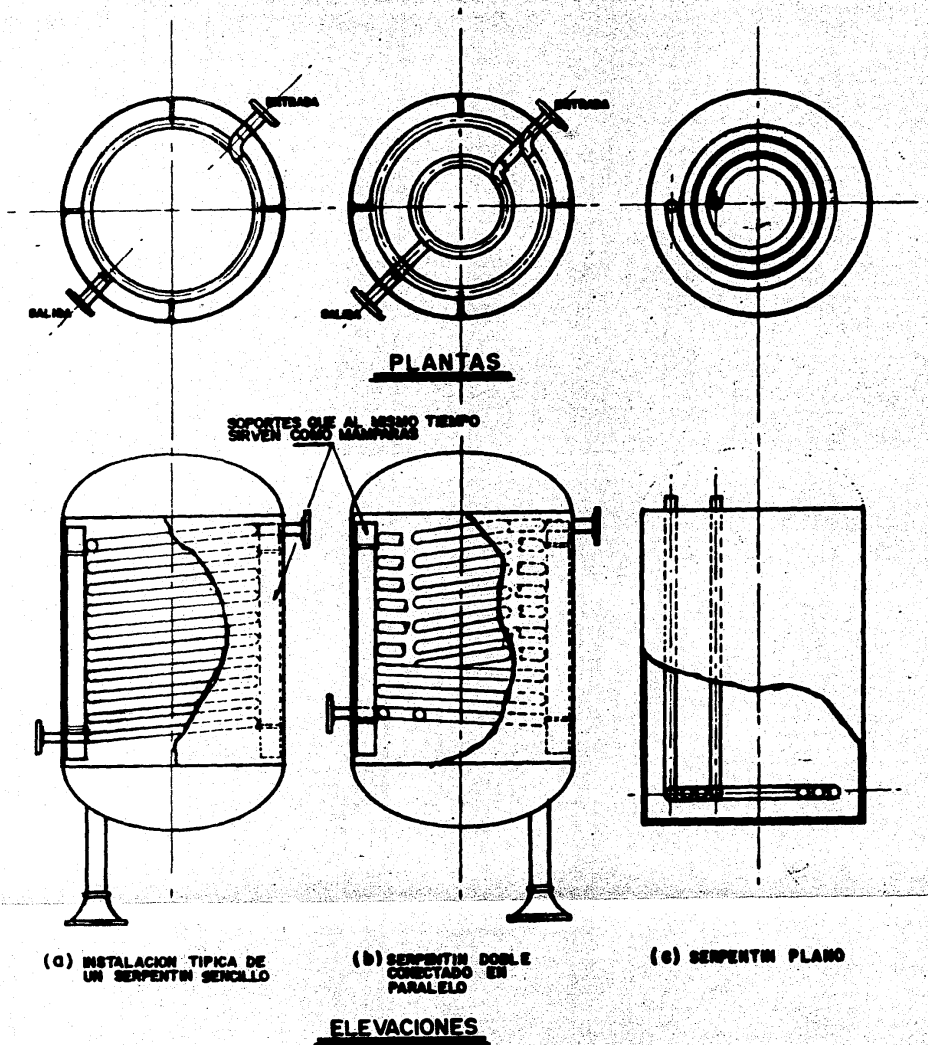


FIG.3.6.- DIFERENTES TIPOS DE SERPENTINES.

es necesario aumentar el número de serpentines, estos se colocan concéntricamente, conectados en serie o en paralelo de acuerdo -- con las limitaciones de la caída de presión, ver Fig. 3.8 (b). - Otro tipo de serpiente es el denominado plano que es precisamente una espiral enrollada en un plano horizontal, para instalarse cerca al fondo de un recipiente cilíndrico con fondo plano y lograr la transmisión de calor por convección, ver Fig. 3.8 (c).

Los serpentines, especialmente los que son de un diámetro mayor de 25.4 mm (1"), deben fabricarse con técnicas especiales para evitar que durante el rolado, se aplane el tubo a una sección de forma elíptica, que disminuya o reduzca el área de flujo.

3.3.1 Transmisión de Calor en Serpentines con Agitación.

Los investigadores J. Y. Oldshue y A. T. Gretton, determinaron el coeficiente de transmisión de calor "ho" por el lado externo del serpiente. La ecuación general que obtuvieron y que relaciona a "ho" con otras variables es la siguiente:

$$\frac{h_o d}{K} = 0.17 \left(\frac{ND^2 \rho}{\mu} \right)^{0.67} \left(\frac{C_p \mu}{K} \right)^{0.37} \left(\frac{D}{T} \right)^{0.1} \left(\frac{d}{T} \right)^{0.5}$$

Esta ecuación se obtuvo experimentalmente en las siguientes condiciones:

- a) Usando agitadores con impulsor tipo turbina plana, de: 305 mm (12"), 406 mm (16"), 508 mm (20"), 610 mm (24") y 711 mm (28"), de diámetro.

- b) Con fluidos cuyas viscosidades varían entre 0.4 y 400 centipoises.
- c) Con valores de Números de Reynolds entre 400 y 1,500,000.
- d) El recipiente usado fué de 1220 mm (48") de diámetro y 1220 mm (48") de parte recta.
- e) Los serpentines fueron arreglados para trabajar a régimen -- permanente y régimen no permanente.
- f) Los tubos utilizados para los serpentines fueron de 22 mm -- (7/8") de diámetro de cobre y 44.5 mm (1 3/4") de diámetro -- de acero inoxidable.
- g) Para medir la temperatura se instalaron termopares a ras con la pared de tubo.

En estas condiciones el margen de aplicación de esta ecuación es el siguiente:

- a) Cualquier dimensión de recipiente.
- b) Mamparas localizadas en la pared del recipiente o en el serpentín.
- c) Diámetro de tubos: $0.018 \leq \frac{d}{T} \leq 0.036$
- d) Viscosidad: hasta 400 centipoises.
- e) Espaciamiento de los tubos: 44.5 mm (1 3/4") entre centros -

para tubos de 19 mm (3/4") de diámetro y 89/178 mm (3 1/2" - 7") entre centros para tubos de 44.5 mm (1 3/4") de diámetro.

f) Impulsor para el agitador: tipo turbina.

La Fig. 3.9 representa una gráfica de la ecuación general en donde se está localizando en las abscisas al Número de Reynolds y en las ordenadas al resto de los términos. Con esta gráfica es posible obtener el valor correspondiente para los términos agrupados en las ordenadas y de este modo despejar "ho" para usarlo en el cálculo del coeficiente total de transmisión de calor "U".

Finalmente, debemos agregar que cuando una reacción es altamente exotérmica y rápida, normalmente se efectúa en un reactor intermitente con agitación en estas condiciones el enfriamiento se logra con el uso de la chaqueta y serpentines. En estos reactores se deberán considerar 3 volúmenes característicos:

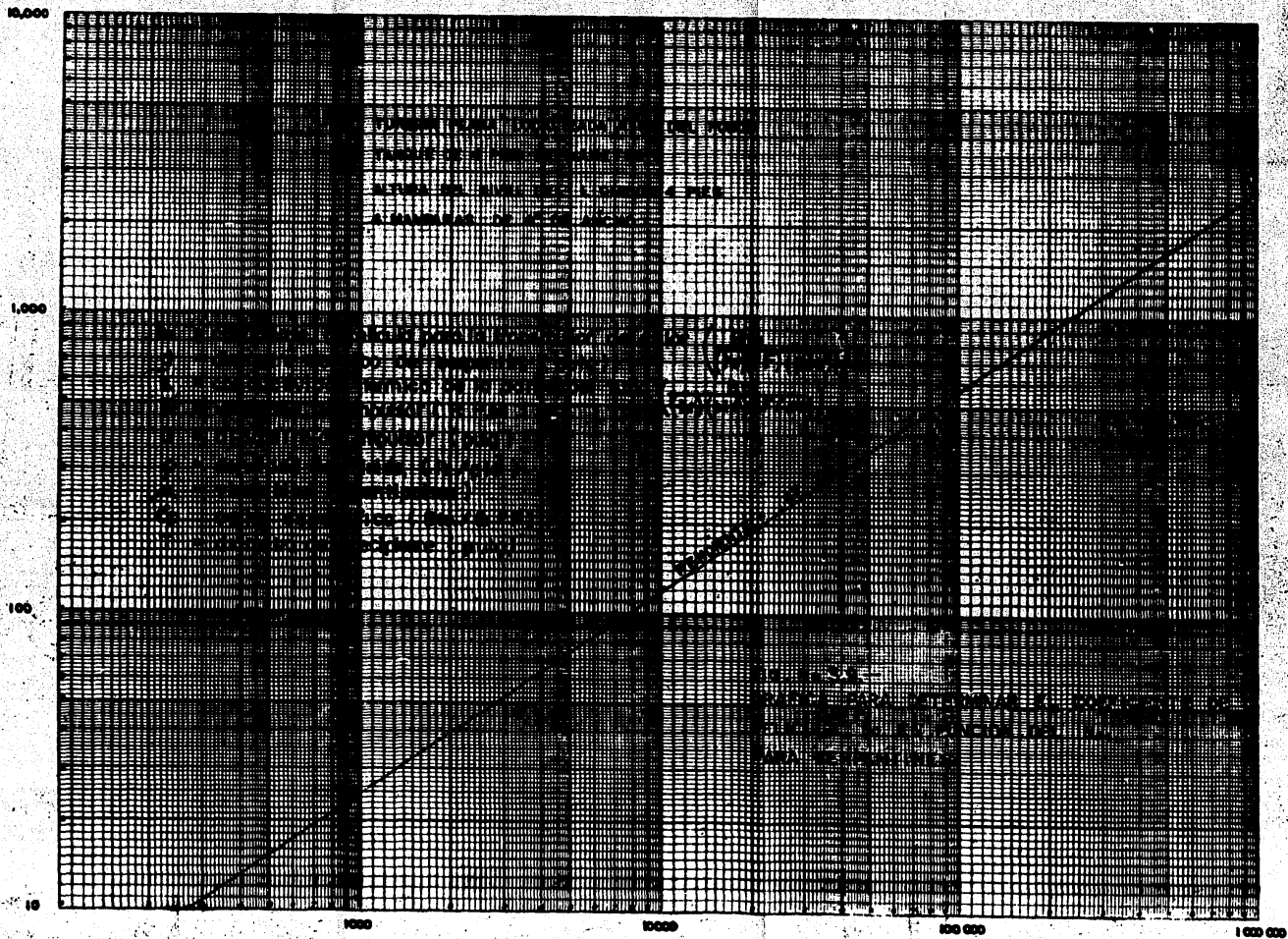
V_c El volumen necesarios para efectuar la reacción a la conversión deseada.

V_s El espacio ocupado por el o los serpentines.

V₁ El espacio para distribuir el o los serpentines.

Es muy importante considerar el espacio que ocupará el serpentín para considerarlo y diseñar correctamente el volumen total del reactor.

$$\frac{h_0 \rho / \mu}{(C_p \rho / \mu)^{1/4} (D_p / \mu)^{1/4} (g / \rho)^{1/4}}$$



$$N_{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu}$$

C A P I T U L O 4

MANEJO DE PRODUCTOS

C A P I T U L O 4

4. MANEJO DE PRODUCTOS.

Como manejo de productos, queremos dar a entender todos los cuidados y consideraciones que se deben tener al cargar el reactor con las materias primas, durante el desarrollo de la reacción y con los productos que se obtendrán al terminar dicha reacción.

Aunque cualquier reactor se deberá cuidar para evitar que sea dañado, son los reactores vidriados los que son más frágiles en cualquier circunstancia, por tanto, este capítulo estará orientado principalmente a este tipo de equipo, aunque los conceptos son de aplicación general.

4.1 PRECAUCIONES DURANTE LA CARGA DEL REACTOR.

4.1.1 Corrosión.

Un reactor vidriado tiene varias boquillas de diferentes diámetros y en diferentes posiciones (ver Figs. 4.1 y 4.2) lo cual permite agregar varios reactivos al mismo tiempo o uno después de otro, según las necesidades. A pesar de ello en muchas compañías existe la costumbre de cargar los productos químicos usando el registro de hombre, quizás porque aparentemente ofrece mayor facilidad. En estas condiciones, existe la posibilidad de que algo de los productos se derrame por fuera del reactor, acumulándose en las zonas localizadas, por ejemplo, en la unión de la chaqueta y el recipiente, sobre todo si la chaqueta tiene aislamiento o en-

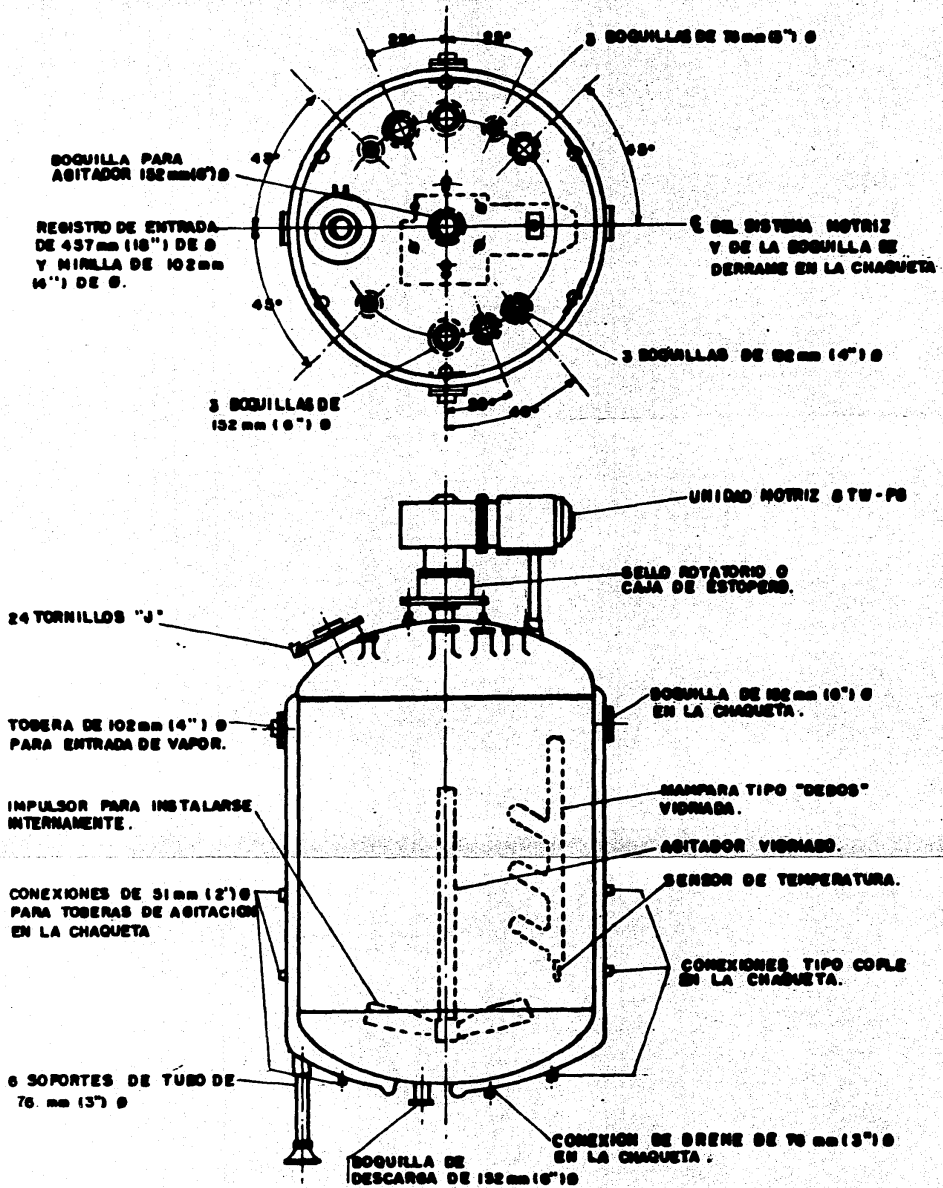


FIG. 4.1.- REACTOR POLIMERIZADOR.

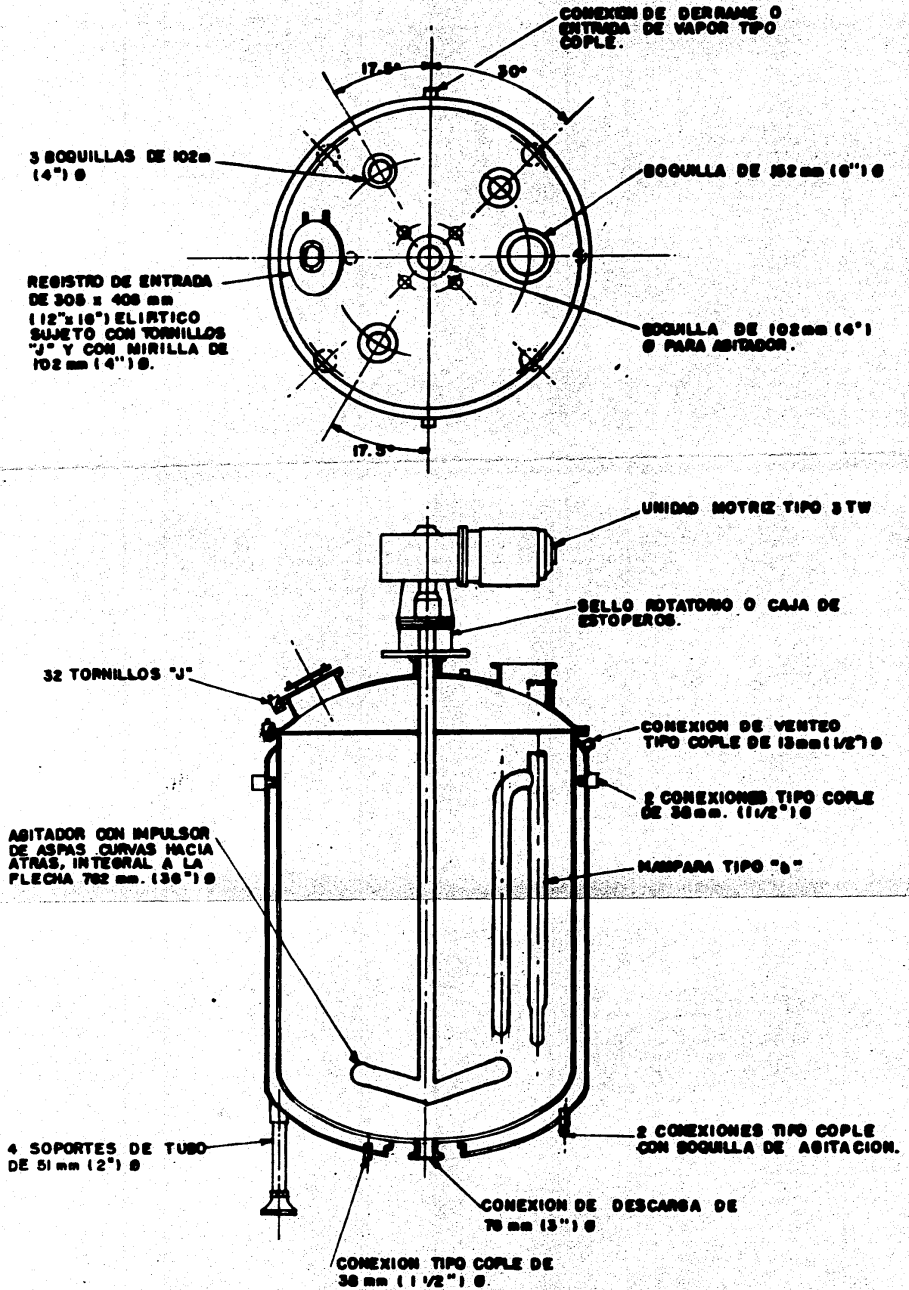


FIG. 4.2-REACTOR VIDRIADO TIPO "EL"

tre la tapa del reactor y la parte inferior del cuerpo. ver Fig.

4.3. Si los productos derramados son corrosivos, se iniciará la corrosión del metal de afuera hacia adentro, hasta alcanzar el re cubrimiento de vidrio el cual finalmente se desprenderá. Aún - - cuando se trate de un desprendimiento pequeño y tenga reparación, por lo pronto habrá necesidad de sacar al reactor fuera de servicio con lo cual se interrumpirá la producción.

Para evitar lo anterior lo mejor es no utilizar el registro de -- hombre para cargar los reactivos y si no hay otra alternativa, se deberá proteger la tapa superior del reactor, usando una cubierta metálica resistente a la corrosión, o una pintura epóxica tipo re cubrimiento, de tal modo que se evite el contacto directo del pro ducto con el material de la tapa. En una emergencia es posible - lavar el área con agua suficiente para diluir el reactivo, pero - si el reactor está aislado, se podrá dañar el aislamiento.

Será conveniente también revisar con cierta frecuencia, las uniones entre las tuberías que conducen los reactivos y las boquillas del reactor para asegurarse que no hay fugas que puedan escurrir y dañar el equipo.

4.1.2 Chóque Térmico.

Este fenómeno ocurre solamente en los reactores vidriados y con - el se encuentran ligadas las propiedades físicas de los materia- - les de que estan construidos, que son el acero al carbono y la ca

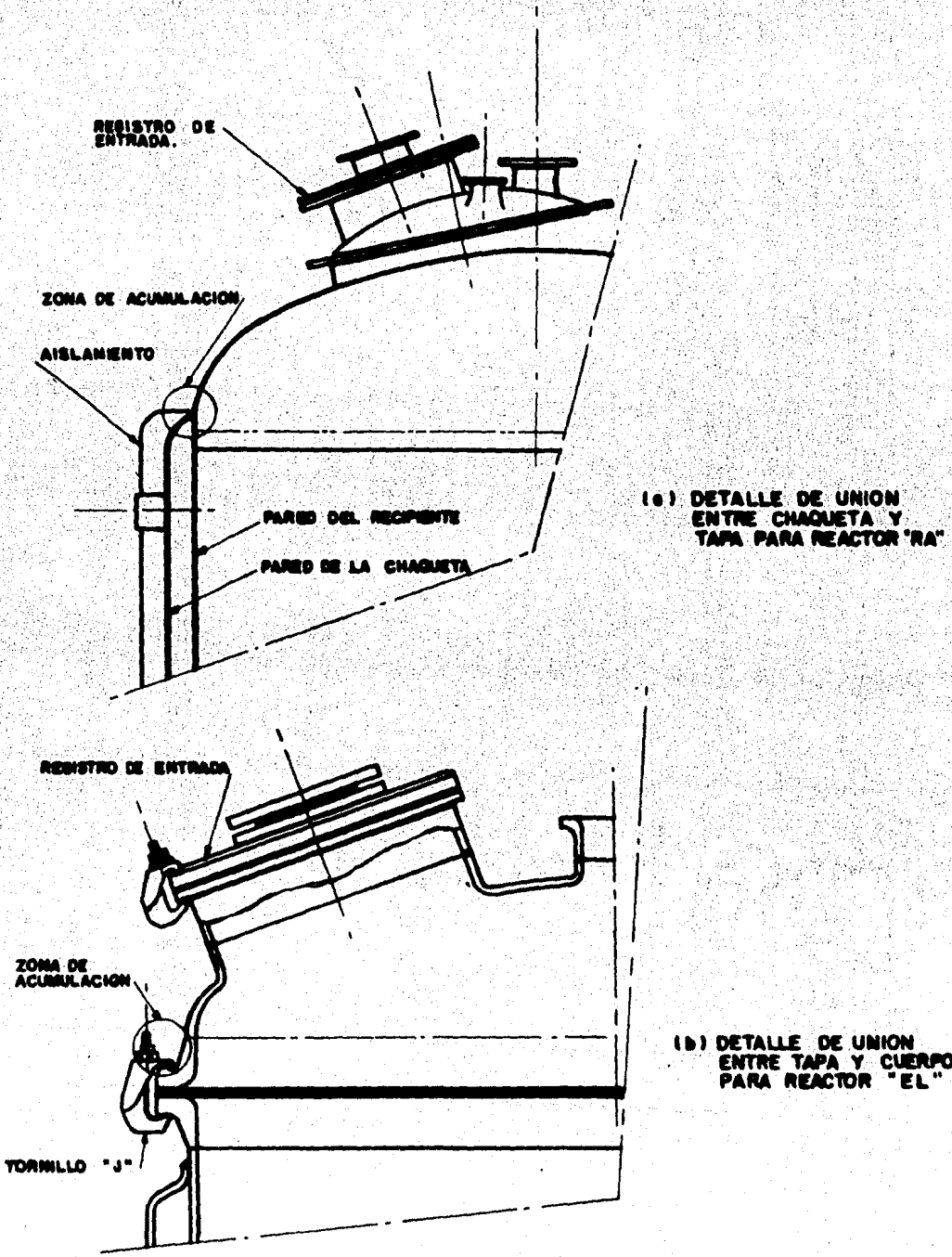


FIG.4.3 : ZONAS DE POSIBLE ACUMULACION DE DERRAME.

(LAS DESIGNACIONES "RA" Y "EL" SON PARA REACTORES DE PFAUDLER)

pa de vidrio. Las propiedades de los materiales que deben tomarse en cuenta en el análisis de este fenómeno son:

- a) La adhesión del vidrio a la pared del metal.
- b) La resistencia mecánica del vidrio.
- c) La elasticidad de ambos materiales.
- d) La conductividad térmica.

Durante el proceso de recubrimiento de un reactor con el vidrio, al enfriarse la pared del metal y la capa de vidrio a la temperatura ambiente después del horneado, la capa de vidrio queda sometida a un esfuerzo a compresión que es igual a : 13 kg/mm^2 . Si en la operación del reactor la temperatura de la pared del metal y la película de vidrio aumentan paulatinamente, el esfuerzo a compresión a que esta sometida la capa de vidrio disminuye, debido a la diferencia de dilataciones térmicas del vidrio y el acero, para una temperatura dada; ver Fig. 4.4. En estas condiciones la película de vidrio no se ve afectada y se puede deducir que la resistencia al choque térmico, disminuye con temperaturas más altas en la pared del metal.

Si la diferencia de temperaturas es excedida repentinamente, la capa de vidrio sometida a compresión inicialmente, podría cambiar instantáneamente y estaría sometida a tensión. Esto podría dar como resultado, un rompimiento del vidrio por choque térmico par-

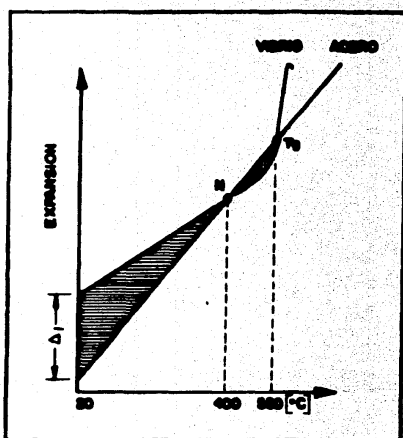


FIG. 4.4. — DESARROLLO DE ESFUERZOS CON EL AUMENTO DE TEMPERATURA

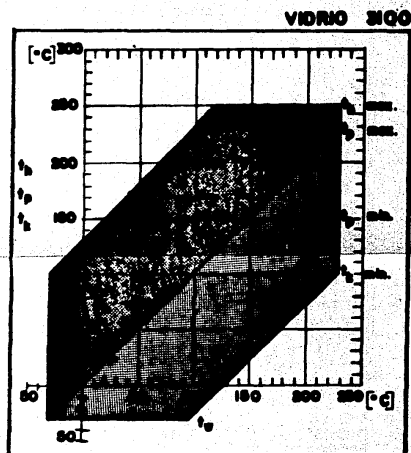


FIG. 4.5. — TEMPERATURAS ADMISIBLES

ticularmente en los siguientes casos:

- a) Cargando el reactor caliente con un producto frío.
- b) Inyectando un fluido caliente a la chaqueta de un reactor -- frío.

El daño también podría ocurrir si se llena un reactor que está a temperatura ambiente con un líquido caliente o cuando un reactor caliente se enfría repentinamente por el lado de la chaqueta. -- Sin embargo, en estas condiciones el riesgo es menor debido a que el esfuerzo a compresión aumenta.

Es conveniente que aún a diferencias de temperaturas constantes entre el interior y el exterior, no se excedan los límites indicados en la Fig. 4.4, durante la operación. (Esta figura es sólo aplicable a equipo de acero recubierto con vidrio, las partes de hierro fundido recubiertas con vidrio, tienen una resistencia menor al choque térmico).

En operación, se permiten temperaturas del medio de calentamiento más allá de 230 °C, sólo cuando la temperatura del producto no exceda la misma es decir 230 °C. Bajo ciertas circunstancias se puede exceder este límite y solo cuando el equipo está libre de reparaciones (sin tapones).

En lo concerniente a enfriamiento se presentan problemas similares. La temperatura límite inferior, depende del acero, no del

vidrio. De ahí que puede ser (-30 °C) y solamente si el recipiente es operado sin presión interna.

Por todo lo expuesto anteriormente, se comprenderá porque un reactor vidriado deberá ser cargado, operado y vaciado, de tal modo que no se le someta a cambios bruscos de temperatura.

Con las Figs. 4.5 y 4.6, y los ejemplos descritos a continuación, se pueden encontrar las temperaturas adecuadas a diferentes condiciones de operación, a que puede operarse un reactor sin peligro de dañarlo.

4.1.2.1 Calentamiento.

La temperatura más alta permitida para el fluido de calentamiento para un recipiente que está a 20 °C (temperatura ambiente) se obtiene así:

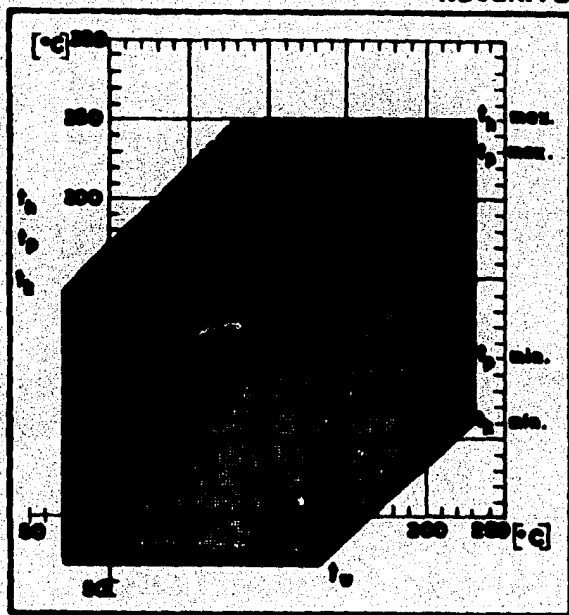
Localizar la temperatura de 20 °C, en la abcisa (t_w) y mover verticalmente ese punto hasta intersertar la línea de (t_h -- máx). Leer en la ordenada: 150 °C.

Si la temperatura del recipiente aumenta, la temperatura del medio de calentamiento se puede elevar también. Por ejemplo: con un valor de $t_w = 70$ °C, la temperatura del medio de calentamiento sería 200 °C.

4.1.2.2 Enfriamiento.

La temperatura más baja permitida para el fluido de enfriamiento,

NUCERITE



- t_h = TEMPERATURA DEL FLUIDO DE CALENTAMIENTO.
- t_p = TEMPERATURA DEL PRODUCTO.
- t_h = TEMPERATURA DEL FLUIDO DE ENFRIAMIENTO.
- t_w = TEMPERATURA DE LA PARED DEL RECIPIENTE.

 CALENTAMIENTO
 ENFRIAMIENTO

FIG.4.6 - TEMPERATURAS ADMISIBLES.

con una ($t_w = 160\text{ }^\circ\text{C}$) se obtiene así:

Localizar ($t_w = 160\text{ }^\circ\text{C}$), en la abcisa y mover este punto hacia arriba hasta interceptar la línea ($t_k \text{ mín}$). Leer en la ordenada: $30\text{ }^\circ\text{C}$.

4.1.2.3 Producto Caliente.

La máxima temperatura permitida para la carga de un producto a un recipiente cuya temperatura de pared es $40\text{ }^\circ\text{C}$, se obtiene así:

Localizar ($t_w = 40\text{ }^\circ\text{C}$) en la abcisa y mover este punto hasta interceptar la línea de ($t_p \text{ máx}$). Leer en la ordenada: $170\text{ }^\circ\text{C}$.

4.1.2.4 Producto Frío.

La temperatura mínima de un producto que puede vaciarse a un recipiente cuya pared está a $220\text{ }^\circ\text{C}$, se obtiene así:

Localizar ($t_w = 220\text{ }^\circ\text{C}$) en la abcisa y mover este punta hacia arriba hasta interceptar la línea ($t_p \text{ mín}$). Leer en la ordenada: $140\text{ }^\circ\text{C}$.

4.2 PRECAUCIONES DURANTE EL DESARROLLO DE LA REACCION.

Uno de los aspectos más importantes que mucha veces se tiene que cuidar en un reactor intermitente agitado, es la hermeticidad.

Se podrá observar fácilmente que el único punto por donde puede -

producirse una fuga de productos o una introducción de aire al reactor después de que a este ha sido cerrado, es la boquilla por donde penetra la flecha del sistema de agitación.

Lograr la hermeticidad es muy importante en procesos en donde uno de los componentes que tomará parte en la reacción está en fase gaseosa, o bien se producen durante la reacción gases que pueden ser corrosivos, venenosos o explosivos. Por otra parte, habrá necesidad de mantener hermético un reactor cuando la reacción se efectúa a una presión mayor o menor que la atmosférica, o alguno de los gases de la atmósfera contamine o afecte el proceso.

Los dispositivos usados para mantener la hermeticidad de los reactores, sellando la zona por donde penetra la flecha del agitador, son de dos tipos: estoperos y sellos mecánicos.

4.2.1 Estoperos.

Estos dispositivos, se usan en servicios para baja presión, baja temperatura y productos no corrosivos, o muy poco corrosivos. No son adecuados en sistemas en los cuales la contaminación por lubricantes puede dañar los productos. Las fugas a través de un estopero son aproximadamente 100 veces las de un sello mecánico, pero a pesar de ser menos eficientes que los sellos mecánicos, tienen la ventaja de ser cambiables fácilmente.

En la Fig. 4.7, se muestra el corte del estopero usado por la compañía Pfaudler en sus reactores vidriados. Está formado básica-

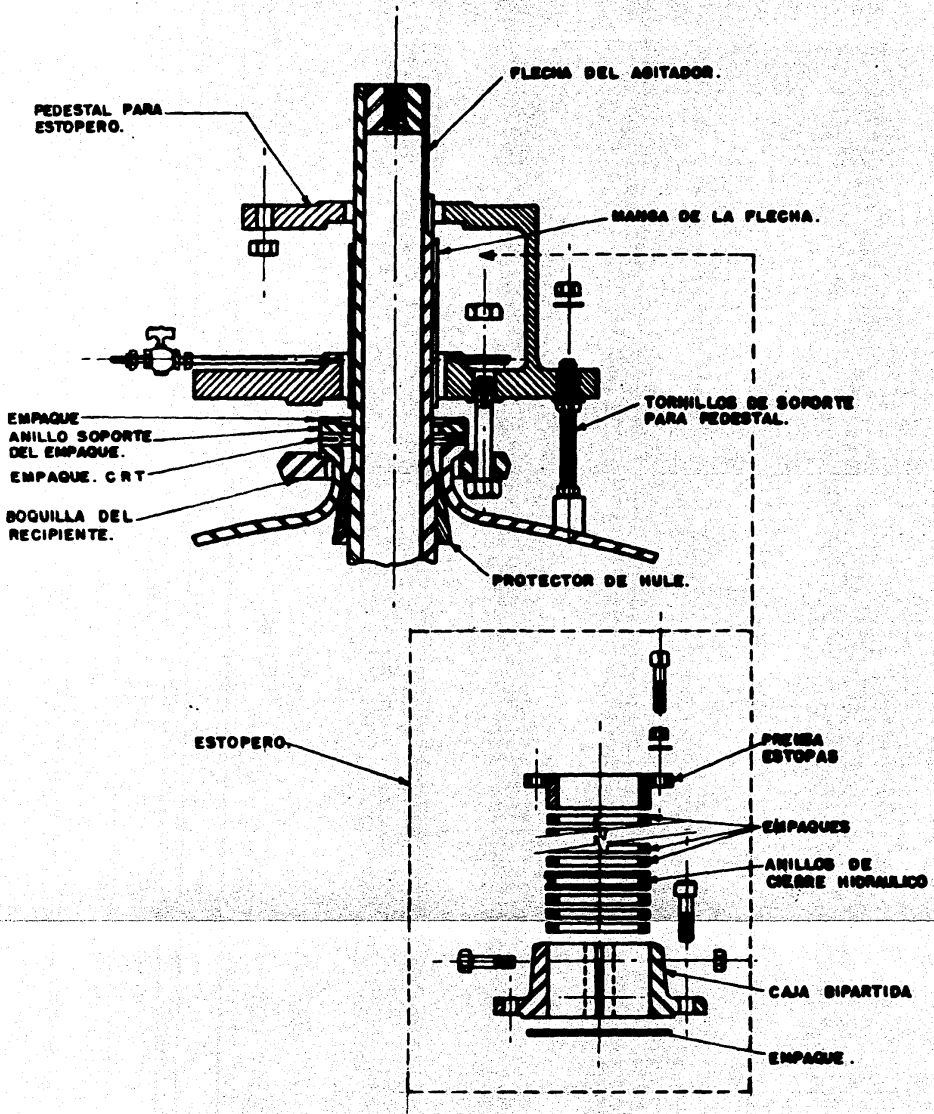


FIG.4.7:- PARTES DE UNA CAJA DE ESTOPEROS.

mente por la caja de estoperos, un retén bipartido, los empaques, un anillo de cierre hidráulico y el prensa estopas.

Los empaques usados en este tipo de estoperos, son de asbesto - - trenzado impregnado con teflón (PTFE) y son aplicables a temperaturas altas o bajas. El anillo que soporta los empaques, protege la sección inferior del estopero. El lubricante de los empaques se suministra a la flecha, por medio del anillo de cierre hidráulico, el que al mismo tiempo sirve para transmitir el calor de la flecha hacia el exterior. El diámetro exterior del anillo de cierre hidráulico, está ranurado, de tal modo que se puede limpiar - el lubricante, sin forzarlo hacia el interior del reactor. El -- prensa estopas, es usado para mantener los empaques en su lugar y para comprimirlos con el fin de lograr un mejor sello.

La lubricación continua de un estopero, es absolutamente necesaria para asegurar una buena operación de este. Cuando no se lubrica, los vapores del proceso tienden a escaparse, eliminando contaminando o congelando el lubricante, endureciendo el empaque y finalmente corroyendo la caja del estopero. Casi cualquier líquido puede usarse como lubricante, antes será necesario asegurarse de que la pequeña cantidad del líquido usado como lubricante que se está pasando al interior del reactor, no afecta el proceso.

4.2.2 Sellos Mecánicos.

Pueden ser simples o dobles. los simples se recomiendan para tra

bajar a vacío o a presión atmosférica. Los dobles, son para trabajar a presiones y temperaturas elevadas, y además condiciones corrosivas severas. Los sellos mecánicos dobles, son la mejor selección para aplicaciones en las que la contaminación del producto, con el lubricante del sello debe ser mínimo. La fuga de lubricante que tiene un sello trabajando en condiciones normales, es aproximadamente lcc/hr/cara, variando esta fuga en función de las dimensiones del sello.

Los límites de presión de trabajo de los sellos mecánicos no balanceados son los siguientes:

Diámetro del sello	Presión máxima de trabajo
38 a 125 mm (1.5 a 5 pulg)	21.13 Kg/cm ² (300 psig)
140 mm (5.5 pulg)	17.61 Kg/cm ² (250 psig)
152 a 210 mm (6 a 8.25 pulg)	14.08 Kg/cm ² (200 psig)

Durante la operación, la presión del lubricante en la caja de sellos, cuando se usan sellos dobles, deberá mantenerse a 1.76 - - kg/cm² (25 psig) arriba de la presión del interior del recipiente, para evitar que la presión en el recipiente venza el sello y dañe el asiento inferior.

En el interior de la caja de sellos, ver Fig. 4.8 cada sello queda sujeto firmemente a la flecha del agitador por medio de dos o más tornillos. De este modo, el movimiento rotatorio del agitador, es transmitido por la carcasa del sello al anillo de carbón.

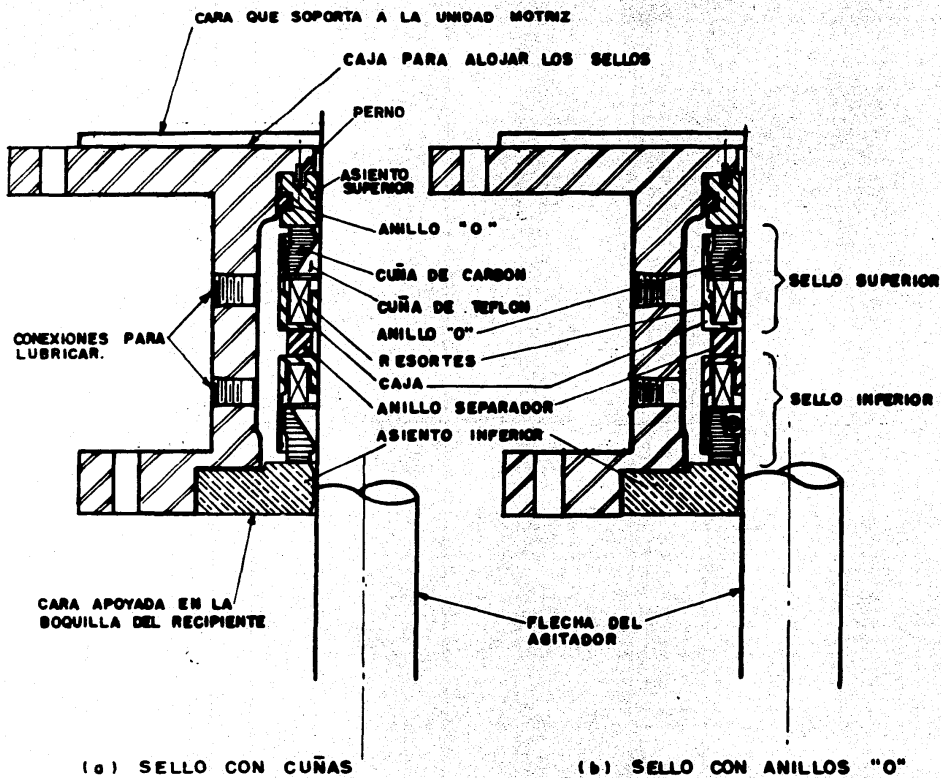


FIG.4.8. PARTES DE UN SELLO MECANICO DOBLE

La cara lisa del anillo de carbón girando sobre un asiento fijo de cerámica, sella las dos superficies y evita la posibilidad de fuga de lubricante. El sello sobre la flecha, se logra por medio de una cuña de teflón presionada por medio de varios resortes apoyados en la carcasa del sello, o por un anillo "o" fabricado de algún elastomero (buna, vitón, etc.). La selección entre una cuña o un anillo, depende de la corrosividad de los productos químicos del reactor.

La función más importante de un sello de este tipo, es mantener lubricadas las caras del anillo de carbón y el asiento de cerámica con una película de lubricante. Para que esto sea efectivo no debe permitirse que la temperatura de operación del lubricante exceda el valor correspondiente a su punto de ebullición multiplicado por 0.8, de otro modo podría haber vaporización del lubricante de las caras del sello con lo cual trabajarían en seco y se dañarían.

Como lubricantes, se pueden usar la mayor parte de líquidos siempre y cuando no sean corrosivos para el hierro, el buna "N", aleaciones de níquel, vidrio pyrex, aluminio y acero.

Se sugiere usar los siguientes lubricantes (de preferencia en el orden descritos).

- a) Aceites SAE Nos. 10, 20 & 30.
- b) Aceite hidráulico.
- c) Aceite mineral.

- d) Glicol (Etileno)
- e) Solución de glicerina (80% glicerina, 20% agua).

El lubricante deberá cambiarse, cada vez que se cambien los sellos o cuando se observe que está sucio.

Para mantener la lubricación de los sellos Pfaudler usa su lubricador el cual es una cámara en donde se almacena el lubricante a presión, conectada a la caja de sellos, efectuándose la circulación del lubricante por convección. El lubricante calentado por la fricción de los sellos, sale por la conexión superior, descarga por el tubo central del lubricador a la cámara de almacenamiento, en donde se enfría, ya que esta caja es aletada para transmitir el calor al medio ambiente, continua desplazándose hacia abajo y penetra a menor temperatura por la conexión inferior del sello. Normalmente la presión en la cámara del lubricador, se mantiene por medio de una botella de aire o nitrógeno a presión. -- Ver diagrama de flujo en la Fig. 4.9.

4.3 CONSIDERACIONES QUE SE DEBEN TENER CON LOS PRODUCTOS.

Una vez que la reacción ha terminado, el siguiente paso será vaciar el reactor con la mayor rapidez. La posibilidad de lograr un tiempo mínimo en la fabricación de un lote de producto, establecerá la efectividad de operación del reactor. Ya que el tiempo en que se efectúa la reacción, está determinado, así como el tiempo que el producto permanecerá en el reactor, hasta lograr --

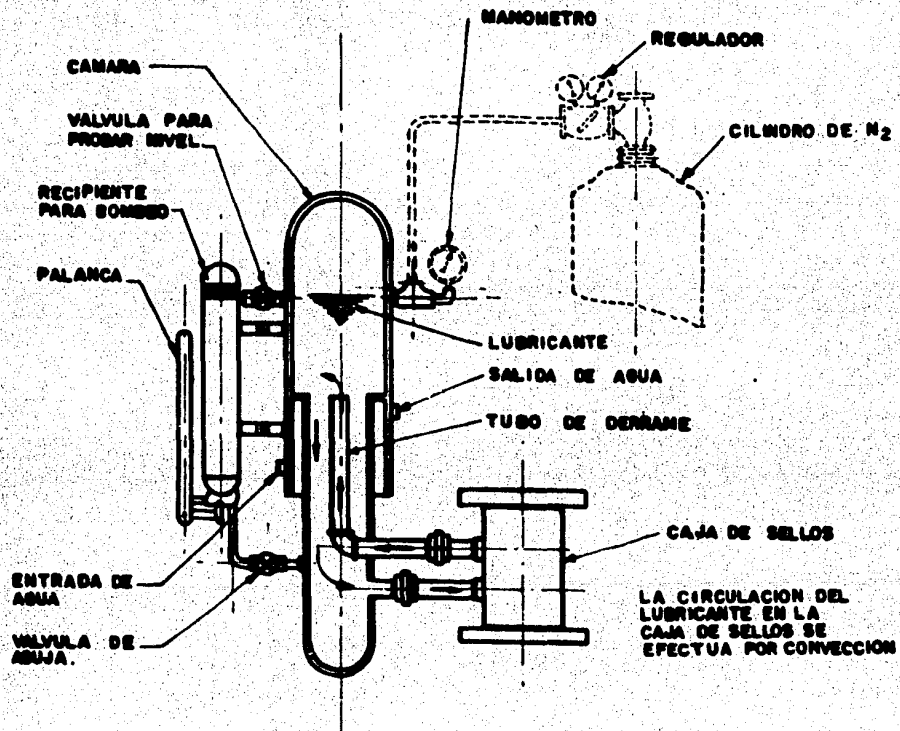
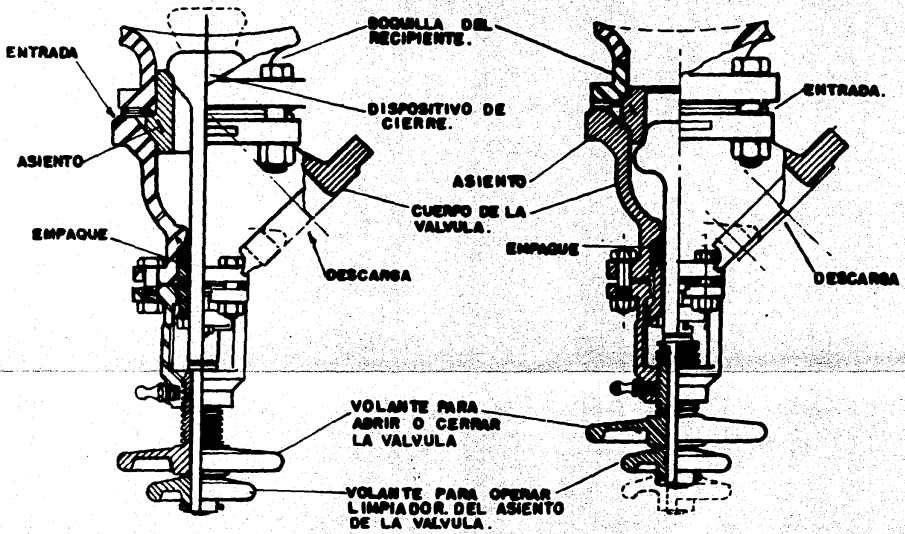


FIG.4.9.- DIAGRAMA DE FLUJO DE UN LUBRICADOR A PRESION.

una temperatura conveniente para sacarlo, quiere decir que la disminución del tiempo de fabricación de un lote de producto se puede lograr acortando el tiempo de vaciado del reactor. Esto depende del estado final del producto, es decir, si es líquido, si es un sólido en polvo, si es un granulado, etc., y la temperatura de este producto.

Considerando lo anterior la descarga del reactor se puede apresurar de varias maneras:

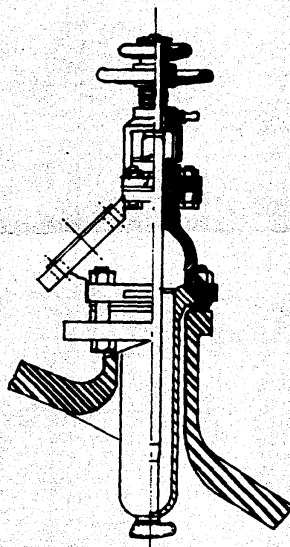
- a) Usando una boquilla con un diámetro grande y una válvula o dispositivo de apertura rápida. En la figura 4.10 se muestran tres tipos de válvulas la (a), es conveniente usarla para productos líquidos; el dispositivo que cierra la válvula penetra en el interior de la boquilla de tal modo que evita zonas de estancamiento. Al abrir la válvula, este dispositivo se desplaza hacia el interior del recipiente, a este tipo de válvula se le denomina "Flush" (a ras con el interior del recipiente). No es conveniente usarla con productos granulados, podría haber la posibilidad de obstruir la válvula. La válvula mostrada en (b), se le denomina válvula de globo, el dispositivo de cierre se mueve como en una válvula normal, este tipo de válvula, también es conveniente usarla sólo para productos líquidos. La válvula mostrada en (c), es usada en una de las boquillas localizada en la parte superior del tanque para lavar el recipiente, de ser necesario, en la fa-



(a) VALVULA TIPO "FLUSH"

(b) VALVULA DE GLOBO

FIG.4.10.-DIFERENTES TIPOS DE VALVULAS USADAS EN REACTORES VIDRIADOS.



(c) VALVULA ROTADORA PARA LAVADO.

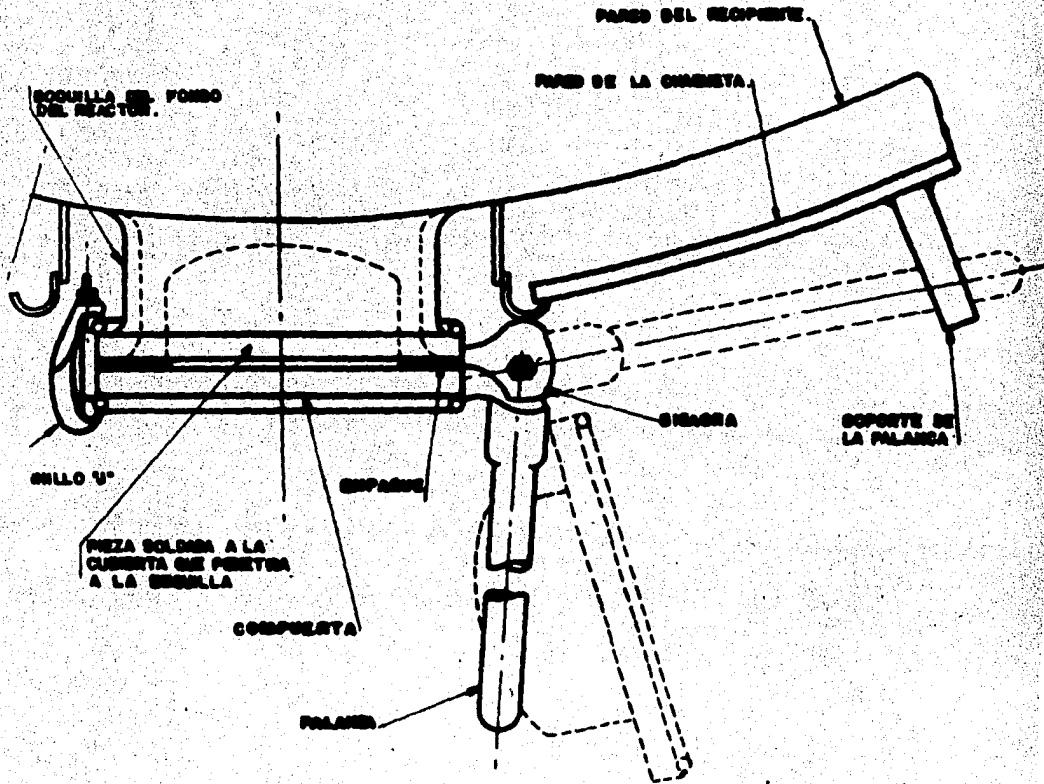
bricación del siguiente lote de producto. Finalmente el dispositivo mostrado en la Fig. 4.11, es una compuerta que deja el área de paso de la boquilla completamente libre, lo cual permite manejar sólidos granulados o en polvo.

- b) Si el proceso lo permite, usar aire para presionar el reactor. De este modo, la presión ayudará a sacar más rápido el producto, que si se vaciara por gravedad.
- c) Para no esperar hasta que el producto se enfríe a un valor de temperatura determinado, vaciar dicho producto a otro recipiente y hacer o terminar el enfriamiento en este recipiente.

4.4 APLICACION DEL REACTOR PARA FABRICAR VARIOS PRODUCTOS.

Un mismo reactor, puede ser utilizado para fabricar varios productos o diferentes tamaños de lotes de productos. Para tal fin, se deberán tomar las previsiones necesarias desde el inicio del diseño, de tal modo que se considere:

- a) El volumen de lote mayor de los productos a fabricar.
- b) Las boquillas necesarias para la carga y descarga de productos.
- c) El tipo de chaqueta y si se distribuirá por zonas.
- d) El sensor de temperatura para el producto que alcanzará la temperatura más alta en la reacción.
- e) El sistema de agitación para el lote mayor del producto y la



NOTA: LAS LINEAS PUNTEADAS INDICAN LA POSICION DE LA COMPUERTA CUANDO SE ESTA VACIANDO EL REACTOR.

FIG.4.II.- DISPOSITIVO TIPO COMPUERTA USADO COMO VALVULA.

reacción con las condiciones más críticas.

- f) Los dispositivos y accesorios como serpentines, namparas, -- también para el lote de producto mayor.
- g) Un sistema de lavado para hacer la limpieza del reactor lo -- más rápido posible.

C A P I T U L O 5

CASOS ESPECIALES

C A P I T U L O 5

5. CASOS ESPECIALES.

A este Capítulo se le ha denominado "Casos Especiales", porque en el se tratarán, en primer lugar uno de los aspectos que no es común para todos los reactores:

La textura o acabado de la superficie interna de los recipientes y los métodos para lograrla.

en segundo lugar , se bosquejará a grandes rasgos:

Una comparación entre reactores de la misma capacidad, para el mismo proceso, fabricados de diferentes materiales.

5.1 TEXTURA DE LA SUPERFICIE INTERNA DE LOS REACTORES.

Una de las características muy importante que se debe considerar en un reactor fabricado de alguna aleación (A.I. 304, A.I. 316, - A.I. 316L, etc.), es el pulido o acabado interior. Para la mayor parte de los procesos la calidad de la superficie de los materiales al salir de la fundición es suficiente, pero para algunos procesos particulares es necesario que la superficie sea de una calidad especial o tenga un acabado especial. Se sabe que en el proceso de fabricación de alimentos, se habla de un "acabado sanitario", el cual consiste en pulir hasta cierto grado todas las superficies que estarán en contacto con el proceso, de tal modo que se evite que en las pequeñas cavidades de una lámina normal, es -

decir sin pulir, se acumulen residuos de producto, los cuales podrían servir de alimento a las bacterias, cuyos desechos finalmente dañarían la calidad del producto que se está obteniendo. También se sabe que es necesario pulir la superficie interna de un reactor para evitar la adherencia de productos plásticos, como podría ocurrir en una polimerización.

Aunque a simple vista una lámina normal parece lisa, al observarla con un microscopio es posible notar las irregularidades tan profundas y variadas que se presentan, casi como si se tratara de una superficie con montañas, valles y cráteres.

5.1.1 Medición de la Textura de las Superficies.

Entre los métodos utilizados para medir las irregularidades de las superficies podemos mencionar los siguientes:

5.1.1.1 Medidor Mecánico de Perfiles ("Profilometer").

Es un aparato que se podría decir que trabaja de una manera similar a un "Tocadiscos", se pasa una ahuja muy aguda sobre la superficie de metal, la cual detecta todos los valles, crestas e irregularidades y los transmite por medio de un sistema electrónico-mecánico a una gráfica, en donde se registran todas estas irregularidades en una escala mayor y de este modo se puede apreciar el perfil de la superficie por donde pasó la ahuja. Por su puesto la limitante de este método queda determinada por los procesos de fabricación de la ahuja.

5.1.1.2 Patrones de Comparación.

En este método se usa una serie de placas con diferentes grados de pulido para cada una de las cuales corresponde un número. Rallando las dos superficies, la que se está comparando y la superficie patrón, con la uña o con una moneda y comparando las sensaciones al tacto o el sonido producido, se puede determinar el grado del pulido del material que se está probando.

La unidad de medición para la textura de una superficie en el Sistema Inglés, es la millonésima de una pulgada y se le denomina -- "micropulgada", y es igual a 0.000001 pulg, (0.000025 mm). Las texturas de las superficies normalmente se encuentran comprendidas entre 0.000004 pulg a 0.002 pulg, (0.000102 mm a 0.0508 mm).

5.1.2 Métodos para Pulir Superficies Metálicas.

Para lograr la textura deseada en una superficie podemos mencionar los siguientes métodos;

5.1.2.1 Pulidos por Medios Mecánicos.

5.1.2.2 Pulido con Soluciones Electrolíticas.

5.1.2.1 Pulido Mecánico.

Usando una gran variedad de polvos abrasivos, fibras y lubricantes, se logra dar a una superficie metálica diferentes grados de textura.

Generalmente el acabado o pulido final, dependerá de estado inicial de la superficie, por lo cual se deberá seleccionar el material con mejor textura al iniciar la operación, para poder lograr sin mucha dificultad la textura final.

En el pulido mecánico, se utilizan herramientas con discos giratorios de madera, plástico o metal, cubiertos de tela de lana, fibra de lana, piel, etc., cuya superficie tiene adheridos polvos abrasivos tales como el corindón, corindón y óxido de hierro, aluminio, etc., usando además en algunos casos algún lubricante. Un pulido más fino se logra usando los mismos discos cubiertos de tela o manta sin abrasivo, el cual se aplica intermitentemente por separado en forma de pasta. En este caso los abrasivos más comúnmente usados son: la sílice, el óxido férrico, el corindón, la piedra poma, el óxido de calcio, etc. El acabado final de la superficie en este caso, depende de la finura de grano del abrasivo y del vehículo usado.

Normalmente una operación de pulido se inicia con una limpieza perfecta, por medio de desengrase y lavado. A continuación se eliminan de la superficie todos los defectos visibles, principalmente en las regiones soldadas, lo cual se hace con esmeriles que pueden ser de baquelita. Posteriormente se trabaja con los abrasivos mencionados, usando en cada operación subsecuente el más fino de ellos y con discos de materiales cada vez más suaves, realizando cada etapa de operación de pulido en dirección perpendicu

lar a la dirección usada en la etapa anterior. El brillo final se dará con discos de fieltro, lana o algodón y el uso de pastas especiales como las mencionadas anteriormente. Estas últimas operaciones se efectúan a velocidades de giro hasta de 50 a 60 m/s.

Para toda la operación y sobre todo, para el acabado final de los aceros inoxidables, se aconseja emplear materiales especiales en todas las operaciones, con el fin de evitar la contaminación de las superficies con restos de hierro. Los restos de productos ferrosos, pueden aparecer con el tiempo en forma de manchas sobre la superficie del acero inoxidable.

Con el fin de dar una idea de los diferentes grados de pulido posibles, a continuación se da una serie de texturas producidas por diferentes herramientas:

Tipo de Herramienta	Textura Producida (micropulgadas)
a) Corte con soplete, cincel, segueta y cisalla	500 a 2000
b) Esmerilado manual	250 a 2000
c) Esmeriladores de disco, lima, barronado, taladro, torno y rolado	63 a 500
d) Rimado	32 a 125
e) Esmerilado superficial	16 a 125
f) Desbastadora y fresadora	16 a 63
g) Esmeriladora de banda	8 a 63

h) Bruñidora y rectificadora	4	a	32
i) Pulidora	4	a	16
j) Super pulido	4	a	2

5.1.2.1.1 Texturas para lámina de acero inoxidable.

La industria del acero inoxidable, usa un sistema estándar de numeración para texturas o acabados, que pueden obtenerse en el mercado. Estos estándares van conforme a la ASM y la ASTM (ASTM A-480) y son los siguientes:

- a) Acabado No. 1. Muy áspera (rolada en caliente, recocida y decapada). Esta superficie es la más rugosa de los acabados estándar y es muy variable aún en la producción dentro de una misma fundición.
- b) Acabado No. 2D. Aspera, (rolada en frío). Se produce al darle un rolado en frío al material, antes de recocido final y decapado. Este acabado es mucho mejor que el No. 1 y además el material tiene una mayor ductibilidad, con lo cual es más fácil trabajarla, sobre todo en operaciones en donde es necesario rolar.
- c) Acabado No. 2B. Brillante (rolado en frío). Se produce por un rolado leve final, posterior al recocido y decapado. Tiene una superficie más brillante y más lisa que el acabado 2D, esto lo hace un mejor material para iniciar una operación de

pulido. Ya que este material es un poco más templado, que el 2D sus características para troquelado, no son muy buenas.

- d) Acabado Brillante Recocido. Este es un acabado brillante, muy reflejante, obtenido por un rolado en frío, el cual se logra mantener al efectuar el recocido en un horno con atmósfera controlada.
- e) Acabado No. 3. Pulido intermedio. Este es una superficie semiterminada, que conviene usar cuando se necesita una superficie para iniciar un acabado mejor, después de haber fabricado el equipo.
- f) Acabado No. 4. Pulido para usos generales. Se logra cuando se esmerila y pule un lado o ambos lados de una lámina con alguno de los acabados anteriormente mencionados. Para esto se usan abrasivos subsecuentemente más finos para cada operación. Las imperfecciones de la superficie deben eliminarse antes de iniciar el pulido. El grado comercial se logra usando abrasivos con una granulometría de 120 a 150 mallas y un lubricante.
- g) Acabado No. 6. Satín opaco, mate liso. Este es usado principalmente cuando se desea una superficie opaca más que una superficie lisa. Se obtiene puliendo el acabado No. 4, con un cepillo de fibra "Tampico" y un abrasivo. Se le puede llamar también "Acabado Tampico". Tiene una reflectividad

más baja que la del acabado No. 4.

- h) Acabado No. 7. Brillante. Este tiene un alto grado de reflectividad. Se produce con un pulido final con abrasivos más finos que los usados para el pulido No. 4.
- i) Acabado No. 8. Acabado espejo. Este es el acabado más reflectivo que se produce. Se obtiene puliendo con abrasivos muy finos y con el uso de discos de tela o piel.

El acabado No. 8, es usado normalmente para placas de prensas, espejos pequeños y reflectores.

5.1.2.2 Pulido Electrolítico.

El pulido electrolítico, consiste en la disolución anódica de protuberancias o áreas salientes de la superficie metálica de un material, obteniéndose con este método, un "aplanamiento" de las irregularidades y asperesas y por tanto una superficie pulida. El descubrimiento de este proceso tuvo como base el tratamiento anódico del acero en soluciones concentradas de ácido fosfórico y su aplicación se ha extendido a todos los metales de uso industrial, empleando para tal efecto una gran variedad de soluciones electrolíticas. Con el uso adecuado de estas soluciones durante el proceso electrolítico, la rugocidad de las superficies de las placas de acero, que generalmente es muy baja, se puede reducir aún más, por ejemplo, una superficie que ha sido pulida mecánicamente hasta alcanzar un asperesa de 4 micropulgadas, se puede reducir hasta 0.3 micropulgadas mediante el pulido electrolítico.

En el caso de acero cromo-níquel, tipo 18-8, el grado de pulido - que se obtiene por medios electrolíticos es igual o mejor al que se obtiene por medios mecánicos.

Entre los electrolitos más usuales en este proceso, están los ácidos concentrados aunque también se usan los alcalis diluidos y ácidos diluidos en combinación con un líquido orgánico soluble (ácido glicólico, glicerina, anilina y otros). La composición de la solución, la temperatura y particularmente la densidad de corriente, deben ser estrictamente controladas para evitar que la superficie sea carcomida en lugar de ser pulida.

5.1.2.2.1 Teoría del pulido electrolítico.

El análisis de la relación, densidad de corriente a potencial del ánodo para metales en soluciones electrolíticas, demuestra que a valores bajos de esta relación, la densidad de corriente se eleva rápidamente con el potencial y alcanza un nivel ("horizontal"), constante de densidad de corriente que se puede conservar, aún aumentando el potencial del ánodo dentro de un cierto límite. Finalmente al alcanzar valores más elevados en los potenciales estacionarios, hay un reinicio rápido en la elevación de la densidad de corriente. El examen de muestras de metales, tratados en las tres regiones, determinan que el carcomido ocurre o se produce -- con corrientes bajas; que el pulido ocurre en la zona media o de "nivel horizontal" y que en las áreas con densidad de corriente alta, se produce oxígeno. Se han planteado varias teorías para -

explicar como se produce el pulido o el carcomido durante el proceso electrolítico. Está demostrado que en las zonas de corriente constante, la superficie del ánodo se cubre con una película viscosa de cierto espesor relativamente constante y que la velocidad de reacción es controlada por la difusión de especies iónicas o moleculares a través de esta película. Ya que en las protuberancias o picos la capa es más delgada y la densidad de corriente más alta que en los valles, la disolución ocurrirá preferentemente en dichos picos, alisando o puliendo de este modo la superficie. Las sustancias que controlan la difusión a través de la superficie de la capa, pueden ser moléculas tales como el agua o aniones que se combinan con los iones del metal disuelto para formar iones complejos. A estas sustancias se les puede denominar "receptores". Los estudios teóricos han conducido a la obtención de fórmulas para un proceso electrolítico ideal, el cual es caracterizado por un perfil plano ("horizontal"), de la curva densidad de corriente-potencial, correspondiente a la difusión máxima de un "receptor" para iones metálicos hacia el ánodo. La hipótesis del "receptor", establece que a valores bajos de densidad de corriente la velocidad de aparición de receptores puede balancear la velocidad de su combinación con iones metálicos y concordantemente, la velocidad de disolución del metal, dependerá de las energías potenciales en las diferentes caras de los cristales, dando así lugar a la diferencia de ataque entre el pulido y el carcomido. Conforme se alcanza la región horizontal de la curva corriente-potencial, la concentración de los receptores se vuelve -

cero. Bajo este gradiente de concentración elevado, los receptores son suministrados, únicamente por difusión y al llegar a la superficie del metal, quitan los átomos en el punto de contacto. El pulido en estas circunstancias, es el resultado del hecho de que la capa de difusión tiene un ingrediente de concentración creciente, mayor en las áreas convexas que en las áreas cóncavas de la superficie, lográndose de este modo la disolución natural de las protuberancias.

Como podría esperarse, durante el proceso electrolítico se puede originar la formación de películas de óxido, generalmente estas películas son transparentes y no afectan la apariencia de las superficies pulidas.

Existen un gran número de soluciones usadas en el proceso del pulido electrolítico para diferentes metales. En la tabla No. 5.1, se mencionan algunas de ellas, y las condiciones de operación.

Es conveniente que la densidad de corriente siempre sobrepase un valor límite, por debajo del cual el pulido sería defectuoso a causa de un efecto de ataque electrolítico. En cambio, por encima de este valor límite, la operación es más rápida y el pulido más perfecto.

El pulido electrolítico, presenta la ventaja de dar superficies con un poder de reflexión mayor con un tono más claro y libres de los residuos que normalmente deja un pulido mecánico, la pérdida

TABLA No. 5.1

SOLUCIONES EMPLEADAS EN PULIDO ELECTROLITICO

METAL	SOLUCION	DENSIDAD DE CORRIENTE	TEMP.	TIEMPO
Hierro	700 ml de anhídri do acético. 200 ml de ácido - crómico.	200 amp/dm ² (1850 amp/pie ²)	20 °C (68 °F)	15 seg
Aluminio	1000 ml de ácido fosfórico a 70%. 200-500 ml de gli col.	15 amp/dm ² (140 amp/pie ²)	95 °C (203 °F)	4 min
Cobre y Latón	Cianuro de cobre: 31 g/l. Cianuro de zinc: 47 g/l. Cianuro de pota-- sio: 126 g/l.	2-8 amp/dm ² (18-74 amp/pie ²)	25-30 °C (77-86 °F)	20 seg
Plata	Plata (metálica): 32.8 g/l. Cianuro de pota-- sio: 19.5 g/l. Carbonato de pota sio: 41.5 g/l.	1-2.8 amp/dm ² (10-26 amp/pie ²)	ambiente	20 seg
Zinc	160 g de óxido -- crómico. 100 cc de agua. (sumergir la pie- za antes del tra- tamiento anódico, en solución de -- cromato de pota-- sio al 10% duran- te un minuto y en ácido clorhídrico durante unos se-- gundos).	120-230 amp/dm ² (1100-2100 - -- amp/pie ²)	18-30 °C (64-86 °F)	60-90 seg
Molibdeno Tungsteno Tantalio Niobio	Acido sulfúrico a 5%. Acido fluorhídri- co al 1.25% en al cohol metílico.	440-540 amp/dm ²	ambiente	6-20 seg

de metal por adelgazamiento, es menor que la originada de un pulido mecánico y por otra parte el pulido electrolítico revela los defectos de soldaduras, facilitando un mejor control de la calidad. En cambio, presenta también una serie de desventajas: la superficie inicial debe ser muy lisa, no es posible eliminar los defectos de inclusiones o rayaduras, los objetos que han experimentado una gran deformación durante su fabricación, dan superficies defectuosas y los cordones de soldadura que se puede lograr que desaparezcan, con el pulido mecánico, se revelan claramente en el proceso electrolítico. Finalmente es conveniente indicar que con este procedimiento no es posible conseguir un pulido especular.

En la aplicación práctica del proceso de electropulido, los cátodos son generalmente de cobre o plomo, su forma debe ser exactamente igual al contorno de las piezas que se van a pulir, de manera que se tenga una distribución uniforme de corriente. La distancia entre ánodo y cátodo debe ser unos centímetros.

5.2 COMPARACION DE REACTORES DE LA MISMA CAPACIDAD, CONSTRUIDOS DE DIFERENTES MATERIALES PARA UN MISMO PROCESO.

Con el fin de englobar varios de los aspectos tratados a lo largo de este trabajo, a continuación se presenta una comparación entre reactores en los que se efectuará el mismo proceso pero que están contruidos de diferentes materiales. Esta comparación se hace entre los siguientes equipos:

- a) Reactor fabricado de acero al carbono, recubierto de vidrio,

con chaqueta convencional.

- b) Reactor fabricado de acero al carbono, con chapa de acero -- inoxidable, ("clad"), pulido electrolíticamente en el interior.
- c) Reactor fabricado de acero inoxidable sólido, pulido electrolíticamente en el interior.

Las necesidades de enfriamiento en una reacción para producir PVC, son muy grandes por lo cual, este tipo de reacciones son efectuadas más fácilmente en reactores de acero inoxidable con pulido -- electrolítico, que en reactores de acero vidriado debido a la mejor transmisión de calor que se tiene en los primeros.

Las experiencias de los clientes determinan que los reactores polimerizadores de acero inoxidable pulidos electrolíticamente en el interior, son mejores que los reactores de acero vidriado, en -- tres aspectos:

- a) Transmisión de calor.
- b) Limpieza más fácil.
- c) Menor "crecimiento" del polímero en las paredes del reactor.

Además, durante el proceso del pulido electrolítico del recipiente de acero inoxidable, este adquiere un "pasivado" natural por medio del depósito de una película de óxido de cromo, obteniéndose con esta película una resistencia mejor a la corrosión.

5.2.1 Transmisión de Calor.

El vidrio tiene una conductividad térmica de 8 Btu/hr/pie² °F- -- pulg. El acero inoxidable tiene una conductividad térmica de 105 Btu/hr/pie² °F-pulg. La conductividad del acero al carbono es -- 3.6 veces mayor que la del acero inoxidable y 45 veces mayor que la del vidrio. Esto no significa precisamente que el coeficiente total de transmisión de calor "U", se aumentará en esta misma proporción.

Para ilustrar como afecta el material al coeficiente total de -- transmisión de calor, consideremos como ejemplo, un reactor de -- 18,925 l (5,000 gal), diseñado para una presión de 14.1 kg/cm² -- (200 psig) y vacío total, a 121.1 °C (250 °F). Los espesores del recipiente serán: 19 mm. (3/4") para acero inoxidable sólido; -- 17.5 mm (11/16") para acero chapado ("clad") y se usará 17.5 mm - (11/16") para el reactor de acero vidriado.

Se está considerando un coeficiente de película interno de 130, -- para los tres recipientes y un coeficiente de película para agua del lado de la chaqueta de 500, también para los tres recipientes, haciendo notar que este valor para el reactor vidriado sólo se obtiene usando boquillas de agitación. Así que la única variable - que afectará la transmisión de calor, será la pared del reactor. Los cálculos de transmisión de calor, considerando recipientes -- nuevos y limpios (sin incrustaciones), se pueden efectuar usando la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{1/h_o + 1/h_i + L/K}$$

En la que:

- U = Coeficiente total de transmisión de calor en Btu/hr/pie²°F.
- h = Coeficiente de película por el exterior (lado de circulación del agua), en Btu/hr/pie²°F.
- h_i = Coeficiente de película por el interior (lado del producto), en Btu/hr/pie²°F.
- L = Espesor del metal y/o película de vidrio, en pulgadas.
- K = Conductividad térmica en Btu/hr/pie²°F-pulg. . .
 - para el acero = 360
 - para la película de vidrio = 8
 - para el acero inoxidable = 105

Usando la ecuación anterior y los datos dados, el valor de "U" para el reactor recubierto de vidrio (considerando una película de vidrio de 1.27 mm (0.05 pulg) sobre placa de acero al carbono de 17.46 mm (0.6875 pulg) de espesor) es:

$$U = \frac{1}{1/500 + 1/130 + 0.05/8 + 0.6875/360} = 56$$

(el valor anterior es considerando un recipiente nuevo y limpio)

El coeficiente total de transmisión de calor para una placa sólida de 19.05 mm (0.75 pulg), de espesor de un reactor de acero inoxidable, en las mismas condiciones, es : 59.4. Debido a la baja

conductividad térmica del acero inoxidable, no hay mejora virtualmente, en el coeficiente total de transmisión de calor con respecto al vidrio.

El coeficiente total de transmisión de calor para el reactor fabricado con "Clad", considerando a este formado por una capa de 3.18 mm (0.125 pulg) sobre una placa de acero al carbono de 14.25 mm (0.5625 pulg) es de 80.35, el cual es 40% mayor que los otros.

5.2.1.1 Análisis de los Aspectos que Pueden Afectar la Transmisión de Calor.

5.2.1.1.1 Unión entre la placa base y la chapa ("clad").

Podrían surgir dudas acerca de la unión superficial entre las dos capas de metal de un acero con chapa, pero el procedimiento para probar la integridad de la unión de las dos placas, "prueba cruciforme", demuestra que las fallas no ocurren en el área de contacto entre las dos placas, indicando con esto una unión excelente, lo cual asegura una buena transmisión de calor de la placa de acero inoxidable a la placa de acero al carbono.

5.2.1.1.2 Chaqueta.

La chaqueta convencional usada en reactores vidriados, de tipo abierto o de derrame con toberas de agitación, permite una buena operación del reactor, especialmente si se le instalan mamparas en espiral. Por otra parte, este tipo de chaquetas es satisfacto--

ría para reactores vidriados, ya que el fenómeno de transmisión de calor en este caso no es afectado. Un coeficiente muy bajo -- del lado del agua, no afecta el coeficiente total "U", ya que la baja conductividad térmica de la película de vidrio, es el factor controlante.

Por ejemplo, usando un coeficiente de 250 para el lado del agua -- en el cálculo efectuado en la página 250, para determinar el coeficiente total "U" en un reactor vidriado, tendríamos:

$$U = \frac{1}{1/250 + 1/130 + 0.0578 + 0.6875/360} = 50.40$$

La disminución de este valor en comparación con el anteriormente calculado es muy pequeña, lo que no pasaría con cualquier cambio por mínimo que fuera si ocurriera en el coeficiente de película -- en el interior del reactor (producto).

Para el reactor chapado "Clad", el cual tiene una resistencia baja en la pared del metal, el coeficiente de película del agua es aún menos crítico. Usando el mismo valor de 250 para el coeficiente de película del lado del agua el valor del coeficiente total "U" sería:

$$U = \frac{1}{1/250 + 1/130 + 0.125/105 + 0.5625/360} = 69$$

Este cálculo demuestra una disminución apreciable en el coeficiente total, por lo cual al especificar acero chapado "Clad", es muy

importante considerar el coeficiente de película del lado del agua y la aplicación de la chaqueta adecuada para obtener el coeficiente de película más alto posible. En realidad el aumento de la velocidad del agua, más allá de cierto valor no aumentará el coeficiente total de transmisión de calor apreciablemente. Con el fin de ilustrar esto, usaremos un coeficiente de película del lado del agua igual a 900, en estas condiciones el valor resultante de la "U" es igual a 86.58 (un aumento menor a 10%). Si el valor del coeficiente de película del lado del agua fuera aumentado a 1500, el valor resultante para el coeficiente total "U", sería 90.09. De los últimos dos ejemplos, se concluye que aunque se aumenta considerablemente el coeficiente de película, del lado del agua, es muy poco lo que se mejora el coeficiente total de transmisión "U".

Con una chaqueta de tipo abierto, se ve muy afectada la transmisión de calor, por las corrientes de convección, en este caso, es posible usar toberas de agitación para aumentar la turbulencia, pero conforme aumenta el tamaño del reactor, es más difícil producir una mayor turbulencia la cual es necesaria para tener un coeficiente de película mayor. Por tal motivo, se ha concluido que la chaqueta con mampara espiral es la mejor para reactores vidriados que procesarán PVC. Se podrá argüir que puede haber corrientes en corto circuito entre las mamparas que forman la espiral, pero como ya se ha mencionado en el capítulo 3, esto se puede reducir al mínimo, usando técnicas apropiadas de fabricación. Por

otra parte, el uso de una mampara espiral en la chaqueta, evita la necesidad de los cabezales para conectar las toberas de agitación y es suficiente contar con una o dos boquillas para entrada y salida del fluido de enfriamiento.

Un aspecto adicional que debe considerarse es la relación superficie a volumen de los recipientes. Conforme aumenta el tamaño del reactor disminuye esta relación. De ahí que es conveniente tomar en cuenta cualquier posibilidad de mejora en el coeficiente total de transmisión de calor.

Se tiene como caso histórico práctico, el de una planta que substituyo un reactor de acero vidriado de 14,194 l (3750 gal) por uno de acero al carbono chapado ("Clad") con pulido electrolítico interior. Las dimensiones, el sistema de agitación y las mamparas del reactor chapado, fueron exactamente las mismas que para el reactor vidriado. Al reactor de acero inoxidable se le instala en la chaqueta la mampara espiral, en cambio el reactor de acero vidriado usó la chaqueta de tipo convencional con toberas de agitación.

Esta planta ha informado que el coeficiente total de transmisión de calor "U", ha mejorado de 45 para el reactor vidriado a 90 para el reactor de acero al carbono chapado. Mencionando a la vez que el tiempo del ciclo del proceso se redujo de 10 a 8 horas para un producto dado.

5.2.1.1.3 Velocidad del flujo de agua en la chaqueta.

La eficiencia del reactor está controlada por la fórmula $Q = U A \Delta t$. Para el reactor de PVC, que se ha venido mencionando, el área de transmisión fué la misma en ambos reactores, la velocidad del agua en el reactor de acero al carbono chapado ("Clad"), se conservó igual que para el reactor de acero vidriado. Así que debido a la mejora en la transmisión de calor, la temperatura del agua se aumentó con el resultado de que la Δt se redujo. Al reducirse la Δt , se ve afectada la eficiencia térmica del reactor, aún cuando se haya mejorado el coeficiente total "U". Por tanto, si es posible se recomienda un aumento de 30% en la velocidad de flujo del agua en relación con la velocidad utilizada para el reactor de acero vidriado, con el fin de obtener los resultados óptimos. Es de considerarse que debido a la escasez de agua o al aumento en costo por bombear una cantidad mayor de este fluido, esto no sea posible.

5.2.2 Corrosión.

La corrosión en el lado del agua es común a ambos reactores al vidriado y al chapado, esto puede evitarse con el uso de un inhibidor de corrosión. El óxido de hierro por sus características físicas es como un metal y por lo mismo no provocará ninguna resistencia a la transmisión de calor. Como se habrá podido observar, en los cálculos mostrados en páginas anteriores, la adición de 3.18 mm (1/8") como tolerancia para corrosión, no afectó el coeficiente total de transmisión de calor en lo mínimo.

5.2.3 Zona en Contacto con el Producto.

Una superficie pulida electrolíticamente, está toda a un mismo potencial así que sólo pueden aparecer un número de celdas locales mínimo de corrosión, quizás ninguno, considerando que las diferencias galvánicas locales, causadas por esfuerzos en el metal se -- pueden eliminar durante el proceso del pulido electrolítico.

Aunque lo establecido en párrafos anteriores está orientado hacia reactores para producir PVC, los principios básicos se aplican a cualquier proceso de polimerización, tales como los utilizados en la producción de polietileno, polipropileno, poliésteres y hule sintético.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES.

Desafortunadamente en el diseño y construcción de reactores intermitentes, no es posible hacer generalizaciones que permitan una aplicación confiable. Esto se debe principalmente al hecho de que se tienen tantos y tan diferentes procesos y son tantas las posibilidades de efectuar un mismo proceso de un modo distinto, que podemos concluir que para cada proceso y condiciones habrá un reactor específico; esto quiere decir que no hay reactores estándar y que aún en procesos en donde se obtienen productos semejantes, será necesario hacer ajustes cuando menos en las condiciones de operación.

Aunque a simple vista pudiera confundirse un reactor con un recipiente, por ejemplo de almacenamiento, no es correcto hacer este tipo de comparaciones, porque para seleccionar el material de un reactor no es suficiente con recurrir a tablas de corrosión; esta es la razón de que en el capítulo correspondiente a materiales de construcción se haya planteado de modo general cuál es el efecto que tiene cada elemento en una aleación o cuáles son los componentes que forman parte de un vidrio y porque o cómo se logra la adherencia de éste a un metal. También se estableció como ocurre el fenómeno de corrosión en los diferentes materiales y como es posible que aún en los aceros denominados inoxidables (una traducción incorrecta del idioma inglés), pueda ocurrir tan fácilmente la corrosión y como evitarlo. Por las mismas razones expuestas -

no es posible seleccionar un agitador con el criterio de que es similar a una bomba, y que aplicándole cierta potencia va a ser suficiente para lograr una buena transferencia de masa o calor, es decir un buen mezclado. Es por esto que se plantearon las bases de la forma como afecta los diferentes parámetros que intervienen en un fenómeno de agitación y como puede inter-relacionarse usando el análisis dimensional, así como la aplicación de algunos aspectos prácticos que no es posible encontrar en la literatura técnica ya que pertenecen a la operación real de los equipos. Deberá tenerse siempre en mente en la etapa de diseño del sistema de agitación que son dos las necesidades de potencia de un proceso: aquella necesaria para mover físicamente al impulsor en un recipiente bajo ciertas condiciones y aquella, potencia que se necesita para lograr los requerimientos de agitación del proceso.

Para lograr el calentamiento o enfriamiento en un proceso en un reactor, se efectuará por medio de un área de transmisión la cual se puede dar con alguno de los aditamentos propuestos en el capítulo No. 3. Nuevamente es necesario hacer hincapié que la selección depende de las necesidades del proceso. Los datos hidráulicos, mecánicos y de operación mencionados en este capítulo, ayudarán a seleccionar el medio más adecuado y el fluido de calentamiento o enfriamiento que sea compatible con el aditamento instalado al reactor, en lo que se refiere a: Transmisión de calor, Resistencia mecánica y Caída de presión.

Los criterios de selección del dispositivo de transmisión de calor que mejor se adapte al reactor quedan establecidos ampliamente en el capítulo mencionado.

Aunque los conceptos planteados en el Capítulo No. 4, pudieran parecer de sentido común, los cuales se mencionan en los manuales de operación de los reactores, son básicos para una operación satisfactoria de un reactor. No es necesario profundizar demasiado para concluir que la falta de cuidado en la operación de un reactor no solamente va a dañar al reactor mismo, sino que puede afectar la calidad del producto y en una situación más crítica la producción, por lo cual vale la pena considerar esos conceptos.

Finalmente es conveniente tomar en cuenta algunos otros factores de los cuales se mencionan a continuación solamente dos, que se consideran de mucha importancia:

- a) Disponibilidad de materiales. En este renglón debemos tomar en cuenta que en México no producimos materiales con un contenido de carbono adecuado para depositar y dejar adherido el vidrio. Tampoco fabricamos acero inoxidable y menos aún placa chapada ("Clad"), esto influirá decididamente en el precio del reactor y en el tiempo en que podamos contar con estos materiales para fabricar y tener a tiempo nuestro equipo.
- b) Aspectos de fabricación. Vamos a suponer que desde el punto

de vista diseño, hemos seleccionado para un proceso de polimerización, un material chapado con A.I. 316 ("Clad") para fabricar el reactor, al que después le daremos un pulido electrolítico. Si por alguna razón, durante el proceso de fabricación cuando se están soldando las diferentes partes no se siguen los procedimientos correctos, podría haber, contaminación del acero inoxidable, con acero al carbono, con lo cual la zona de las soldaduras podría ser sensible a la corrosión, por ataque químico.

En este punto es necesario mencionar nuevamente que debido a las condiciones de operación de un reactor las cuales son críticas en lo que se refiere a corrosión se debe tener especial cuidado en las distintas etapas de fabricación.

Se observará que construir un reactor es algo muy complejo que se inicia en el momento en que se determinó que un proceso es conveniente llevarlo a escala industrial y finaliza cuando se logró poner en marcha el reactor y se está obteniendo de él los productos, con la calidad adecuada y costo razonable.

La labor del Ingeniero Químico, es tomar parte en cada una de las etapas y cuidarlas hasta lograr los objetivos. Este trabajo proporciona alguna información seleccionada y condensada de trabajos de investigación y experiencias prácticas que posiblemente puedan ayudar en las etapas de diseño y fabricación.

BIBLIOGRAFIA.

LIBROS

- 1) Brezhnoi A.I.; "Glass Ceramics and Photo Sittals" Plenum Press N.Y. 1970.
- 2) Norton H.F.; "Elements of Ceramics" Reading Mass, Addison - Wesley, Publishing Co., Second Edition, 1974.
- 3) Burns R.M. and Bradley W.W.; "Protective Coatings for Metals", N.Y., Reinhold Publishing Corporation, Third Edition, 1967.
- 4) Society of Manufacturing Engineers; "Surface Preparation and Finishes for Metals", Mc Craw-Hill, 1971.
- 5) Babcock & Wilcox; "STEAM" Its generation and use, The Babcock & Wilcox Company, Thirty eight Edition, 1972.
- 6) Crane Co.,; "Flow of Fluids" Technical Paper No. 410, 1969.
- 7) Kern D.Q.; "Process Heat Transfer", N.Y. Mc Graw Hill 1950.
- 8) Mc Adams W.H.; "Heat Transmision" N.Y. Mc Graw Hill 1954.
- 9) Mc Cabe W.L. and Smith J.C.; "Unit Operations of Chemical Engineering" N.Y. Mc Graw Hill, Third Edition, 1976.
- 10) Badger L.W. and Banchemo W.T.; "Introduction to Chemical Engineering", N.Y. Mc Graw Hill, 1955.
- 11) American Society for Metals; "Metals Handbook" Vol. I Properties and Selection of Metals, Metals Park Ohio, Eighth Edition 1961.

- 12) Kirk - Othmer; "Encyclopedia of Chemical Technology"
Second Edition, 1963, Volumes: 10 and 13.

- 13) Encyclopedia of Science and Technology, N.Y., Mc Graw Hill,
Third Edition, 1960, Vol 3.

REVISTAS

- 1) Barona N. and H.W. Prengle, Jr.; "Hydrocarbon Processing" -- (12), 73, 1973.
- 2) Markovitz R.E.; "Hydrocarbon Processing" 52 (8), 117, 1973.
- 3) Barona N. and H.W. Prengle, Jr.; "Hydrocarbon Processing" -- (52), (3), 63, 1973.
- 4) Markovitz R.E.; "Chemical Engineering", Nov 15, 1971.
- 5) Greeton A.T.; "Chemical Engineering" Jan 20, 1964.
- 6) Holland F.A.; "Chemical Engineering" Sept 17, 1962.
- 7) Norwood K.W. and A.B. Metzner; A.I.C.H.E. Journal 6, (3) 432, 1960.
- 8) Oldshue J.Y. and A.T. Greeton; "Chemical Engineering - -- Progress", 50, 615, 1954.
- 9) Rushton J.H.; "Chemical Engineering Progress", 50, 587, 1954.
- 10) Rushton J.H. E.W. Costich, and H.J. Everett; "Chemical Engineering Progress", 46, 567, 1950.
- 11) Rushton J.H. E.W. Costich, and H.J. Everett; "Chemical Engineering Progress", 46, 295, 1950.

BOLETINES

- 1) The Pfaudler Co., "Glasteel" Bulletin 1097, U.S.A.
- 2) Pfaudler - Werke AG; "Pfaudler Glasteel for the Chemical Industry", Bulletin 204 - 3e., Germany.
- 3) Pfaudler - Werke AG; "Developed by Pfaudler NUCERITE", Bulletin 205 - 2e, Germany
- 4) Pfaudler - Werke AG; "Thermal Shock Resistance and Thermal Conductivity", Bulletin S.I. 303 - 6e.
- 5) Pfaudler Stainless Steel Reactors, Bulletin 1084.
- 6) Pfaudler Manual No. IM81 - 100 - 3, "Glasteel Reactors and Storage Tanks", Installation and Maintenance.
- 7) Pfaudler Manual No. IM22 - 301 - 2, "DTW Drives", Installation and Maintenance.
- 8) Pfaudler Manual No. IM97 - 001 - 3, "Glasteel Pipe - Fittings - Valves", Installation - Operation - Maintenance.