

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

**APLICACIONES ESPECIALES
DE BOMBEO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER
EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
FERNANDO GUERRERO Y PONCE

MEXICO, D. F., 1973

M-165575



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA .

Presidente: ING .ALBERTO URBINA DEL RAZO

Vocal: ING .ALBERTO BREMAUNTZ MONGE

Secretario: ING .JOSE E .GALINDO FUENTES

1er.Suplente: ING .CUTBERTO RAMIREZ CASTILLO

2do.Suplente: ING .GERARDO RODRIGUEZ ALONSO

Sitio donde se desarrolló el tema: M.MENDALDE 1119

México 12, D.F.

Nombre completo y firma del sustentante: FERNANDO GUERRERO Y PONCE

Nombre completo y firma del asesor del tema: ING .ALBERTO
BREMAUNTZ MONGE .

Nombre completo y firma del supervisor técnico: ING .ALBERTO
URBINA DEL RAZO .

APLICACIONES ESPECIALES DE BOMBEO

Página

OBJETIVOS

PROLOGO

<u>CAPITULO I</u> - Introducción	A
1.- Teoría de Comportamiento de los Fluidos	1
2.- Flujo Laminar y Turbulento	5
3.- Fluidos Newtonianos y no-Newtonianos	17
4.- Fluidos Polifásicos	22
5.- Definición de los Materiales Difíciles de Bombeo	27
<u>CAPITULO II</u> - Tipos de Bombas	
1.- Presentación de los Tipos Básicos de Bombas	28
2.- Selección Primaria de Equipo para Fluidos Difíciles	39
3.- Bombas para Líquidos muy Viscosos	40
4.- Bombas para Sólidos en Suspensión	46
5.- Bombas para Líquidos con Gases	51
6.- Bombas para Fluidos en Tres Fases	56
<u>CAPITULO III</u> - Equipo Especial, Accesorio para el Bombeo	
1.- Tubería y Accesorios para Bombeo de Líquidos Difíciles	57
2.- Consideraciones de Diseño y Materiales para las Tuberías	61
3.- Manómetros, Termómetros, Medidores de Flujo, etc. para Fluidos Difíciles.	67
<u>CAPITULO IV</u> - Aplicaciones Escogidas por Tipos de Industrias	
1.- Aplicaciones Especiales en la Industria Química	72
2.- Industria del Papel	84
3.- Industria Petrolera	86
4.- Industria Hulera	88
5.- Drenaje Industrial y Urbano	88
6.- Industria de Construcción	91
CONCLUSIONES	95
BIBLIOGRAFIA	97

OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo de este trabajo es el de presentar algunos aspectos poco conocidos pero que se consideran bastante importantes, sobre el manejo de fluidos y en especial de los líquidos.

La gran mayoría de la literatura publicada sobre el manejo de líquidos, se refiere a las características y aplicaciones de los sistemas que se encuentran con más frecuencia en la industria, a líquidos comunes, agua principalmente, solventes o soluciones de tipos muy variados, pero con el común denominador de poder fluir más o menos fácilmente por bombas y tuberías.

Sin embargo, muchas partes importantes y vitales de los procesos industriales, los líquidos que se requieren de manejar, no fluyen tan fácilmente por bombas ni tuberías comunes y necesitan de sistemas distintos a los empleados ordinariamente.

Se va a tratar de dar aquí una idea de como diferenciar entre aplicaciones de bombeo normales y aplicaciones de bombeo especiales, tomando como base para esta selección principalmente, la diferencia entre los materiales a manejar, sus propiedades físicas y químicas y las condiciones de operación del sistema. Una vez que se tenga un criterio para esta diferenciación, se presentarán los tipos distintos de sistemas y equipos más importantes que hay en la actualidad para resolver los problemas difíciles de bombeo.

CAPITULO I

1.- Teoría de Comportamiento de los Fluidos

La mayoría de las operaciones unitarias son fenómenos de potencial. Estas operaciones difieren principalmente en la naturaleza del potencial de empuje y de la resistencia al flujo. Ya que el flujo de fluidos ocurre en casi todas las operaciones, salta a la vista la importancia que tiene esta materia.

Por su propia naturaleza, podemos definir a un fluido como un material que tiende a deformarse o fluir cuando es sometido a un desequilibrio de fuerzas mecánicas.¹ Las propiedades del fluido mismo determinan el grado de flujo resultante en una situación dada. El grado a que este flujo llega tiene un valor tal que el producto de este flujo y la resistencia interna del fluido a fluir, es exactamente igual en magnitud y de sentido contrario al desequilibrio original.

Este tratamiento es válido para fluidos de varios tipos y se basa en el estudio de las propiedades de transporte aplicadas en especial al momentum. La evaluación se hace en forma lógica reconociendo en primer lugar, el tipo de potencial motivador que es aplicable y calculando su magnitud; y en segundo lugar, la resolución de la resistencia en sus partes componentes de modo que se pueda obtener la resistencia total al flujo.

Resulta así una condición de equilibrio dinámico de acuerdo a la ecuación básica:

$$\text{Flujo} = \frac{\text{Potencial}}{\text{Resistencia al Flujo}} \quad (1)$$

Consideramos que el material que fluye es el fluido mismo y este flujo se puede expresar como una relación volumétrica o en peso. La densidad del fluido da la relación entre masa y volumen del fluido como sigue:

$$w = Q \times \rho \quad (2)$$

Donde "w" es el gasto en masa, lb./seg ; "Q" es el gasto en volumen ft³/seg y ρ es la densidad en lb/ft³.

La selección de un potencial para el flujo del fluido es un problema de conveniencia principalmente mientras que represente a la fuerza mecánica que causa el flujo. Estos potenciales son: La fuerza misma, presión, energía, trabajo y potencia. Podemos usar uno o todos estos potenciales, sin embargo, hay situaciones específicas en las que cada uno es más conveniente. Por ejemplo, un equilibrio de fuerzas es más adecuado para condiciones de equilibrio estático. En este caso, las fuerzas se anulan unas con otras y el grado de flujo es cero. Esta condición estática se encuentra por ejemplo, en un manómetro que mide presión o diferencias de presión.

Podemos aplicar el balance de energía mecánica para calcular cuantitativamente la cantidad de energía necesaria para vencer la resistencia del fluido en una situación dada:

$$\frac{Z_1 g}{gc} + P_1 V_1 + \frac{v_1^2}{2gc} + \int_{V_1}^{V_2} PdV - W = \frac{Z_2 g}{gc} + P_2 V_2 + \frac{v_2^2}{2gc} + F \quad (3)$$

En la ecuación (3), F es el potencial para usarse en la ecuación (1) y los otros términos colectivamente, determinan qué tanto potencial hay disponible para causar el flujo \dot{Q} , alternativamente de qué fuente el potencial requerido se debe obtener.

Reconocemos que la ecuación (3), es una forma de la ley de conservación de energía aplicada a la energía mecánica únicamente pero excluyendo la energía térmica como tal. La energía potencial Zg/g_c la energía cinética $v^2/2g_c$ y la energía estática PV las tienen siempre todos los fluidos y por lo tanto debemos incluirlas en ambos lados, el de entrada y el de salida del balance.

Por definición, "W" es trabajo mecánico hecho por el fluido en la maquinaria específica de que se trate y debe ser restado del lado de entrada. La integral $\int PdV$ representa el trabajo mecánico obtenido de contenido de energía térmica del fluido tal como la expansión de un gas y es exactamente lo opuesto al término F.

Al vencer la resistencia al flujo, el potencial se transforma en energía térmica por medio de la fricción interna, así consecuentemente, estos términos aparecen en lados opuestos del balance.

En ausencia de algún artefacto ó maquinaria específico, "W" debe ser "0". Para un fluido no compresible, $\int PdV$ es "0", una condición que sustancialmente verdadera para la mayoría de los líquidos. Si suponemos que la fricción F es despreciable, el balance se simplifica a la forma propuesta originalmente por Bernoulli.

$$\frac{Z_1 g}{g_c} + P_1 V_1 + \frac{v_1^2}{2g_c} = \frac{Z_2 g}{g_c} + P_2 V_2 + \frac{v_2^2}{2g_c} = \text{constante} \quad (4)$$

Mientras que la ecuación (4) es útil para mostrar la transformación de un tipo de energía mecánica a otro, es por demás limitada por la suposición de la ausencia de fricción.

Estas ecuaciones se han escrito para una base arbitraria de una unidad del fluido, pero es posible multiplicar cada término de estos balances por una cantidad "m" de masa de fluido sin afectar la igualdad. En forma similar, ya que la presión es una medida de la concentración de la energía mecánica, la multiplicación de cada término en las ecuaciones (3) y (4) por ρ da un balance de presión. Se ve que la presión es un producto de la energía por unidad de masa y de la masa por unidad de volumen. Para un fluido no-compresible, $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ y la ecuación (3) se puede reescribir como:

$$\rho \frac{Z_1 g}{gc} + P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2gc} - \rho W = \rho \frac{Z_2 g}{gc} + P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2gc} + \rho F \quad (5)$$

En la ecuación (5), $\rho v^2/2gc$ es la presión de impacto que se alcanzaría si el fluido fuera detenido y su energía cinética cambiada cuantitativamente a energía potencial. Similarmente, ρF es la caída de presión ΔP_f causada por la fricción, y, ρZ es la presión estática equivalente a la energía potencial.

La evaluación y el uso de la resistencia que se opone al flujo del fluido es posiblemente el cálculo más extenso y el más recurrente que el ingeniero debe hacer en el campo de flujo de fluidos.

Ya que esta resistencia es completamente dentro del fluido, su magnitud depende de la dirección instantánea de la velocidad de las partículas de fluido a medida que se mueven a través del conducto. Aquí consideramos que una partícula sea un agrupamiento aleatorio de moléculas que se mueven, en una escala macroscópica, como un todo. El tamaño y la forma del conducto por la que fluye el material en cuestión y, hasta cierto grado, su material de construcción influyen también la resistencia al flujo.

2.- Flujo Laminar y Turbulento

Para poder tener una mejor idea de lo que se entiende por flujo laminar y turbulento es conveniente hacer referencia de nuevo al estudio de la teoría general de los fenómenos de transporte y otra vez, al transporte de Momentum. Considerando un gas ideal como modelo, que está compuesto de moléculas de masa " m " y una velocidad " \bar{c} " en todas direcciones. Cada molécula de gas tiene un Momentum de $m\bar{c}$ en cualquier dirección dada y como se considera que el movimiento de las moléculas es aleatorio, el Momentum de una molécula dada se cancela con el de otra molécula igual que se mueva en dirección opuesta y así, dentro de un volumen determinado de gas la transferencia neta de Momentum es Cero.

Sin embargo, si en una porción que se considere del gas las moléculas afectadas por un agente externo cambian su velocidad media, entonces su Momentum será distinto y habrá una transferencia del mismo entre las porciones de gas que tengan velocidad media \bar{c} distinta.

Si consideramos este gas modelo en unos ejes coordinados y suponemos que fluya de una manera regular en la dirección $+y$ entonces los grupos de moléculas fluyen paralelos a los planos $+y$ y $-yz$. La velocidad " v " con la que estos grupos de moléculas se mueven en la dirección $+y$ es una velocidad macroscópica o velocidad del conjunto y es equivalente a un "Flujo" del gas en la dirección $+y$. Como no hay movimiento aleatorio en lo que respecta al flujo aunque las moléculas individuales sí se muevan en forma aleatoria, el movimiento promedio de todo el conjunto del gas en la dirección del flujo es un movimiento macroscópico y se le llama "Flujo Laminar". En la figura 1 se ilustran ambos tipos de flujo, el laminar y el turbulento.

En contraste con el transporte molecular de Momentum, existe el transporte turbulento de Momentum, que es en la práctica más importante para el ingeniero químico. El análisis del flujo turbulento es bastante más complicado que el del flujo laminar. En la práctica se observa que mientras un fluido se mueve a baja velocidad en un ducto, las diferentes capas de este se mantienen en movimiento a la misma velocidad sin existir transferencia de Momentum en sentido radial al tubo; en el flujo turbulento existen remolinos o turbulencias que se mueven precisamente en el sentido radial al flujo y que transportan Momentum en el mismo sentido y que éste transporte de Momentum es mucho más considerable que el producido en transferencia molecular. Las turbulencias se deben a imperfecciones de los sistemas que en la práctica no pueden eliminarse, como son la rugosidad en la superficie interior de

las tuberías, vibraciones en las mismas, etc. cabe notar que existen un límite superior para el flujo laminar así como uno inferior para el flujo turbulento y que, entre estos, hay una región intermedia o de transición. Se ha visto también que la formación de la turbulencia empieza en el centro del tubo por donde va el fluido y forma un núcleo central de actividad de corrientes de turbulencia. El diámetro de este núcleo aumenta al aumentar la velocidad media. Las conclusiones obtenidas experimentalmente demuestran que arriba de una cierta velocidad media del fluido en un sistema dado se forman remolinos o corrientes de turbulencia que fluyen en dirección normal con comportamiento aleatorio. Estas corrientes son más grandes y más abundantes en el centro del tubo y un aumento en la velocidad media del fluido ensancha el núcleo turbulento hasta que el tubo está prácticamente lleno de corrientes de turbulencia.

El nuevo factor que se considera para analizar la transferencia de Momentum en el flujo turbulento es la difusividad turbulenta de Momentum que es una función tanto de la posición como de la velocidad en el flujo turbulento. Nikuradse encontró experimentalmente que el perfil parabólico de velocidades del flujo laminar se pierde en el flujo turbulento y que se va achatando hasta formar un frente recto continuo en la dirección normal al flujo. La distribución de velocidades propuesta por Nikuradse fue analizada luego por Von Kármán quien propuso expresiones matemáticas para describir los datos de distribución de velocidad en las regiones laminar, de transición, y turbulenta. Estas distribuciones se ilustran en la Figura 0.

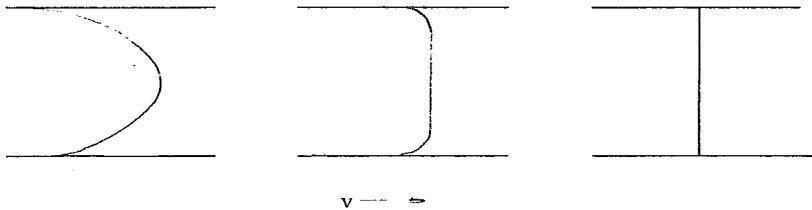
Viéndolo en su forma más simple, el aumento en esfuerzo en el fluido debido a la combinación de los flujos laminar y turbulento se puede representar por la ecuación general

$$\tau_y E_c = - (\nu + E_z) \frac{d(\rho v)}{dx} \quad (5)$$

donde E_z es la difusividad turbulenta de Momentum.

DISTRIBUCION DE VELOCIDADES EN
FLUJOS LAMINAR Y TURBULENTO

(Figura No.0)



(a)

(b)

(c)

- (a) Flujo laminar de baja velocidad
 (b) Flujo turbulento de alta velocidad
 (c) Flujo de muy alta velocidad ($v \rightarrow \infty$)

Los fundamentos básicos se muestran en la figura 2. La relación entre las variables se pone cuantitativamente así:

$$\Sigma = \frac{\text{Fuerza cortante}}{\text{Área de esfuerzo}} = \frac{dv}{g_c dr} \quad (6)$$

Si aplicamos la ecuación (6) al tubo circular mostrado en la figura 2, resulta una expresión diferencial del fenómeno:

$$d(\text{Fuerza}) = -SdP = \Sigma F D dL \quad (7)$$

La solución finita de la ecuación (7) da la ecuación de la ley de Poiseuille. Se escribe normalmente en varias formas equivalentes:

$$F = \frac{\Delta P_F}{\rho} = \frac{32 \mu L v}{g_c D^2 \rho} = \frac{128 \mu L Q}{\pi g_c D^4 \rho} = \frac{128 \mu L W}{g_c D^4 \rho^2} \quad (8)$$

Podemos arreglar la ecuación (8) en la forma de nuestra ecuación general de gradiente:

$$w = \frac{F}{128 \mu L / \pi g_c D^4 \rho^2} = \frac{\Delta P_F}{128 \mu L / \pi g_c D^4 \rho} \quad (9)$$

$$Q = \frac{F}{128 \mu L / \pi g_c D^4 \rho} = \frac{\Delta P_F}{128 \mu L / \pi g_c D^4} \quad (10)$$

Escogiendo arbitrariamente unidades de masa para el flujo y la energía para el potencial en la ecuación (9), encontramos que la resistencia es:

$$R = \frac{F}{w} = \frac{128 \mu L}{\pi g_c D^4 \rho^2} = \frac{\text{ft-lb.fuerza/lb.masa}}{\text{lb.masa}} \quad (11)$$

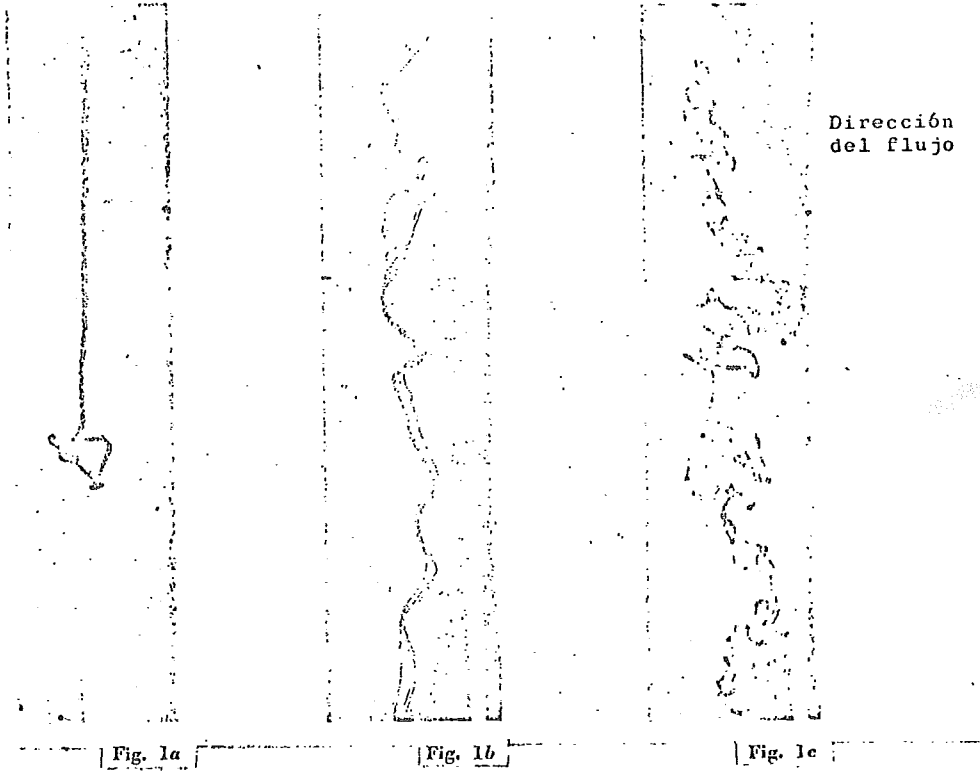
El análisis de esta resistencia, del mismo modo que la resistencia eléctrica o la térmica, por la relación $R=rL/S$ indica que la resistividad hidráulica es:

$$r = \frac{32 \mu}{g_c D^2 \rho^2} = \frac{(\text{lb.fuerza})(\text{ft})^2}{(\text{lb.masa})^2} \quad (12)$$

La ecuación (12) muestra que r no solo depende de las propiedades del fluido, sino también de la dimensión del ducto que determina la magnitud de la velocidad del fluido.

Figura 1

Dirección del flujo



Flujo Laminar

Flujo de transición

Flujo Turbulento

Figura 2

Aplicación de esfuerzo cortante entre superficies planas y cilíndricas en un fluido.

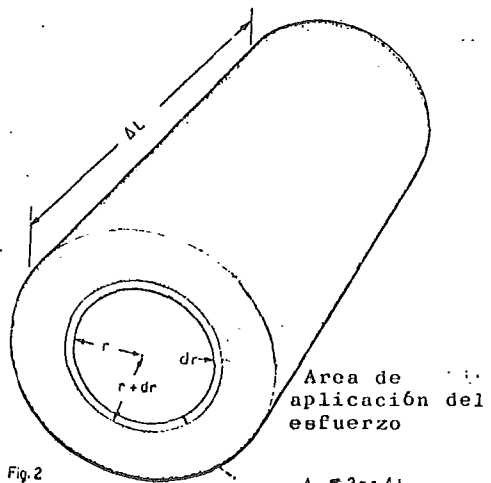
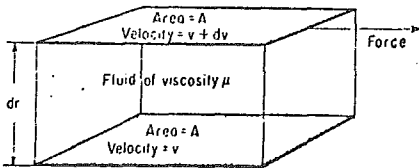


Fig. 2

$A = 2\pi r \Delta L$

Una expresión matemática de la resistencia en este régimen de flujo es mas complicada porque otros factores además del esfuerzo son significativos. La existencia de los pequeños remolinos hace que las partículas se muevan de una posición radial con su velocidad lineal promedio, a otra posición radial con una diferente velocidad promedio. Si se considera la velocidad lineal promedio como una cantidad estadística de la cual se pueden desviar las partículas, este movimiento se puede describir como un intercambio de momentum con un movimiento neto del centro del ducto hacia las paredes.

Alternativamente, su influencia en el consumo de energía se puede visualizar trazando el ciclo seguido por una partícula en específico. A medida que la partícula se mueve de una posición de alta velocidad a una de menor velocidad, se mezcla con el fluido en esta posición, tomando su velocidad. También, la energía queda al fluido debe transformarse en energía térmica.

Ya que este intercambio puede desarrollarse en un plano horizontal, no hay cambio en la energía potencial. Una conversión a energía estática requeriría que hubiera una diferencia de presión en diferentes posiciones radiales; esto sería contrario al razonamiento y al hecho. No hay forma mecánica en la que ésta energía se puede almacenar para el viaje de regreso. De modo que hay menos energía mecánica total en la segunda posición. La desaparición de energía corresponde a la fricción.

En el viaje de regreso, la partícula gana en energía cinética.

Para los fluidos no compresibles, esta energía no se puede obtener de su propia energía térmica sino que debe ser ganada a expensas de la presión estática. Así, al final de su viaje redondo, la partícula está a una temperatura más alta y, a menos que la energía asociada con éste cambio de temperatura se obtenga de un cambio correspondiente en energía potencial, el fluido está a una presión menor.

Este proceso toma un tiempo finito durante el cual la partícula se mueve con la corriente por su velocidad en la dirección de flujo, así el gradiente de presión $\Delta P_r / \Delta L$ depende de qué tan lejos se mueva la partícula y a qué velocidad se mueve radialmente así como axialmente. La naturaleza aleatoria del patrón de flujo hace poco probable que un grupo específico de moléculas permanezca junto y regrese como una entidad a su punto de partida. Una molécula individual se puede volver parte de varios remolinos y moverse impredeciblemente de una posición radial a otra antes de regresar ultimadamente a una posición designada arbitrariamente como la inicial.

Ya que todas las moléculas son iguales estadísticamente, en una posición dada, esto no altera la explicación de una resistividad más alta del fluido durante el flujo turbulento comparada con la resistividad en flujo laminar, si se puede mantener para el mismo flujo volumétrico.

Por lo tanto, el problema principal del flujo turbulento es el de describir matemáticamente el patrón de flujo. En este patrón están los componentes de la velocidad tanto en la dirección axial como en la radial, en varias posiciones radiales en la tubería.

Aunque se han hecho varios estudios como el del concepto de la longitud de mezcla de Prandtl y los perfiles universales de velocidad de Nikuradse, ninguno ha tenido éxito en predecir los requerimientos de energía de Flujo turbulento como hace la ley de Poiseuille para el flujo laminar.

Todas las correlaciones de fricción de flujo turbulento contienen un factor empírico que sirve como una constante de proporcionalidad entre el flujo y el consumo de energía. Esta correlación en la forma más usada por los ingenieros químicos es la ecuación de Fanning:

$$F = \frac{4fLv^2}{2g_c D} = \frac{32LfQ^2}{\pi^2 g_c D^5} = \frac{32fLW^2}{\pi^2 g_c D^5 \rho^2} \quad (13)$$

El único término que no aparece también en la ley de Poiseuille es el factor de fricción de Fanning "f" cuya magnitud depende del grado de turbulencia. Sin embargo, el exponente de la velocidad, y los términos de diámetro y densidad difieren de los de las ecuaciones (8) y (9), y la viscosidad como tal no aparece en la ecuación (13).

Una alternativa de la ecuación de Fanning es la ecuación de Weisbach que difiere solamente en que su factor de fricción incorpora la constante 4 en el numerador de la ecuación (13) y por lo tanto, es cuatro veces más grande. Otra es la ecuación de Chezy : $F = 4v^2 L/C^2 D$ donde $C = (2g_c/f)^{0.5}$.

La forma más ampliamente aceptada de correlacionar los múltiples datos de fricción es la gráfica de factor de fricción que se muestra en la Figura 3 y donde el factor de fricción se grafica

contra el número de Reynolds N_{Re} . Para valores de N_{Re} arriba de 2,000, un parámetro adicional, la rugosidad de la tubería, es necesario para resultados exactos.

Rearreglando la ecuación de Fanning se ve que la resistencia en el flujo turbulento depende fuertemente del flujo así como de otros factores.

$$R = \frac{F}{w} = \frac{4fw}{2g_c (\eta/4) D^3 \rho^2} \times \frac{L}{D^2/4} \quad (14)$$

En este caso, la resistividad del fluido "r" es:

$$r = \frac{R}{L/S} = \frac{4f}{2g_c D \rho^2} \times \frac{w}{\eta D^2/4} \quad (15)$$

La resistividad es bastante compleja y no se puede expresar fácilmente como una función matemática porque el factor de fricción es dependiente del número de Reynolds.

Consideremos el número de Reynolds y los puntos de transición entre flujo laminar y flujo turbulento; se considera normalmente que un valor del número de Reynolds de 2,000 a 2,100 marca el cambio entre el flujo laminar y el turbulento. Las diferencias en el valor crítico se deben a que la transición no es exacta. Parece que la turbulencia aparece primero en el centro del tubo y aumenta en magnitud con el aumento de velocidad. El mismo fenómeno ocurre en secciones no circulares pero el valor numérico del número de Reynolds crítico no es el mismo que para tubos circulares. El método para evaluar un término "D" y uno "V" para las formas no circulares, explica la diferencia en los números de Reynolds.

Por ejemplo, el valor crítico del número de Reynolds para cambiadores de calor está en el orden de 200, y para torres empacadas el punto de transición parece localizarse alrededor de un número de Reynolds igual a 30.

En la extrema izquierda de la gráfica de factor de fricción Figura 3, una sola línea recta describe la variación de f con N_{Re} , hasta un número de Reynolds de 2,000. Para flujo laminar, la variación de f con N_{Re} , es independiente del tipo de tubo. Ya que la Figura 3 tiene coordenadas logarítmicas, la ecuación de la línea recta es:

$$\log f = \log 16 - \log N_{Re} \quad (16)$$

Arreglando la ecuación (16) eliminando los logaritmos queda:

$$f = 16/N_{Re} \quad (17)$$

Substituyendo el valor de f en la ecuación (17) en la (13) da:

$$F = \frac{4(16\mu/Dv\rho)Lv^2}{2g_cD} = \frac{32\mu Lv}{g_cD^2\rho} \quad (18)$$

La expresión de la derecha en la ecuación (18) es la ley de Poiseuille. Como se esperaba, la ley de Poiseuille y la ecuación de Fanning dan el mismo resultado y pueden usarse indistintamente cuando el flujo laminar prevalece.

Para diferentes tubos, el factor de fricción alcanza un valor asintótico arriba de números de Reynolds de 10^5 a 10^7 . En este rango de números de Reynolds, el factor de fricción se vuelve prácticamente independiente del número de Reynolds. Podemos expresar esta relación como : $f = a_1 (N_{Re})^a$

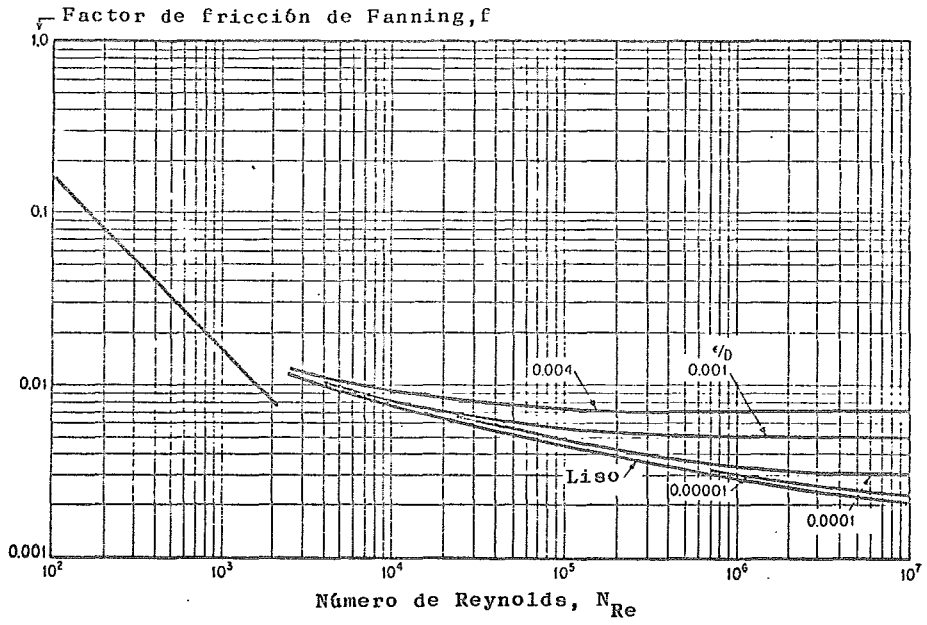


Figura No. 3

Este valor de a_1 y por lo tanto el de f depende solo de la rugosidad del tubo que se muestra en la Figura 3 como la relación de rugosidad ϵ/D . La relación de ϵ/D se determina generalmente dividiendo el factor de rugosidad que se encuentra en tablas entre el diámetro del tubo en pies. El flujo en esta región es completamente turbulento. La turbulencia y el flujo radial se extiende hasta las salientes mismas de la rugosidad. Aumentos posteriores en la velocidad del fluido no alteran las magnitudes relativas de los componentes axial y radial de la velocidad instantánea poseída por las partículas de fluido en cualquier punto. Entre la región donde ocurre el flujo laminar y el factor de fricción alcanza un valor asintótico, el grado de turbulencia varía con el número de Reynolds.

3. Fluidos Newtonianos y no-Newtonianos

Las ecuaciones desarrolladas anteriormente son para fluidos con viscosidad que es constante a temperatura constante e independiente del grado y tiempo de aplicación del esfuerzo. Los fluidos con esta propiedad se llaman fluidos "Newtonianos". Todos los gases y los líquidos puros de bajo peso molecular son Newtonianos. Las mezclas miscibles de líquidos de bajo peso molecular, son también Newtonianas.³

Los fluidos no-Newtonianos se caracterizan por sus viscosidades que cambian con el grado del esfuerzo ó su tiempo de aplicación. De las dos clasificaciones, los fluidos no-Newtonianos dependientes del grado de esfuerzo serán descritos primero. Estos fluidos se representan generalmente por una ecuación de la forma: $\tau_y g_c = \phi \left(\frac{dv}{dx} \right)$ (19)

donde $\tau_y g_c$ = al esfuerzo cortante en el punto en consideración.
 $(\frac{dv}{dx})$ = alguna función del gradiente de velocidad en el punto en consideración.

En cualquier punto en el sistema la viscosidad "aparente" es util para identificar un comportamiento local. La viscosidad "aparente" se puede definir en la misma manera que la viscosidad Newtoniana.

$$\tau_y g_c = -\mu_a \frac{dv}{dx} \quad (20)$$

combinando las ecuaciones (19) y (20) da:

$$\mu_a = - \frac{(\tau_y g_c)}{(\frac{dv}{dx})} \quad (21)$$

Se nota que, si cualquier punto de la curva de flujo se une al origen con una línea recta, la pendiente de la línea es la viscosidad aparente. Ver Figura 4.

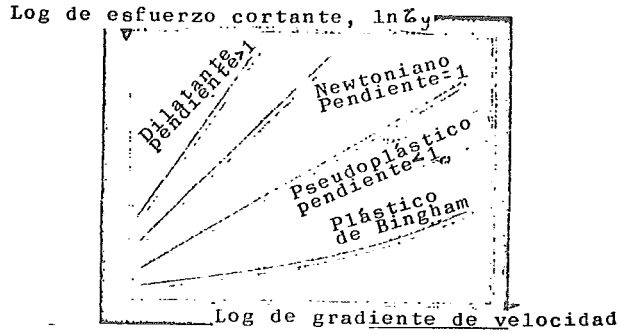
Flúidos Plásticos de Bingham .- Estas sustancias requieren de un esfuerzo límite que debe ser excedido antes de que pueda ocurrir el flujo; generalmente se le conoce como el punto de cesión. Un ejemplo de plástico de Bingham son las suspensiones de grava y arcilla. Para los plásticos de Bingham,

$$\tau_y g_c - \tau_0 g_c = -\mu_B (\frac{dv}{dx}) \quad (22)$$

donde $\tau_0 g_c$ = al punto de cesión y μ_B = se define en la ecuación (21). Sigue que

$$\mu_a = \frac{\mu_B \frac{dv}{dx} + \tau_0 g_c}{(\frac{dv}{dx})} \quad (23)$$

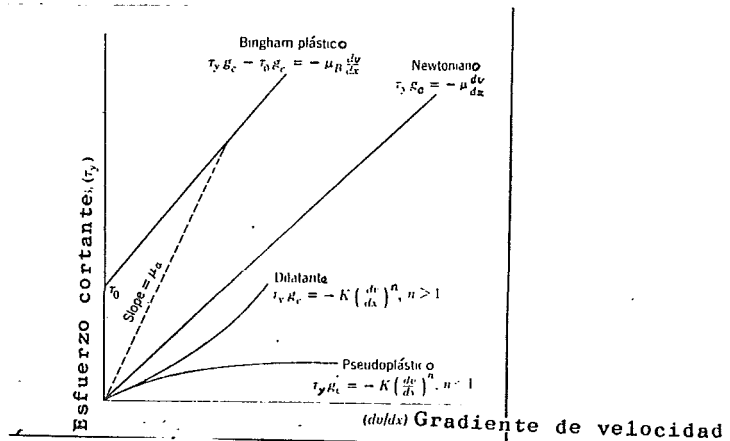
de la ecuación (23) es evidente que μ_a disminuya con el grado de esfuerzo dv/dx .



GRAFICA LOGARITMICA DE ESFUERZO CORTANTE vs. GRADIENTE DE VELOCIDAD PARA VARIOS TIPOS DE FLUIDOS.

Figura No. 4

GRAFICA LINEAL DE ESFUERZO CORTANTE vs. GRADIENTE DE VELOCIDAD PARA VARIOS TIPOS DE FLUIDOS



Fluídos dilatantes .- El diagrama de esfuerzo cortante, Figura 4 muestra que la ecuación para los fluídos dilatantes es:

$$\tau_y g_c = - K \left(\frac{dv}{dx} \right)^n ; \quad n > 1 \quad (24) \quad y$$

$$\mu_a = - K \left(\frac{dv}{dx} \right)^{n-1} ; \quad n > 1 \quad (25)$$

asi, la viscosidad aparente aumenta con un incremento en el grado de esfuerzo. Las suspensiones de almidón, soluciones de silicato de potasio y soluciones de goma arábica son ejemplos de fluídos dilatantes.

Fluidos Pseudoplásticos.- Esta es probablemente la clase más grande de fluídos no-Newtonianos. El grado de esfuerzo del patrón de esfuerzos cortantes para los fluídos pseudoplásticos muestra que su ecuación es

$$\tau_y g_c = - K \left(\frac{dv}{dx} \right)^n ; \quad n < 1 \quad (26) \quad y$$

$$\mu_a = - K \left(\frac{dv}{dx} \right)^{n-1} ; \quad n < 1 \quad (27)$$

Se nota que la viscosidad aparente de los fluídos pseudoplásticos disminuye al aumentar el grado de esfuerzo. Ejemplos son soluciones de polimeros de alto numero, pulpa de papel, y mayonesa.

Fluídos Newtonianos.- En el diagrama de grado de esfuerzo, Figura 4, los fluídos Newtonianos se representan por una línea recta a través del origen. En este caso, la viscosidad aparente es igual a la viscosidad absoluta en todas partes de la curva. Los fluídos Newtonianos se pueden representar por la ecuación (24) donde $n=1$, al tiempo que $\mu_a = K$.

Flúidos no-Newtonianos dependientes del tiempo .- Este tipo de flúidos es muy común, y como puede esperarse, la variable adicional del tiempo complica el análisis. Un procedimiento de análisis es el llamado técnica de "loop" en donde la substancia es sometida a un aumento en el grado de esfuerzo y luego a una disminución, volviendo a un grado de esfuerzo de cero. Si no existe dependencia de tiempo, las dos curvas deberían ser coincidentes. Sin embargo, si la viscosidad aparente cambia con el tiempo, se obtienen dos curvas separadas.

Figura 5.

Flúidos Reopécticos .- Estos muestran un aumento en viscosidad aparente con el tiempo. La Figura 5-A es la curva de flujo para un flúido reopéctico y las flechas indican la trayectoria con el tiempo. Las suspensiones de bentonita y algunos soles son reopécticos.

Flúidos Tixotrópicos.- Lo opuesto de la reopepsia es la tixotropia. Los flúidos tixotrópicos muestran una disminución de viscosidad aparente con el tiempo de aplicación del esfuerzo. Los datos tomados en la manera descrita para los flúidos reopécticos, aparecen como un diagrama de "loop" pero la dirección de las flechas está invertida. El comportamiento tixotrópico se encuentra en la pintura, Catsup, mole poblano, etc.

Curvas de flujo para flúidos no-Newtonianos dependientes del tiempo.

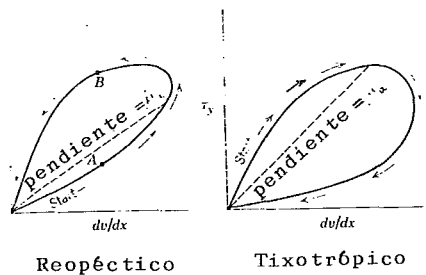


Figura 5

4. FLUJO EN FLUIDOS POLIFASICOS

Cuando dos o más fases se mueven simultáneamente en la misma dirección a través de un conducto tal como en transportadores neumáticos o en cierto tipo de evaporadores y condensadores, los mecanismos de flujo y la relación entre el potencial y el grado de flujo se vuelven más complejos. En general, la presencia de una segunda fase aumenta muchas veces la caída de presión de lo que sería si solo una fase fluyera con el mismo gasto en masa.

Debemos notar que no todas las mezclas de dos fases se comportan de la misma manera, como se ve en el caso de las suspensiones de sólidos en líquido, y muchas mezclas que fluyen como un material homogéneo. En este caso, el problema principal radica en la predicción de las propiedades físicas de dicha mezcla homogénea, para con estas, aplicar las ecuaciones normales de flujo de fluidos. Por otra parte, las mezclas líquido-vapor generalmente no se mueven como un todo sino que una fase se mueve relativa a la otra. La fase más densa tiende a moverse más lentamente y requiere de más tiempo para atravesar la misma longitud de tubería. Como con este tipo de mezclas no hay posibilidad de poder aplicar propiedades físicas para la mezcla y en consecuencia, tampoco las ecuaciones que hemos visto anteriormente, el uso de modelos empíricos es la única manera de encontrar las características de flujo. Estos mecanismos de flujo que se han observado, dependen del gasto absoluto y relativo de todas las fases presentes en la mezcla.

Por ejemplo, si a un flujo constante de líquido se le añaden proporciones relativamente pequeñas de gas, se forman pequeñas burbujas que quedan distribuidas en todo el fluido a medida que se difunden a través del líquido. Cuando se aumenta la proporción de gas, aumenta también -

el número y tamaño de las burbujas, tendiendo estas a juntarse y produciendo espacios alternados de líquido y gas puede moverse por la tubería como una columna continua, con el líquido rodeándolo como un anillo.

Aumentos posteriores en la relación de gas llevan ultimadamente a un punto en que el gas es la fase continua y el líquido está disperso en ella como niebla.

Se sabe que estas formas de flujo ocurren tanto en tuberías horizontales como verticales y además, en las horizontales puede ocurrir la estratificación, con la fase más ligera ocupando la parte superior del tubo y la más densa, el fondo. Se muestran algunos esquemas de las formas varias de flujo en la Figura No. 5 bis.

Las razones para la gran caída de presión del flujo de dos fases pueden entenderse viendo los mecanismos de flujo. La presencia de una segunda fase reduce el área transversal de flujo que hay disponible para el primer fluido, así que la velocidad y la resistencia al flujo del primer fluido aumentan, tal como si estuviera pasando por un tubo de menor diámetro. Ya que el área que queda rara vez es circular, este efecto es más pronunciado. Todavía, la interacción de las fases se debe considerar. Por ejemplo, la energía consumida al vencer la tensión superficial cuando se crea un área adicional de superficie, o el intercambio de momentum, o la turbulencia causada por el contacto entre dos fases que se mueven en proporción distinta, etc. todas son muestras de dicha interacción.

Considerando todas estas muchas incógnitas, se entiende que no haya solución teórica que defina la relación Flujo-potencial como hace la ley de Poiseuille o la de Fanning. El mayor hecho incompatible en estos casos es que la caída de presión - - - - -

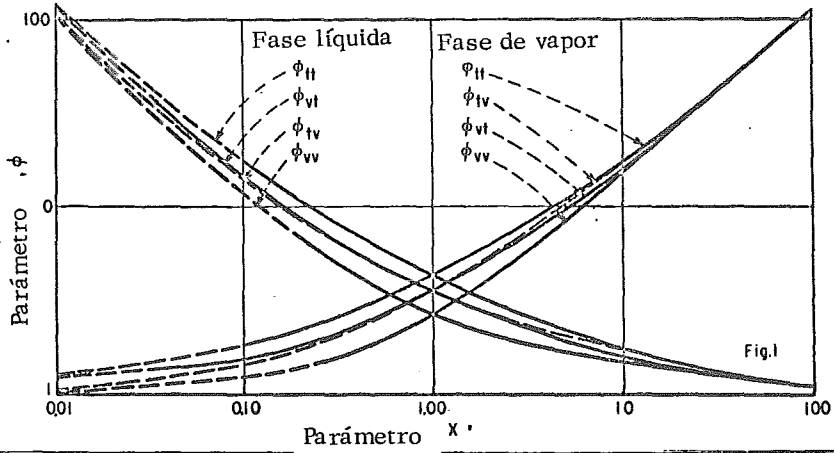
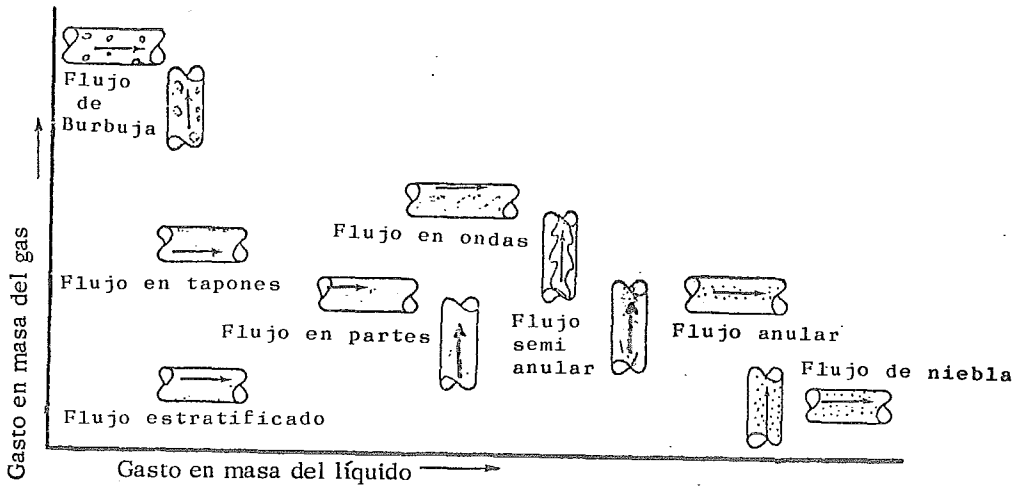


Figura No. 6

es prácticamente la misma para ambas fases. Debido a la diferencia en densidades de las diferentes fases, esto corresponde a consumos de energía muy diferentes. Mientras no se tenga ninguna relación empírica universal, cada tipo de sistema multifase como líquido-gas, líquido-líquido, sólido-líquido o sólido-gas se consideran , separadamente

Los métodos más prácticos se han encontrado para los sistemas líquido-gas, estos están basados en el trabajo de Lockhart y Martinelli. Como se muestra en la Figura 6, se correlacionan gráficamente los datos empíricos haciendo uso de dos relaciones adimensionales.

$$X = (\Delta P_L / \Delta P_G)^{0.5}$$

$$\bar{X} = (\Delta P_{FDF} / \Delta P_{Una\ fase})^{0.5}$$

Específicamente, la relación adimensional se define como $\bar{X}_G = (\Delta P_{FGF} / \Delta P_G)^{0.5}$ para la fase gaseosa y $\bar{X}_L = (\Delta P_{FDF} / \Delta P_L)^{0.5}$ para la fase líquida. ΔP_{FDF} es la caída de presión real que ocurre debido al flujo simultáneo de las dos fases y ΔP_G es la caída de presión que ocurriría si sólo la fase gaseosa estuviera fluyendo en el mismo gasto y en las mismas condiciones de presión y temperatura como lo hace en el flujo de dos fases. Para la fase líquida, ΔP_L se define similarmente que ΔP_G .

De acuerdo a esto, hay cuatro líneas en la Figura 6 para cada fase. La línea correcta a usar depende de la clasificación de flujo de las fases separadas. Por ejemplo, si las dos fases son viscosas calculamos X y leemos \bar{X}_{VV} de la Figura 6.

Se calcula X_{VV} de la relación:
$$X_{VV} = \left(\frac{w_L}{w_G}\right) \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.5} \quad (28)$$

Se determina luego la viscosidad de la fase usando la relación $4w/\pi D \mu = 1,000$ para flujo viscoso.

Alternativamente se usarían X_{tt} y I_{tt} si las dos fases fueran turbulentas cuando $4w/\pi D \mu = 2,000$. Se usa X_{vt} y \mathfrak{E}_{vt} si la fase líquida es viscosa y la gaseosa turbulenta, ó X_{tv} y \mathfrak{E}_{tv} si lo contrario es verdad.

Esta clasificación arbitraria y agrupación de los datos experimentales mejora la correlación sin embargo, hay observaciones individuales que se desvían de la mejor correlación estadística por tanto como 50% probablemente porque X se expresa como una relación que puede tener diferentes valores de \mathfrak{E} . Aunque los valores de X son los mismos, los de \mathfrak{E} dependen en los gastos reales y por lo tanto del patrón de flujo y grado de turbulencia.

Mientras la ecuación (28) describe el comportamiento de los fluidos como agua, aceite, alcohol, gases y vapores, no se apega al comportamiento de los polímeros, geles, lodos, y materiales similares. Todos estos materiales se desvían en una forma u otra de la relación arriba indicada. La interacción de las partículas de los fluidos responde del comportamiento de los fluidos no-newtonianos. Esta interacción que toma muchas formas es mecánica generalmente y resulta del tamaño y forma de las moléculas. Por ejemplo, el comportamiento de un plástico ideal se explicaría como el asentamiento y la compacta

interrelación de las moléculas que debe ser vencida por una fuerza. Una vez que se ha vencido esta interacción, la fuerza deja de ser un factor y el material se comporta como un fluido newtoniano.

El análisis de los datos publicados y el desarrollo de relaciones cuantitativas en este campo ha sido lento y solo recientemente los investigadores, Metzner han encontrado bases sólidas de correlación para algunos casos de fluidos no-newtonianos.

5.-Definición de los Materiales Difíciles de Bombeo

Habiendo tenido ya una vista general del tipo de fluidos con los que se encuentra el ingeniero químico en la industria podemos intentar definir ahora cuales son aquéllos materiales que se consideraran "difíciles de bombeo".

Por principio, todos los fluidos no-newtonianos y los fluidos polifásicos entran en la clasificación y a estos se añaden los fluidos viscosos que aunque puedan tener características newtonianas excedan en un valor de 2,000 c.p.

Los productos tales como las resinas, plastisoles, suspensiones, productos alimenticios, salsas, mayonesa, purés, aceites, líquidos en su punto de bullición, etc., todos son productos difíciles de bombear y caen dentro de una u otra de las clasificaciones anteriores, así como la mayoría de los lodos, suspensiones y coloides que se encuentran en los procesos químicos.

1.- Clasificación de las Bombas.

La gran variedad de equipos de bombeo hace difícil una clasificación precisa de cada bomba, sobre todo de algunos modelos nuevos que incorporan en su funcionamiento principios de máquinas de desplazamiento positivo y de acción recíproca, pero se estima que la clasificación más completa y más actualizada sea la que publica el Hydraulic Institute de los EUA y que se reproduce a continuación en la Figura 7.

Desde luego, el tipo de bomba más común con mucho, es la centrífuga, que se caracteriza por el aumento considerable de energía cinética que se da a los fluidos y que tiene tres diseños principales:

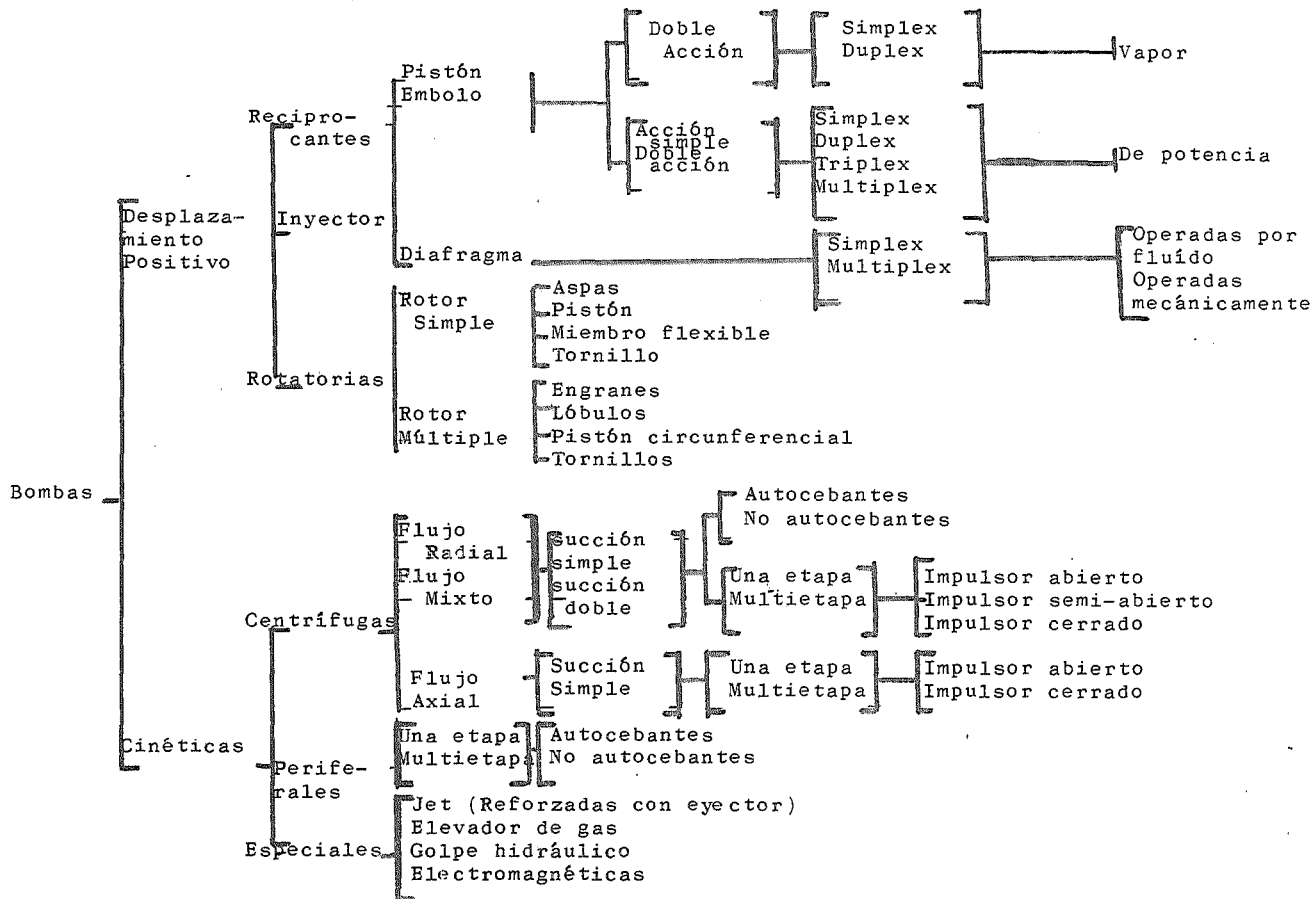
a) de flujo radial en el cuál la presión es desarrollada principalmente por la acción de la fuerza centrífuga. Las bombas de esta clase, con impulsores de una sola entrada, tiene generalmente una velocidad específica abajo de 4,200 rpm, y con impulsores de doble succión, una velocidad específica abajo de 6,000 rpm. En las bombas de esta clase, el líquido normalmente entra al impulsor por el centro de este y fluye radialmente hacia la periferia.

b) De flujo mixto - son las bombas en las que la cabeza se desarrolla en parte por fuerza centrífuga y en parte por la elevación que dan las aspas del impulsor al líquido. Este tipo de bomba tiene impulsor de una sola entrada con el flujo entrando axialmente y descargando en direcciones axial y radial. Las bombas de este tipo generalmente tienen una velocidad específica entre 4,200 y 9,000 rpm.

c) De flujo axial - Las bombas de este tipo, llamadas a veces bombas de propela desarrollan la mayor parte de su cabeza por la acción de elevación o propelante de las aspas del rotor sobre su líquido.

CLASIFICACION DE LAS BOMBAS

(Figura No 7)



Se tiene aquí un impulsor de una sola entrada con el flujo entrando axialmente y descargando casi axialmente. Las bombas de este tipo generalmente tiene una velocidad específica arriba de 9,000 rpm.

En todos estos tipos de máquinas la acción centrífuga del impulsor transmite al líquido manejado gran velocidad que al disminuirse en la descarga transforma la energía cinética en energía de presión. De acuerdo al diseño de la descarga se han usado diferentes tipos de carcazas buscando siempre que la transformación de energía cinética a energía de presión sea con el mínimo de pérdidas por fricción y con el máximo de eficiencia posible. De acuerdo a los diferentes tipos de carcaza son las clasificaciones de las bombas centrífugas de voluta, difusoras de volúmen, de turbina o regenerativas y de propela.

Describiremos ahora lo que se entiende como velocidad específica de una bomba centrífuga. La velocidad específica es una corelación de la capacidad de la bomba, cabeza, y velocidad en la eficiencia óptima y que hace clasificar a los impulsores con respecto a su similaridad geométrica. Generalmente se expresa así:

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (29) \quad \text{donde,}$$

N_s = Velocidad específica de la bomba

N = Velocidad angular en rpm. del impulsor

Q = Gasto en galones por minuto en la eficiencia óptima

H = Cabeza total en pies

La velocidad de un impulsor se define como las revoluciones por minuto a las cuales un impulsor geoméricamente similar correría si fuera de tal tamaño como para descargar un galón por minuto contra una cabeza de un pie.

La velocidad específica indica la forma y características de un impulsor, y se ha encontrado que las relaciones de las dimensiones principales varían uniformemente con la velocidad específica. La velocidad específica es útil para los diseñadores de estos equipos al predecir las proporciones requeridas y también para el Ing. Químico al verificar las limitaciones de succión de las bombas. El diseño y proporción de los impulsores se ha comparado contra los valores de velocidad específica y los resultados se han publicado ampliamente.

Las bombas rotatorias son máquinas de desplazamiento positivo que consisten de una cámara que contiene engranes, levas, tornillos, paletas, pistones o elementos similares actuados por rotación relativa de la flecha y la carcaza y que no tienen válvulas separadas de entrada y descarga. Estas bombas se caracterizan por sus tolerancias precisas entre las piezas en movimiento y la carcaza. Las bombas cubiertas en esta sección caen en dos clases generales, las de rotor sencillo y de rotor múltiple. Las relaciones entre los tipos y clases de bombas rotatorios se ilustran en la Figura 8.

Bombas de un solo Rotor.- Son aquéllas en las que los elementos rotatorios de bombeo operan alrededor de un solo eje.

Clases de Bombas Rotatorias

(Figura No.8)



Bombas de Rotor Múltiple .- Son aquéllas en las que los elementos rotatorios de bombeo operan alrededor de más de un eje.

Hay cuatro tipos básicos de bombas dentro de las dos clasificaciones anteriores y que son los siguientes:

a) De Paletas.- En este tipo, la paleta o paletas que pueden estar en forma de hojas, bloques, rodillos, etc. accionan con la carcasa para atraer el fluido y forzarlo a salir de la cámara de bombeo. Estas bombas, pueden hacerse con paletas en el rotor o en el estator y con las fuerzas hidráulicas radiales en el rotor balanceadas o desbalanceadas. Las bombas con rotor de paleta se ofrecen con elementos de bombeo de desplazamiento constante o variable. En la Figura 9-A se ilustra una bomba con rotor de paleta desbalanceada de desplazamiento constante. En la 9-B se muestra una bomba con paleta en el estator, desbalanceada con desplazamiento constante.

b) De Pistón .- En este tipo, el fluido es succionado y expulsado por pistones que se mueven dentro de cilindros siendo el movimiento de válvulas realizado por rotación de los pistones y de los cilindros con respecto a la succión y descarga. Los cilindros pueden estar colocados axial o radialmente y arreglados para bombeo de desplazamiento constante o variable. Todos los tipos están hechos con pistones múltiples excepto que el tipo radial de desplazamiento constante puede ser de un solo pistón. La Figura 9-C ilustra una bomba axial de pistón de desplazamiento constante.

Figura 9

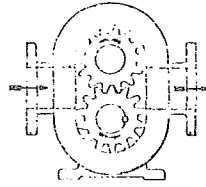
TIPOS DE BOMBAS ROTATORIAS



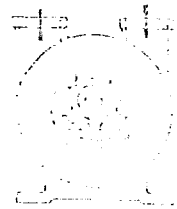
A



B



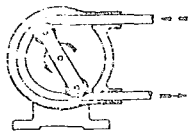
I



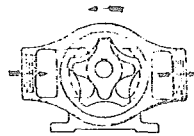
J



C



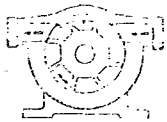
D



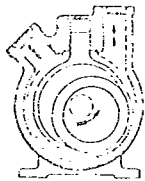
K



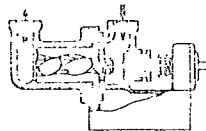
L



E



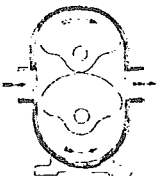
F



M



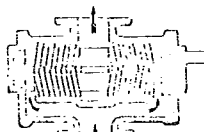
N



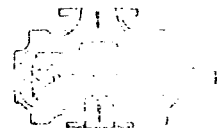
G



H



O



P

c) De Miembros Flexibles.- Aquí la acción de bombeo y de sellado de fluido depende de la elasticidad del miembro o miembros flexibles, que puede ser un tubo, una paleta o un forro. Estos tipos se ilustran en las Figuras 9-D, 9-E y 9-F respectivamente.

d) De lóbulos.- En este tipo de bombas el fluido es transportado entre la superficie de los lóbulos del rotor y la carcasa de la succión a la descarga. Las partes salientes del rotor al seguir el desarrollo de la carcasa proveen un sellado continuo. Los rotores deben ser puestos a tiempo respecto a cada uno y a la función en total. Cada rotor puede tener uno ó más lóbulos y ejemplos de esto se ven en las Figuras 9-G y 9-H.

e) De Engranés.- Aquí el fluido es transportado entre los dientes de los engranes y desplazado cuando estos se juntan. Igual aquí, las superficies de los rotores proveen un sello continuo y cada rotor puede mover al otro. Las bombas de engranes externos tienen todos los rotores de engranes dispuestos externamente uno respecto al otro. Estos pueden ser del tipo de engrane recto, helicoidal o de bolas y pueden tener también un juego extra de engranes para mantener el tiempo de la bomba.

Las bombas de engrane interno tienen un rotor con un engrane cuyos dientes están cortados internamente y que embonan con un engrane cortado exteriormente. Las bombas de esta clase se hacen con o sin partición en forma de creciente. La Figura 9-I ilustra una bomba de engranes rectos externos. Las Figuras 9-J y 9-K muestran bombas de engrane interno con y sin partición creciente.

f) De Pistón Circunferencial - En esta clase, el fluido se lleva de la succión a la descarga entre las superficies de un pistón. No hay contactos de sello entre las superficies de los rotores. En la bomba de pistón circunferencial externo, los rotores deben sincronizarse por un sistema independiente y cada rotor puede tener uno o más elementos de pistón. En la bomba de pistón circunferencial interna, no se requiere de sincronización y cada rotor debe tener dos ó más elementos de pistón. La Figura 9-L muestra un tipo de pistón externo múltiple.

g) De un Solo Tornillo .- En un tipo el fluido es llevado entre el rotor de tornillo y el estator en cavidades que dejan entre estas dos partes y que se mueven progresivamente hacia la descarga. El movimiento del rotor es excéntrico con respecto al eje de la bomba. Otro tipo de bomba de un solo tornillo tiene una rueda ranurada para sellar el tornillo de modo que no haya cavidad continua entre la succión y la descarga. En las Figuras 9-M y 9-N se ilustran estos dos tipos.

h) De Tornillo Múltiple.- En este tipo, el fluido es llevado entre las cuerdas de los rotores de tornillos y es desplazado axialmente cuando estas embonan. Estas bombas pueden estar o no sincronizadas. La Figura 9-O ilustra una bomba de tornillo sincronizada y la 9-P una bomba de tornillo no sincronizada.

Las bombas de desplazamiento recíprocante son también máquinas de desplazamiento positivo y se caracterizan por el movimiento alternativo del impulsor, un pistón dentro de una cámara ó cilindro.

En este tipo de bombas es necesario tener un sistema de Válvulas o compuertas para la entrada y salida del líquido de la cámara de bombeo, estando este sistema sincronizado al movimiento del pistón. Se clasifican en tres grandes grupos que son:

a) Bombas Dosificadoras o Proporcionadoras que se usan para desplazar exactamente un volúmen pre-determinado de fluido en un período de tiempo especificado y son impulsadas por algún medio de energía exterior aplicado al mecanismo de la bomba y que puede o no incluir la adaptación para cambiar el desplazamiento efectivo del émbolo. Este tipo se divide en dos clases generales de acuerdo a los componentes que desplazan el fluido y son las de émbolo empacado y las de diafragma. En esta segunda clase, el movimiento del diafragma se hace por actuación hidráulica o mecánica y se puede o no incluir un mecanismo para cambiar el volúmen del desplazamiento de la bomba.

b) Bombas de Potencia .- Son las bombas reciprocantes impulsadas por una fuente exterior de energía aplicada a la flecha o cigüeñal de la bomba. Se dividen en 6 tipos básicos que son los siguientes:

- Bomba simple, que es una reciprocante que tiene un pistón o su émbolo equivalente de acción simple o doble.
- Bomba duplex, es la que tiene dos pistones o sus émbolos equivalentes de acción simple o doble.
- Bomba triplex, lo mismo con tres pistones
- Bomba multiplex, es la que tiene más de tres pistones
- Bomba horizontal, es una bomba reciprocante que tiene su línea axial del cilindro ó cilindros en posición horizontal.
- Bomba Vertical, es una bomba reciprocante que tiene la línea axial del cilindro o cilindros en posición vertical.

c) Bombas de Vapor .- Son las bombas reciprocantes que tienen interconstruido un motor de vapor como una sola unidad. La energía para actuar la bomba se provee por un generador de vapor. Las bombas de vapor se clasifican en 9 tipos básicos como sigue:

- Bomba simple - es la que tiene un solo pistón ó émbolo equivalente.
- Bomba duplex - lo mismo con dos pistones.
- Bomba horizontal - si el eje de los cilindros es horizontal.
- Bomba vertical - si el eje de los cilindros es vertical.
- Bomba simple, del lado del vapor - es la que tiene uno o dos cilindros de alta presión de vapor.
- Compuesta o Tandem - si del lado del vapor se tiene un cilindro de alta y uno de baja presión arreglados en el mismo eje longitudinal o vertical.
- De cigüeñal y rueda - Es una bomba reciprocante con un cigüeñal en el que se ha montado una rueda de inercia para acumular energía durante la primera parte del tiempo del pistón e impartirla al pistón ó embolo del líquido durante la última parte del tiempo, después que el vapor ha sido cortado en el cilindro de vapor.
- Compuesta, cruzada - si del lado del vapor se tiene un cilindro de alta y otro de baja presión arreglados uno junto a otro con cigüeñales separados 90° .
- Bombas comunes de fabricación - son las bombas standard que vienen equipadas de fábrica, horizontales, de accionamiento directo, del tipo de válvula-placa, con pistón empacado con carrera de 12 pulgadas o menos.

2.- Selección Primaria de Bombas Para Flúidos Difíciles

Como en el caso de cualquier tipo de bomba, lo primero que hay que determinar al seleccionar una bomba especial es la capacidad y la cabeza en la aplicación en particular que se esté considerando.⁶

A continuación se debe encontrar información más precisa posible en respecto a la viscosidad del material a bombear, precisamente en las condiciones de la aplicación específica que se considere. El siguiente paso sería el de evaluar el grado de abrasividad de acuerdo a la concentración de sólidos y al tamaño de partícula de éstos. Cualquier intento de clasificar exactamente las características abrasivas de una sustancia es difícil. Los abrasivos pueden lucir parecidos sentirse parecidos y aparentar que tienen muchas propiedades similares, y sin embargo pueden tener efectos de desgaste completamente diferentes en las bombas. Una clasificación en forma general se puede efectuar teniendo en cuenta las características anteriores y sería por ejemplo:⁷

- a) Sin abrasión. Ejemplo: Agua clara
- b) Abrasión ligera. Ejemplo: Agua contaminada
- c) Abrasión media. Ejemplo: Lodos de arcilla, lechadas de cal o bentonita, etc.
- d) Abrasión pesada. Ejemplo: Lodos con alta concentración de sólidos duros, polvo de esmeril, silicatos cristalizados, etc.

Seguiría en la secuencia la consideración del contenido corrosivo del material. Se debe saber el valor del pH para seleccionar los materiales de construcción de la bomba de acuerdo a la acidéz o

Alcalinidad del producto.

Es muy importante también saber la temperatura a la que se va a trabajar el material a bombear pues en ocasiones las variaciones mínimas pueden resultar en la elección de una bomba demasiado cara o barata para la aplicación que se estudia.

3.- Bombas para líquidos muy Viscosos.

La viscosidad es una de las propiedades que requieren mayor consideración al planear un sistema de bombeo. Para fines de este trabajo, podemos considerar la viscosidad como una medida de la fricción interna de un líquido, que produce una resistencia a fluir dentro de una tubería, válvula, bomba, etc. Hay muchas unidades en las que se da comunmente el valor de la viscosidad de un material, siendo las más usuales en Ingeniería Química los centipoises, los segundos Saybolt universales (SSU), los centistokes y los grados Engler.

En general, podríamos poner aquí el rango de viscosidades en el que se usan comunmente los tres tipos principales de bombas, centrífugas, rotatorias y reciprocantes:

Centrífugas.....	Hasta	3,000 SSU
Reciprocantes.....	Hasta	5,000 SSU
Rotatorias.....	Hasta	2,000,000 SSU

La viscosidad de un líquido es el factor determinante de la cabeza de fricción, la potencia necesaria en el motor y la reducción de velocidad en un sistema de bombeo. Frecuentemente es más económico para líquidos de alta viscosidad el usar bombas de tamaño grande -

corriendo a velocidad reducidas ya que el alto costo inicial de la instalación queda más que amortizado por el mantenimiento reducido y el subsecuente larga vida del equipo. La figura 10 muestra el porcentaje de la velocidad teórica que se usa al bombear líquidos de diferentes viscosidades.

La cabeza máxima permisible de succión estática es igual a 14.7 psi. menos la cabeza de succión. Si la cabeza de fricción es alta, un aumento en el diámetro de la tubería de succión y en el tamaño de la entrada de la bomba reducirían la cabeza de fricción para per-mitir una mayor succión estática. En los líquidos de alta viscosidad la reducción en la velocidad de la bomba reduce también la cabeza de fricción permitiendo también mayor succión estática.

Bajo algunas condiciones, manejando líquidos de alta viscosidad puede ser mejor relocalizar la bomba para obtener una cabeza de presión en vez de la succión estática. De este modo se puede garantizar en la mayoría de los casos que el líquido llenará los espacios entre engranes, tornillos o cualquier otro tipo de elemento de bombeo que se use durante el tiempo que están frente a la succión de la bomba, resultando así en un mejor funcionamiento del equipo.

A través de muchos años de experiencia y más recientemente con pruebas efectuadas en laboratorios de las compañías fabricantes de bombas, se ha visto que en la gran mayoría de las aplicaciones de bombeo de líquidos viscosos el flujo es laminar, por lo que la ecuación de Poiseuille y las demás correlaciones para flujo laminar pueden usarse con gran apego a la realidad. La solución matemática de estos problemas de flujo, sin embargo, se basa mucho en el conocimiento de la

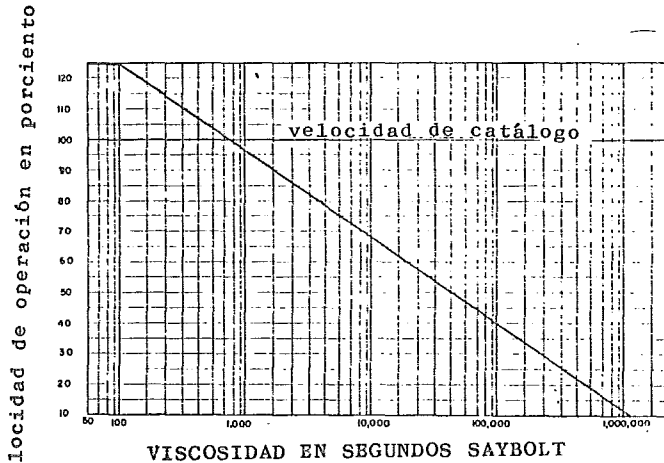
viscosidad y de la densidad del líquido a la temperatura que se considere y de la exactitud de estos datos dependerá directamente al resultado final. En caso de que el material que se considera sea difícil de encontrar en las tablas de viscosidades publicadas por los varios fabricantes y por las asociaciones especializadas, se deberá recurrir a un laboratorio de pruebas cuidando siempre que las determinaciones sean hechas a la temperatura más cercana posible a la que prevalece en las condiciones de trabajo.

Se han publicado tablas bastante extensas para pérdidas por fricción de fluidos viscosos en tuberías, siendo la más completa probablemente la del Hydraulic Institute en su última edición. Los datos de fricción basados en la fórmula:

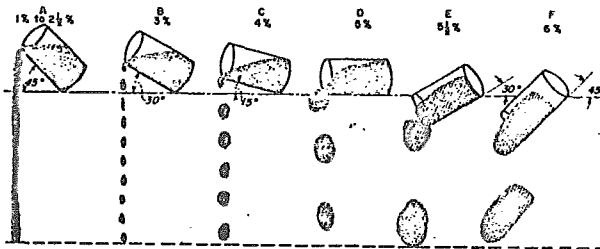
$$P = \frac{27.3 Q}{D^4} \quad (30)$$

Se pueden usar para calcular la viscosidad si se sabe la presión. Por ejemplo, si se desea determinar un tamaño adecuado de tubería que se va a tender en una longitud considerable, el costo sería bastante apreciable y es recomendable hacer una comparación entre una línea grande en diámetro y bajo costo de bombeo o una línea más pequeña y un costo operacional mayor; sabiendo la cabeza de presión estática que se va a tener, convertida ésta en psi con la densidad, se puede deducir este valor de la presión que desarrolla la bomba, se tiene la pérdida de presión debida a la tubería y este valor se puede sustituir directamente en la ecuación (30) para hallar la viscosidad.

DISMINUCION PORCENTUAL DE LA VELOCIDAD DE OPERACION DE BOMBAS ROTATORIAS POR EFECTOS DE LA VISCOSIDAD.



AUMENTO DE LA VISCOSIDAD DE SUSPENSIONES DE PULPA DE PAPEL POR EFECTO DE LA CONCENTRACION.



Características de flujo de suspensiones de pulpa de diferentes concentraciones.

Normalmente, el tipo de bombas que se usa más al manejar fluidos viscosos es el de las rotatorias. Las ventajas son múltiples trabajando sobretodo con fluidos lubricantes como aceites, grasas, etc., pues se puede variar la capacidad y la presión casi a voluntad de acuerdo a las demandas del proceso donde se tenga instalado el equipo. Hay múltiples diseños de bombas rotatorias siendo cada una mejor para cierto tipo de fluidos en general, los tipos de engranes rectos y helicoidales se usan para materiales lubricantes, los de engranes modificados para materiales pegajosos no-lubricantes, de un solo tornillo para obtener mejor dosificación del flujo, etc.

Las bombas rotatorias dan una capacidad casi constante contra presiones de descarga variables, así que la curva de gasto contra cabeza es casi una línea horizontal. El desplazamiento varía directamente con la velocidad y se presenta también como en el caso de las bombas centrífugas la cavitación o sea, que debido a la viscosidad en esta ocasión, el líquido no alcanza a llegar a los elementos de bombeo con la suficiente rapidéz y se producen espacios vacíos que ocasionan el ruido de martilleo común en la cavitación.

La pérdida en capacidad debida al escurrimiento del fluido entre los espacios dejados entre la carcaza y los elementos de bombeo, aumenta a medida que aumenta la presión de descarga. En el caso de líquidos viscosos, ésta pérdida disminuye al aumentar la viscosidad.⁹

La alimentación de potencia a una bomba rotatoria aumenta con la viscosidad del líquido y la eficiencia disminuye con la viscosidad.

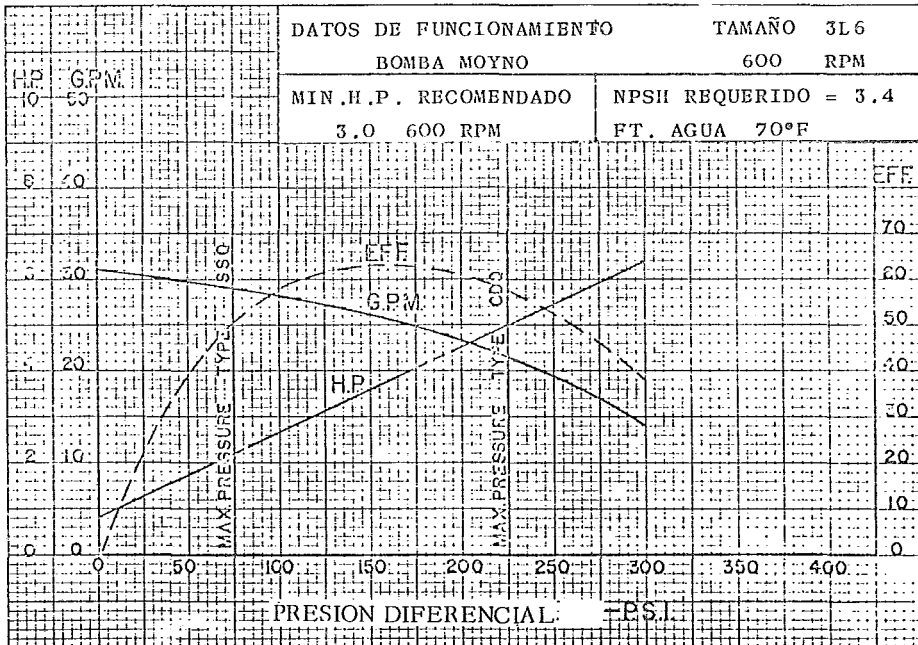
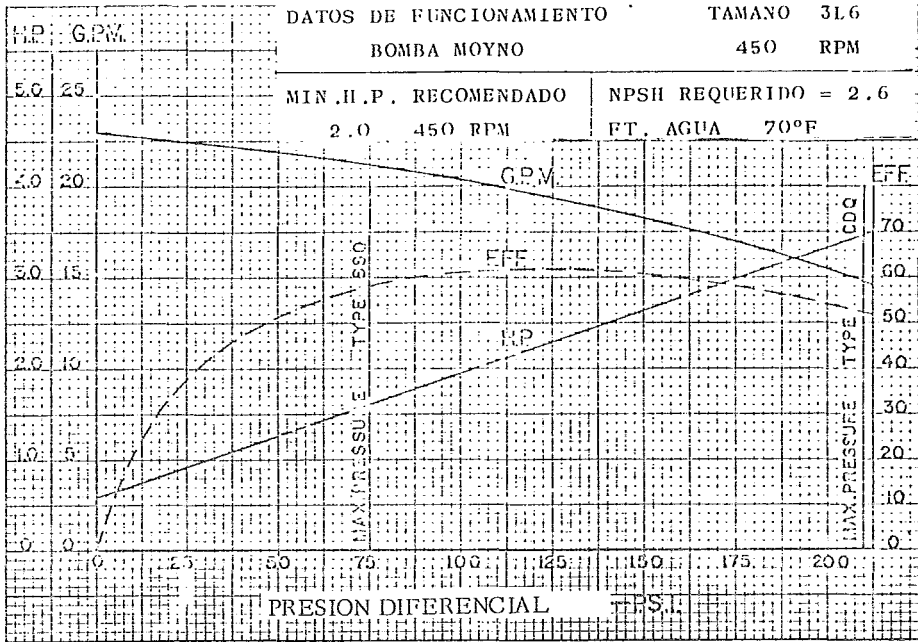


Figura No. 11

Esto también es válido, desde luego, para otros tipos de bomba pero como hemos dicho que las rotatorias son las más usadas con líquidos viscosos, nos referimos así en particular. En la Figura 11 se ilustra una curva característica de gasto contra cabeza, potencia contra presión y eficiencia.

La mayoría de los fabricantes proporcionan en sus catálogos tablas de selección en donde se aprecia el efecto de la viscosidad en la capacidad de los equipos junto con características de materiales de construcción y eficiencias que permiten hacer la mejor selección del equipo.

Como guía general podríamos decir que al trabajar con materiales viscosos, la velocidad se reduce entre 25 y 35% del valor teórico por cada aumento de diez veces en la viscosidad arriba de 1,000 SSU. Generalmente también, la eficiencia mecánica de la bomba disminuye en un 10% por cada diez veces de aumento en viscosidad arriba de 1,000 SSU, considerándose como buena una eficiencia máxima de 55% en este punto.

4.- Bombas Para Líquidos con Sólidos en Suspensión -

Posiblemente las aplicaciones más difíciles en bombeo se encuentran al tratar con sólidos en suspensión. Estos materiales pueden contener desechos de drenaje, pulpa de papel, tierra, grava, materiales comestibles, etc. Gracias al número tan grande de diseños de bombas para sólidos que se ofrecen hoy en día, es posible resolver la mayoría de las aplicaciones de bombeo de sólidos en suspensión.

Además de la velocidad de flujo de un material en una tubería, nos encontramos en este caso con un nuevo tipo de velocidad que es la velocidad de asentamiento de los sólidos suspendidos en el líquido, y que debe tenerse muy en cuenta para evitar que los sólidos se depositen en el fondo de la tubería. Al seleccionar la velocidad en las tuberías de succión y descarga de la bomba se debe poner atención en que el flujo sea tal que los sólidos viajen en el centro o cerca del centro de la tubería. Con esta condición de flujo la fricción se mantiene a un mínimo, protegiéndose también el mismo sólido y evitando que se desgasten las paredes interiores del tubo. La velocidad más económica es la que dá el flujo más bajo donde las tres condiciones anteriores prevalecen. En general, las bombas rotatorias y reciprocantes son adecuadas para manejar líquidos con alto grado de abrasividad y altas concentraciones de sólidos, mientras que las bombas centrífugas pueden manejar eficientemente materiales abrasivos siempre que la concentración no aumente la viscosidad del material a más de 500 centipoises.⁵

Es difícil describir la fluidéz de una mezcla de un sólido y un líquido, pero siempre es muy útil el hacer referencia a algún material conocido de viscosidad parecida para tener una mejor idea de sus características de flujo. En el caso de pulpa de papel, por ejemplo, la concentración hace variar radicalmente la fluidéz de la mezcla. Esto ha sido ampliamente estudiado y se ha hecho una prueba muy objetiva en la que se llenan 6 vasos con suspensión de pulpa de papel con concentraciones variables entre 1 y 6% y observando el ángulo al que hay que inclinar el vaso para que la mezcla fluya. Una ilustración de esta experiencia se muestra en la Figura 12.

Una consideración muy importante al bombear sólidos en suspensión, es la de proveer una buena cabeza de succión y tuberías adecuadas de modo que el material pueda llegar fácilmente a la succión de la bomba. Una vez en contacto con los elementos de bombeo, cualquier tipo de bomba centrífuga, reciprocante o rotatoria puede llevarlo hasta la descarga sin problemas. Si se tiene buen flujo de succión a la bomba, el resto del problema ya no es difícil. La cabeza de descarga se calcula de la manera usual usando la viscosidad estimada para la mezcla.

Al hacer una mezcla, la viscosidad final generalmente es distinta de la del líquido solo y obviamente de la del sólido. La velocidad de la bomba seleccionada debe estar como regla general, entre la velocidad recomendada para el fluido suspensor con su viscosidad y la recomendada a la viscosidad de la mezcla. Por ejemplo, un lodo de sólidos en agua tiene una viscosidad aparente de 3,000 centipoises. Ya que el agua tiene una viscosidad de un centipoise, la velocidad que se recomendaría sería entre la máxima para un centipoise y la máxima para 3,000 centipoises.

Si la consistencia del material permite seleccionar una bomba centrífuga para el manejo de una suspensión, se deben corregir los valores tabulados de capacidad de la bomba, y para esto hay tablas de corrección publicadas por las asociaciones profesionales y por los mismos fabricantes. En el caso de bombas rotatorias y reciprocantes no hay necesidad de hacer ninguna corrección sobre los datos dados por el fabricante.

Otra consideración especial al bombear suspensiones es la referente a lubricación del empaque de la bomba. Normalmente, el líquido que se maneja fluye a través del empaque en pequeñas cantidades para lubricar y disipar el calor generado, pero si algún sólido llega a pasar al empaque lo destruiría, de modo que se requiere de sello rotatorio o bien de un líquido exterior, si la presión interna de la bomba que actúa contra el interior del empaque es negativa. Se recomienda hacer el sello con agua limpia de otra sección del proceso - siendo la presión en estas líneas de agua de sello por lo menos de 10 psi sobre la presión que actúa en el empaque, a modo de evitar-- cualquier entrada de sólidos a la sección de empaque.

Las bombas para manejo de suspensiones deben ser especialmente robustas para resistir el efecto de "lija" que hace el material al pasar por el equipo. Deben ser también fáciles de desarmar para darles - mantenimiento o inspeccionarlas. Dentro de las bombas reciprocantes conviene mencionar el caso especial de las bombas en diafragma que son particularmente adecuadas para transportar suspensiones de sólidos finos a presiones bajas (50 psi, aunque hay diseños que dan hasta 1000 psi) y gastos moderados . Ya que el diafragma está construido - generalmente de hule o de algún otro material similar, su resistencia a la abrasividad es excepcional, pero generalmente su punto débil son las válvulas que tienden a atascarse si no se les inspecciona - continuamente.

La eficiencia mayor en bombeo de suspensiones se obtiene sin duda-- en las bombas de pistón. Igual que en las bombas de diafragma, se - pueden usar cuando el volumen no es muy grande y el tamaño de las - partículas sólidas no excede de 0.5 mm. Vale la pena mencionar, sin embargo, que aunque el volumen de la mezcla que se maneja sea bajo,

la cantidad de sólidos puede ser muy alta debido a las altas concentraciones que se usan en los lodos y extractos, por ejemplo, 30 ton/hr. de sólidos en 40 mts.³/hr. de mezcla es normal para los equipos usados en las minas.

Los materiales de construcción para estas aplicaciones deben ser también especiales a fin de poder resistir el desgaste que en ocasiones podría dejar inservible una bomba común en pocas horas. Los materiales más comunes para los impulsores y carcazas son los aceros especiales, fierro fundido de alta dureza del tipo Ni-Hard y hule o teflón. Los aceros especiales se pueden usar para manejar materiales moderadamente abrasivos tales como fosfatos, lechadas o lodo de perforación. Aunque son bastante caros, se pueden maquinar y machuelear así que no hay mucho problema al fabricar las bombas¹.

El Ni-Hard es un fierro-níquel fundido extremadamente duro con un número Brinell entre 550 y 650. De todos los metales ferrosos, esta aleación es la mejor desde el punto de vista de resistencia a la abrasión y el material en sí no es caro, pero los costos de maquinado son muy altos pues solo se puede formar con esmeril. Esto significa que no se pueden ni taladrar ni machuelear y las bombas de este material requieren entonces de diseños muy especiales. Podríamos decir, como regla general, que las bombas con partes desgastables metálicas tienen un funcionamiento razonablemente bueno y tienen los mismos rangos de succión de las bombas que manejan líquidos claros.

Las bombas con recubrimiento de hule, plásticos o teflón han tenido un impulso considerable en los últimos años. Con sólidos finos su resistencia al desgaste se ha visto que es muy superior a la de las mejores bombas metálicas aunque para materiales granulados no se recomiendan en general, para partículas arriba de unos 3 o 4 mm. Una excepción notable es la de las bombas del tipo Woyno que son capaces de trabajar eficientemente partículas hasta de 25 mm.

5.- Bombas Para Líquidos con Gases -

Observando en una planta petroquímica la frecuente incidencia de casos en los que las bombas manejan líquidos con un porcentaje mas o menos importante de gases, puede uno darse cuenta de lo importante que es la selección adecuada de las bombas para este tipo de aplicaciones. Los aceites lubricantes, por ejemplo, a presión atmosférica y temperatura ambiente pueden tener hasta 10% en volumen de aire disuelto. La gasolina, en condiciones similares, puede tener facilmente 20%. Cuando la presión de succión de la bomba es inferior a la atmosférica, el gas encerrado o disuelto en el líquido se expande tomando parte del volumen de desplazamiento de la bomba y reduciendo la capacidad del líquido. Hay muchas instalaciones, sin embargo, donde la naturaleza del proceso requiere que el sistema opere a una presión baja. Cuando se tienen presiones entre 0 psia. y 7.5 psia., se debe dar especial atención a la selección de la bomba y sus características de operación para obtener una instalación satisfactoria. En las Figuras 13 y 14 se muestran unas gráficas indicativas del efecto del gas disuelto al manejar un líquido en una bomba del tipo rotatorio¹⁰. Es conveniente el uso de estas curvas al diseñar un sistema de bombeo para líquidos con gases, pues son bastante indicativas de los efectos en la

EFFECTO DEL GAS ENCERRADO EN EL LIQUIDO
EN EL DESPLAZAMIENTO DE BOMBAS ROTATORIAS

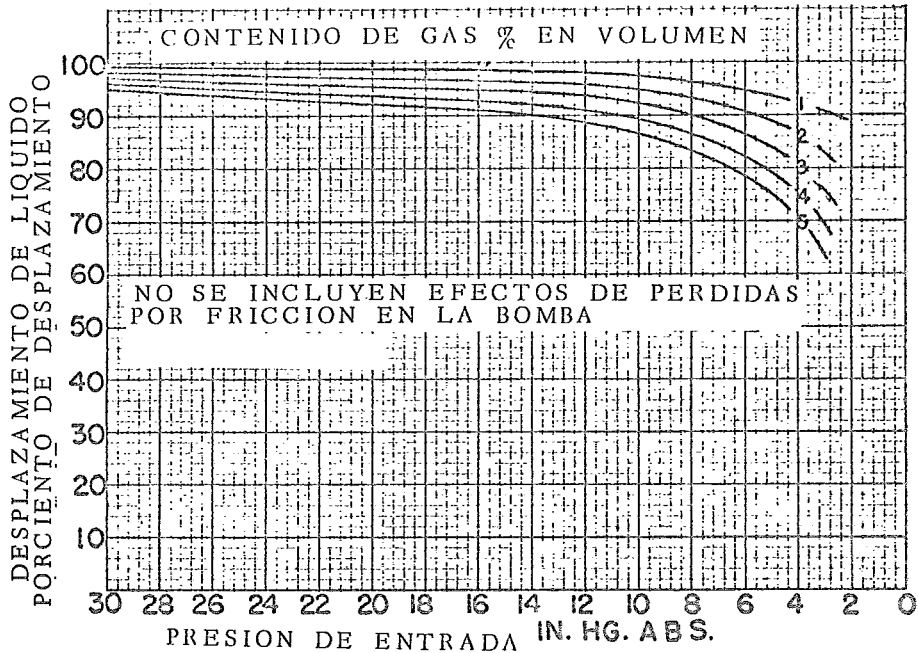


Figura No. 13

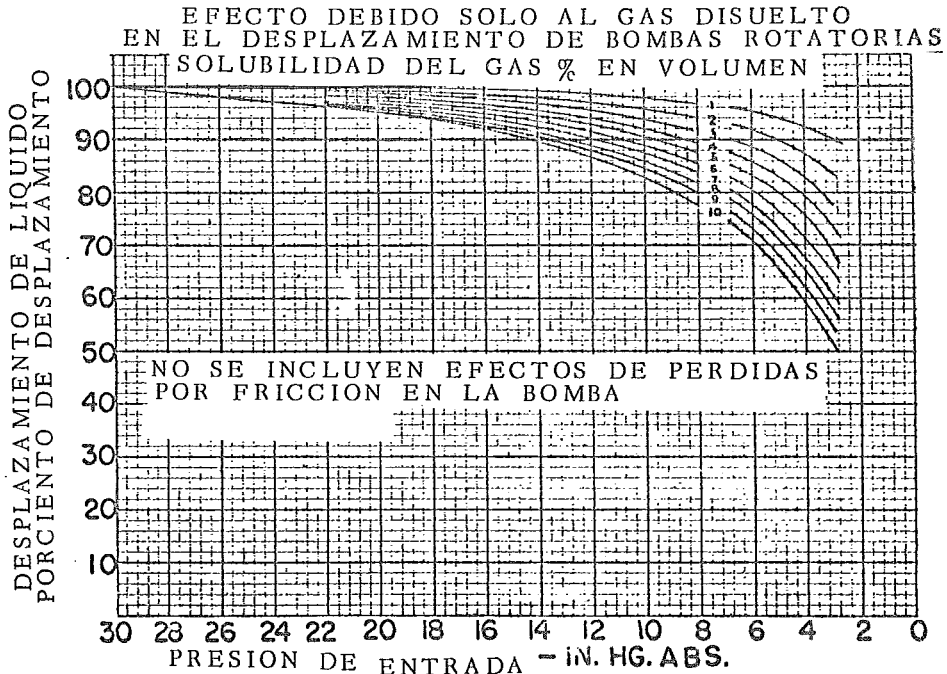


Figura No. 14

mayoría de bombas rotatorias que son, por otra parte, las de mayor uso en estas aplicaciones. Se ve principalmente, que si se puede tener una succión ahogada la mayoría de los trabajos difíciles se facilitan. Si la presión parcial en la línea de succión se puede mantener dentro de límites tales que tengamos una presión absoluta entre 7.5 y 10 psia, ó como se muestra en las curvas, de 15 a 20 pulgadas Hg. en la succión de la bomba, todos los problemas desaparecen.

A veces no es fácil darse cuenta de la existencia de gases encerrados o disueltos. El aire es prácticamente soluble, en todos los líquidos. El agua a 18° C disuelve 3% de su volúmen de aire. Si hay CO₂ presente, disuelve el 6%. Las melazas casi siempre están llenas de burbujas de CO₂ encerradas por películas de melaza. La masa completa se expande bajo presión reducida como se demostró en una prueba de laboratorios cuando un ft³ de melaza se expandió a 1.25 cuando la presión fue reducida a 7.5 psia. El aire llevado por un líquido es causado generalmente por fugas en la línea de succión o por empaques de válvulas o juntas que no estén bien colocados. Como se muestra en la Figura 15, si se suma el total de tales fugas, la capacidad de la bomba se puede ver seriamente afectada. Cada pie cúbico desplaza 7.5 galones de capacidad de líquido disponible y desafortunadamente la ley de Boyle funciona exactamente igual en una bomba de líquido que en un sistema de vacío.

En la figura 16 se reproducen datos del efecto del gas encerrado o disuelto en un líquido al ser éste manejado en una bomba rotatoria con presión de succión inferior a la atmosférica.

FUGAS DE AIRE AL LIQUIDO EN JUNTAS DE TUBERIA

(Figura No. 15)

Tipo de juntas	Promedio estimado fugas de aire lb/hr	3 ft ³ /min a presión atmosférica y 70°F
Conexiones roscadas en tamaños hasta de 2"	0.1	0.021
Conexiones roscadas en tamaños mayores de 2"	0.2	0.043
Conexiones bridadas hasta 6"	0.5	0.117
Conexiones bridadas 6"- 24" incluyendo agujeros de hombre	0.8	0.172
Conexiones bridadas 24"- 6'	1.1	0.236
Conexiones bridadas arriba de 6'	2.0	0.430
Válvulas empacadas con vástago de hasta ½" de diámetro	0.5	0.117
Válvulas empacadas con vástago de diámetro mayor de ½"	1.0	0.214
Válvulas de macho lubricadas	0.1	0.021
Válvulas de purga	0.2	0.043
Mirillas	1.0	0.214
Vidrios de nivel, incluyendo llaves de nivel	2.0	0.430
Prensaestopas de sello líquido para flecha de bombas, agitadores, etc. por cada pulgada de diámetro	0.3	0.064
Prensaestopas ordinario por cada pulgada de diámetro	1.5	0.321
Válvulas de seguridad y rompedoras de vacío, por pulgada de tamaño nominal	1.0	0.214

(Figura No.16)

EFECTO DE GASES DISUELTOS Y SU SOLUBILIDAD EN EL DESPLAZAMIENTO
DE BOMBAS ROTATORIAS

Vacío en la succión de la bomba mm Hg.	Gas disuelto					Solubilidad del gas					Gas disuelto y solubilidad combinados				
	1%	2%	3%	4%	5%	2%	4%	6%	8%	10%	1% 2%	2% 4%	3% 6%	4% 8%	5% 10%
5	99	97.5	96.5	95	93.5	99.5	99	98.5	97	97.5	98.5	96.5	96	92	91
10	98.5	97.25	95.5	94	92	99	97.5	97	95	95	97.5	95	93	90	88.2
15	98	96.5	94.5	92.5	90.5	97	96	94	92	90.5	96	93	89.5	86.5	83.2
20	97.5	94.5	92	89	86.5	96	92	89	86	83	94	88	83	78	74
25	94	89	84	79	75.5	90	83	76.5	71	66	85.5	75.5	68	61	55

Por ejemplo: con 5% de gas disuelto a 15 pulgadas de Hg de vacío, el desplazamiento de líquido será 90.5% del desplazamiento normal de la bomba, despreciando el escurrimiento, o con 10% de gas soluble, el desplazamiento de líquido será 90.5% del desplazamiento de la bomba y con 5% de gas disuelto combinado con 10% de solubilidad de gas, el desplazamiento de líquido será 83.2% del desplazamiento normal de la bomba.

La capacidad de manejo de líquido de una bomba rotatoria se reduce teóricamente por lo menos en proporción directa a la cantidad de aire o gas presente en la succión de la bomba. La reducción real es aún mayor dependiendo del volumen de desplazamiento de cada bomba en especial y de la reducción de presión dentro de la bomba. Todos estos datos se conforman más o menos a la expresión siguiente:¹

$$d = \frac{d'(1-E_n)}{(1-E_n) + E_n (P/P_1)} \text{ ft}^3/\text{min.} \quad (31)$$

Donde, d = desplazamiento de líquido

d' = desplazamiento teórico

E_n = fracción en volumen de gas disuelto en el líquido

P = presión atmosférica

P₁ = presión absoluta de succión de la bomba

6.- Bombas para fluidos en tres fases -

Esta sección es prácticamente una combinación de las dos anteriores, siendo la selección de la bomba afectada tanto por la reducción en desplazamiento debida a los gases disueltos y por la limitación en la velocidad a causa del contenido y la naturaleza de los sólidos, según se explicó anteriormente.

De nuevo, las bombas rotatorias son las más adecuadas para este caso donde las tres fases están presentes, resultando las bombas centrífugas prácticamente inútiles y las reciprocantes, de muy baja eficiencia.

CAPITULO III

1.- Tubería y Accesorios para Bombeo de Líquidos Dificiles -

Desde hace muchos años se ha venido usando el transporte de sólidos a través de tuberías tanto en la Industria Química como en minería y en la construcción civil obteniéndose la gran ventaja de llevar grandes tonelajes de materiales suspendidos en agua a través de grandes longitudes y alturas considerables. Las principales ventajas son la simplicidad de instalación y pequeños requerimientos de espacio, la facilidad que ofrecen para cruzar obstáculos naturales artificiales como ríos, caminos, etc. y la simplicidad de operación dado que todo el equipo mecánico que requiere supervisión y mantenimiento se puede localizar en las estaciones de bombeo.

La mayor parte de la discusión en este capítulo se va a referir a las tuberías que llevan suspensiones con y sin contenido corrosivo, pues los fluidos viscosos o con gas disuelto no presenta ningún problema especial excepto por la resistencia que ofrecen al flujo y que ya se ha explicado como tomar en consideración al seleccionar las bombas adecuadas para su manejo.

En cuanto a accesorios de tubería, si es de importancia el tomar en cuenta la viscosidad de los materiales, pues un valor de caída de presión por fricción que sería igual para un codo de 90° standard y uno soldable de radio largo tratandose de agua, diferiría significativamente si se está considerando una melaza o pasta de dientes. Los manómetros y termómetros tienen que colocarse también de una forma especial para que las lecturas que se obtienen sean correctas

e indicativas de las condiciones del sistema. Los manómetros, por ejemplo, dan lecturas equivocadas en líneas de materiales viscosos o con sólidos de suspensión porque las líneas pequeñas de diámetro se tapan con facilidad. Esta dificultad se puede resolver instalando una extensión de tubería de 2 o 3 pulgadas. Se pone un tapón apretado firmemente en el extremo asegurándose que no haya entradas de aire y se instala el medidor en el tapón, pudiéndose usar para seguridad adicional unas cuantas vueltas de tubo de cobre llenas de kerosina o aceite lubricante ligero entre el tapón y el manómetro. La extensión hace el efecto de un domo de aire y se obtienen lecturas exactas de presión sin dañar el manómetro. Como la mayoría de los líquidos viscosos se manejan a alta presión, el grosor de la pared de la tubería, las juntas y conexiones deben ser de las características adecuadas para resistir esta alta presión.

La lista de aplicaciones para transporte de materiales sólidos en tuberías crece cada día, siendo las más importantes las relacionadas con las plantas químicas, industria en general y minería. Hay dos problemas básicos al diseñar un sistema de transporte de sólidos en suspensión a través de una tubería: a) Aquellos problemas concernientes al transporte general hidráulico y cuyas soluciones se necesitan para determinar el diámetro de la tubería la velocidad más adecuada, la mejor concentración de sólidos, las pérdidas por fricción y los requerimientos de potencia. b) Los problemas de diseño incluyendo cosas tales como la alimentación de los materiales en la tubería y minimizar la abrasión y corrosión de las mismas.

Se coincide al estudiar el transporte de sólidos en una tubería que es proceso es muy complejo. Vamos a tratar de dar los puntos principales de este problema haciendo especial referencia a las diferencias que existen desde el punto de vista hidráulico entre las varias categorías de sólidos.

Cuando los sólidos se mezclan con el agua u otro fluido que los transporte se forman tipos diferentes de mezclas de acuerdo a la concentración y a las propiedades físicas de los materiales de que se trate.¹¹ Se encuentran dos tipos generales de mezclas, el primero llamado homogéneo y que es el que contiene materiales muy finos, hasta unas 50 micras, y el segundo es el heterogéneo que tiene materiales más gruesos. Esta clasificación nos permite describir las diferentes condiciones de transporte encontradas en los dos casos, aunque el problema se vuelve generalmente más complicado cuando la mezcla tiene propiedades intermedias entre las de las homogéneas y heterogéneas, como veremos más adelante.

En las mezclas homogéneas, las partículas alteran la viscosidad del líquido de transporte o transportador. Los sólidos encontrados en estas mezclas incluyen lodos, arcillas, polvos, y productos similares que forman lodillos o lechadas de alta concentración. La distribución de las partículas sólidas en el medio líquido se homogeniza, ya sea por el movimiento Browniano para las partículas de tamaño coloidal, o por una pequeña turbulencia en el caso de aquellas partículas más gruesas que de otro modo se asentarían con el tiempo.

Las mezclas homogéneas tienen ciertas propiedades plásticas. Cuando están cerca de un estado de reposo, se comportan como un sólido sin que las partículas se asienten y se debe alcanzar un mínimo esfuerzo cortante interno antes de que ocurra flujo alguno. El flujo empieza con una viscosidad aparente que varía con la velocidad mientras se mantiene el flujo laminar. Si se tiene flujo turbulento este tipo de mezclas se comportan como fluidos newtonianos. Si en lugar de ser finos los sólidos, las partículas son gruesas, 50 micras o más, el transporte solamente se puede llevar a cabo en condiciones de flujo turbulento, pues de otro modo un proceso de sedimentación se lleva a cabo más o menos lentamente produciendo depósitos de sólido en el fondo del tubo hasta que el área de paso es tan pequeña que se establece por fuerza el flujo turbulento o la tubería se tapa.

En las mezclas heterogéneas se tiene un sistema de dos fases en la que el fluido transportante retiene su individualidad y viscosidad o sea, que el fluido y las partículas de sólido se comportan como dos sistemas independientes.

Las partículas se mueven con el flujo en dos formas distintas:

- a) En suspensión, si las partículas son pequeñas y la velocidad alta.
- b) Por saltación, o sea moviéndose en una serie de pequeños brin-
cos intermitentes, si las partículas son grandes o la velocidad es baja.

2.- Consideraciones de Diseño y Materiales para las Tuberías

El diseño de las tuberías para transporte de sólidos toma en consideración tres categorías principales de suspensiones que son las siguientes:

- a) Los materiales finos que se asientan de acuerdo a la ley de Stokes, o sea, $W = kd^2$, donde W es la velocidad de asentamiento, d el diámetro medio de partícula y k una constante. Para arenas finas que tienen un valor de S.Gr. de alrededor de 2.65, el límite superior de esta categoría es aproximadamente 0.2 mm. En la práctica, estos materiales se transportan siempre en suspensión.
- b) En esta categoría de transición en la que los sólidos se asientan de acuerdo a leyes de transición entre la de Stokes y la de Rittinger, se incluyen tamaños de partícula desde 0.2 a 2 mm. a una S.Gr. de 2.65. Aquí se incluyen la mayoría de las arenas naturales comunes. Estos materiales se transportan en suspensión o por saltación de acuerdo a la velocidad del flujo.
- c) Los materiales que se asientan de acuerdo a la ley de Rittinger $W = kd^{1/2}$. A una S.Gr. 2.65 es su tamaño de partícula cualquiera arriba de 2 mm. Estas se transportan unicamente por saltación.

En cualquiera de estas tres categorías se pueden presentar dos regímenes de flujo. El primero que es una condición de flujo forzado donde ninguna partícula queda estacionaria en la tubería y todas se mueven con el flujo con un cierto atraso dependiendo de su tamaño. En el segundo régimen se tiene depósito que corresponde a una condición de equilibrio entre el flujo del líquido y los sólidos. El flujo del volumen líquido y la velocidad media

son lo suficientemente bajos como para que haya asentamiento. Los sólidos se acumulan en el fondo del tubo hasta que la velocidad media por el espacio libre de flujo alcanza un valor límite que se llama la "velocidad de depósito crítica".

Esta última condición de transporte puede ser inestable si el diseño de la estación de bombeo no está bien adecuado a la aplicación en particular. Es muy importante conocer la "velocidad de depósito crítico" que determine la transición de un régimen a otro, ya que ésta corresponde a la condición de operación económica que determina el tipo y tamaño de tubería que se necesite.

Velocidad de asentamiento y coeficiente de arrastre. Estos son dos parámetros esenciales en el transporte de mezclas heterogéneas. Cuando una partícula cae a través de un líquido en reposo, su velocidad máxima de asentamiento se alcanza cuando el peso aparente de la partícula es igual a la resistencia que se opone a su movimiento, llamada "arrastre" (drag). La ecuación para la condición de fuerza equilibrada es:

$$V (\rho' - \rho) g = C_x \rho S W^2 / 2 \quad (32)$$

donde V = volumen de partícula; ρ = S.Gr. del agua o fluido; ρ' = S.Gr. del material; g = aceleración de la gravedad; S = área proyectada de la partícula en un plano perpendicular al movimiento; W = velocidad de asentamiento; C_x = coeficiente de "arrastre", que es un parámetro adimensional dependiendo del número de Reynolds asociado al movimiento de las partículas.

Para una partícula esférica con un diámetro D , la ecuación de -

arriba, se convierte en:

$$(\pi D^3 / 6) (\rho' - \rho) g = (C_x \rho) (\pi D^2 / 4) (W^2 / 2) \quad (33)$$

$$\frac{4}{3} \times \frac{\rho' - \rho}{\rho} = \frac{C_x W^2}{g D} \quad (34)$$

Si el número de Reynolds es menor de 1 : $C_x = 24 / N_{Re}$ (35)

donde $N_{Re} = WD/\nu$, donde ν = viscosidad cinemática. Esta es la ley de Stokes que hemos ya mencionado y que cubre la condición de flujo laminar donde la viscosidad del fluido es un factor importante: $W = KD^2 (\rho' - \rho) /$ (36)

los materiales que hemos puesto en la primera categoría siguen ésta ley .

Sin embargo, si el número de Reynolds excede de 1,000 , el coeficiente de arrastre C_x se vuelve constante y entramos al campo del arrastre turbulento donde la viscosidad no tiene efecto alguno.

Bajo estas condiciones, se tiene:

$$\frac{W}{\sqrt{gD}} = \sqrt{\frac{4}{3}} \sqrt{\frac{\rho' - \rho}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{C_x}} \quad (37)$$

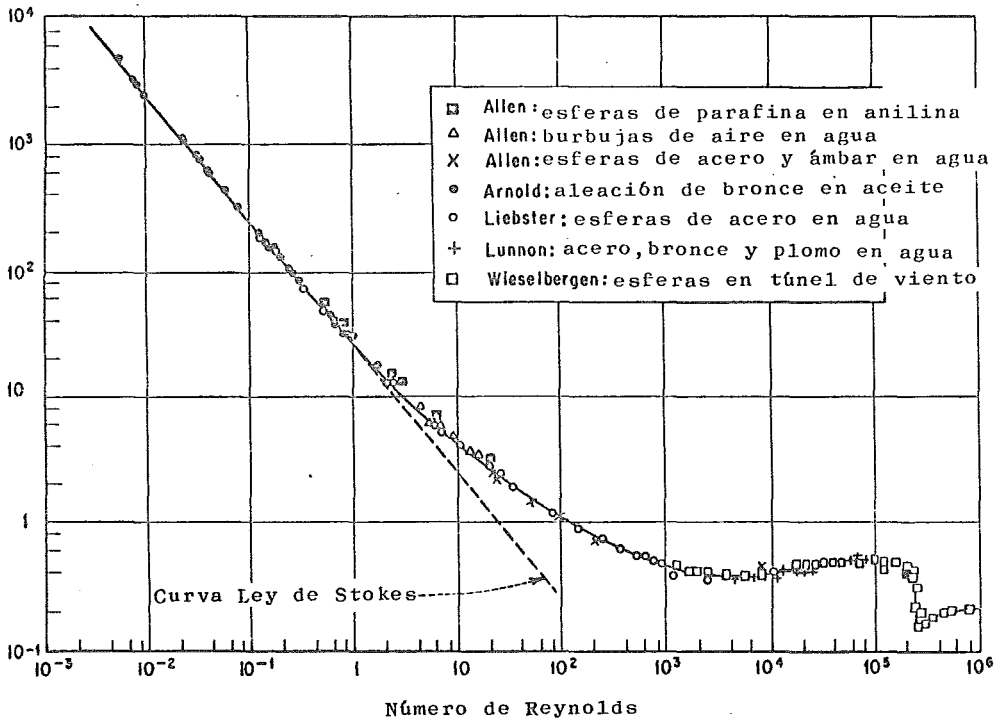
La velocidad de asentamiento se vuelve: $W = K\sqrt{D}$.

Los materiales en la tercera categoría, o sea con partículas de más de 2 mm. (para una S.Gr. de 2.65) , siguen esta ley

Graficada en escala logarítmica, la Figura 17 muestra las curvas del coeficiente de arrastre vs. número de Reynolds para partículas esféricas de diferentes gravedades específicas.

Figura No. 17

▽ Coeficiente de arrastre



Gráfica del coeficiente de arrastre C_x vs. número de Reynolds para esferas de densidades variables.

Para partículas irregulares y no-esféricas, su sección más grande presentada al líquido al caer, y la ecuación de arriba se convierte:

$$\frac{W}{\sqrt{gD_n}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\rho' - \rho}{\rho}} \sqrt{\frac{\Psi}{C_x}} \quad (38)$$

donde D_n = tamaño nominal de partícula, o el diámetro de una esfera del mismo volumen; Ψ = coeficiente de la forma de partícula, siempre menor de 1, representando la relación entre la sección del corte de una esfera del mismo diámetro nominal y el área de la sección transversal mayor.

Se ha encontrado que las partículas en estas mezclas se caracterizan al ser transportadas hidráulicamente por la relación C_x/Ψ . Esto ha llevado a definir un nuevo parámetro $C_{x'}$, o mejor $\sqrt{C_{x'}}$:

$$C_{x'} = \sqrt{\frac{gD_n}{W}} \sqrt{\frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho' - \rho} \frac{C_x}{\Psi}} \quad (39)$$

$C_{x'}$ se llama el coeficiente aparente de arrastre y se determina fácilmente dado a que es una función de los parámetros W y D_n que son fácilmente medibles. Este coeficiente adimensional caracteriza, de hecho, a un número de Froude para decantación.

La tubería, como mencionamos antes es un buen porcentaje de la inversión total en un sistema de bombeo. La selección del material de construcción de cada tubería depende del material que transporta. Los sólidos transportados producen un desgaste abrasivo al que puede sumarse el debido a corrosión del fluido

transportante y el debido también, al aire disuelto. En secciones rectas de tubería el desgaste abrasivo es en su mayor parte debido a fricción, y es leve con materiales finos pero aumenta al transportarse partículas más gruesas por saltación. En este último caso, el desgaste se confina en la superficie del fondo del tubo así que la vida de la tubería se puede extender si se rota un ángulo apropiado después de un número de años de operación. Este tipo de desgaste puede disminuirse también si se transportan los sólidos en un régimen de depósito en el que el fondo del tubo se protege con las mismas partículas de sólido, que se desgastan entonces unas contra otras.

A veces se encuentra desgaste anormal especialmente en las bridas de conexión. Esto indica una discontinuidad en el patrón de flujo que da lugar a pequeños remolinos que causan un desgaste muy duro, muy especialmente cuando los sólidos son muy finos.

El desgaste por golpe en la tubería se encuentra más frecuentemente en los codos y cambios de dirección. Ya que los sólidos no siguen la misma trayectoria que el agua, las partículas transportadas golpean contra la pared del tubo con una fuerza que aumenta de acuerdo al tamaño de partícula y a lo cerrado que sea el cambio de dirección. La fuerza centrífuga contribuye también a este desgaste al aumentar el peso aparente de las partículas contra la pared del tubo.

Hay varias formas para minimizar los efectos anteriores.¹² Podemos recordar que como una primera aproximación la abrasión tanto de fricción como de golpe varía con el cubo de la velocidad de los sólidos, de modo que lo mejor es usar la velocidad mínima compatible

para transporte de sólidos para reducir el desgaste al mínimo.

Cuando además de la abrasión hay efectos de corrosión, obviamente la tubería se va a desgastar más rápido, y aquí se debe dar especial atención a la selección del material de la tubería que sea más económico, tenga la dureza necesaria y la mejor resistencia a la corrosión de acuerdo a la aplicación que se considere. En general, el desgaste de las tuberías es un proceso relativamente lento siendo una vida útil de 10 años posible si se ha elegido el material adecuado. Hay una gran selección de materiales hoy en día entre los plásticos, fibra de vidrio, vidrio, tubo de fierro recubierto de hule o de plástico, etc.

3.- Manómetros, Termómetros, Medidores de Flujo, etc., Para Fluidos Difíciles.

El progreso enorme que se ha hecho en los instrumentos para control de procesos no ha alcanzado en la misma proporción algunos accesorios tradicionales como los manómetros, rotámetros, medidores de propela, termómetros, etc. que se usan en las tuberías.

El criterio que debe usar el Ingeniero Químico al seleccionar estos pequeños pero útiles accesorios al completar un sistema de bombeo, es el de contrarrestar los efectos de la viscosidad de los líquidos usando extensiones de mayor área y si es el caso, llenas de un fluido de viscosidad adecuada, o bien usar equipos más grandes y resistentes de lo que se requeriría normalmente a efecto de que resistan la abrasión producida por los materiales sólidos en suspensión.

Especialmente en las plantas de polimerización se presentan casos de fluidos de alta viscosidad (frecuentemente no-newtonianos) , - sólidos en suspensión, transferencias pobres de calor y baja conductividad eléctrica. Además las corrientes de fluido pueden ser explosivas o tóxicas, pueden causar polimerización prematura, o - evaporarse al pasar por las válvulas o pueden contener pequeñas - cantidades de catalizador. MEDIDORES DE NIVEL

La presencia de polímeros o de lodos requieren enfoques especiales para medir su nivel. Normalmente, al alimentar los reactores no hay polímeros presentes, pero se puede esperar alguna formación de -- polímeros en los tanques de almacenamiento que contienen hidrocar - buros insaturados. Los monómeros tales como el ^Butadieno pueden -- formar un polímero que se conoce, como "Palomitas" en el espacio de - vapor.

Al medir el nivel en tanques que contienen productos de polimeri - zación, el detector no debe tener partes movibles en contacto con el líquido o cavidades que se puedan tapar. La forma mas simple y - económica es medir la cabeza hidráulica en el tanque. Este método - es aplicable cuando la densidad del material es constante, y la - medición resultante se puede interpretar como una lectura de nivel. El elemento de medición es un transmisor de diferencial de presión provisto de un diafragma extendido como se muestra en la figura - 18. Cuando éste artefacto se inserta en una espesa del tanque, per - mite al elemento sensor de diafragma quedar en contacto directo - con el interior del tanque, eliminando así cavidades que serían - una fuente potencial de obstrucciones por la continua acumulación - de material polimérico. El depósito de estos materiales sobre el -

diafragma no es mayor que sobre las paredes del mismo tanque y aún estos se pueden minimizar si se recubre la superficie del diafragma con teflón. Ya que este transmisor es básicamente un aparato de equilibrio de fuerzas (el movimiento del diafragma es de solo unas milésimas de pulgada), la acumulación del polímero en la superficie del diafragma no afecta la exactitud de la medición -- mientras la presión hidráulica se transmite a través del polímero. Este es casi siempre el caso.

Medición de la presión.

La detección de presión no presenta, generalmente, problemas serios en las suspensiones y polímeros, excepto que, como se dijo antes, los orificios y cavidades en los equipos se pueden tapar fácilmente, El elemento sensor de la presión no debe tener entonces ninguna - cavidad.

En la mayoría de las aplicaciones, los "sellos en línea" ofrecen una solución satisfactoria. Estas unidades se pueden usar en las - tuberías y también en tanques como se muestra en la figura 18. Como en todos los sistemas que funcionan llenos de un líquido, se requiere compensar por los efectos de la temperatura ambiente, a fin de tener una lectura confiable. Cuando hay que rellenar estos sistemas, es - esencial que no haya burbujas de aire en el sello pues interferirían con la buena transmisión de la presión.

Las cápsulas volumétricas llenas de líquido se pueden usar también para detectar la presión en tuberías de fluidos difíciles. La figura 18 muestra la forma típica en que se instala un equipo de estos. Cuando hay presiones positivas bajas, se puede usar un transmisor de presión diferencial del tipo mostrado en la figura 18, de extensión de diafragma, y uno de los lados abiertos a la atmósfera.

Medición de la temperatura.

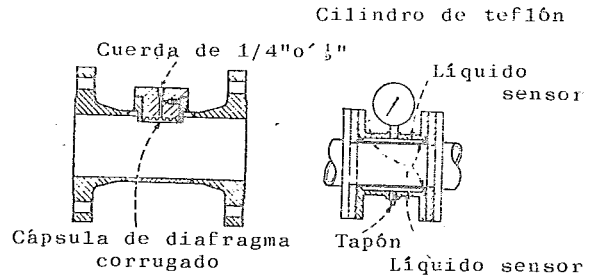
Al tomar mediciones de temperatura en tuberías, tanques o reactores, es necesario tener en cuenta lo siguiente: a) Eliminar el que se pasen las lecturas muy arriba al empezar a hacer la determinación. b) Seleccionar el tipo correcto de elemento térmico y localizarlo en una área térmica que sea representativa. c) Usar el elemento - transmisor adecuado, y d) Contrarestar las dilaciones de tiempo inherentes al sistema.

La combinación preferida es la de un termopar, o mejor, dos termopares cuando se usa controlador de temperatura, y tener líneas llenas de un fluido distinto a presión, como agua, vapor, Dowtherm, etc. Dependiendo de las características del proceso, se pueden - usar termopares del tipo de alta resistencia y siempre, claro, en un lugar bien bañado por el líquido y en una área representativa - de la temperatura.

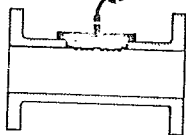
Figura No. 18



El diafragma de extensión del transmisor de presión diferencial se monta en el fondo del tanque para hacer mediciones de nivel.



Tubo capilar al sensor de presión



Las cápsulas llenas de líquido detectan la presión en la tubería cuando fluyen materiales muy viscosos.

CAPITULO IV

1. Aplicaciones especiales en la Industria Química -

La Industria Química es posiblemente donde se utiliza el número mayor de bombas, tanto en rangos como en tipos, siendo casi siempre las nuevas inversiones de equipo de bombeo generadas dentro de y para esta industria. En proporción, las bombas centrífugas son las más usadas al grado que la American Standards Association ha hecho ya una estandarización de las bombas centrífugas de baja presión para proceso.

En general, las bombas que se usan en la industria química son para rangos entre uno y mil gpm, temperaturas entre 10 y 200° C. y presiones entre 1 y 500 psi. Desde luego que hay muchas aplicaciones que salen de este marco pero aproximadamente el 90% de las aplicaciones de bombeo caen en el cuadro anterior.

Las aplicaciones difíciles de bombeo se presentan al trabajar con suspensiones con más de 5% de sólidos, líquidos muy viscosos, arriba de 2,000 cp, fluidos corrosivos y fluidos multifásicos.

Para estas aplicaciones especiales se han diseñado también bombas especiales con una gran variedad de formas de transporte de líquido y en una amplia gama de material de construcción. Hay por ejemplo la bomba de transmisión magnética construída en materiales anti-corrosivos, no tiene empaques para evitar el derrame del producto y el impulsor se conecta a una rueda metálica de un material de baja reluctancia y que está colocado en un extremo cerrado de la carcaza inmediato a un disco similar pero magnetizado que está unido a la flecha del motor.

Figura No. 19

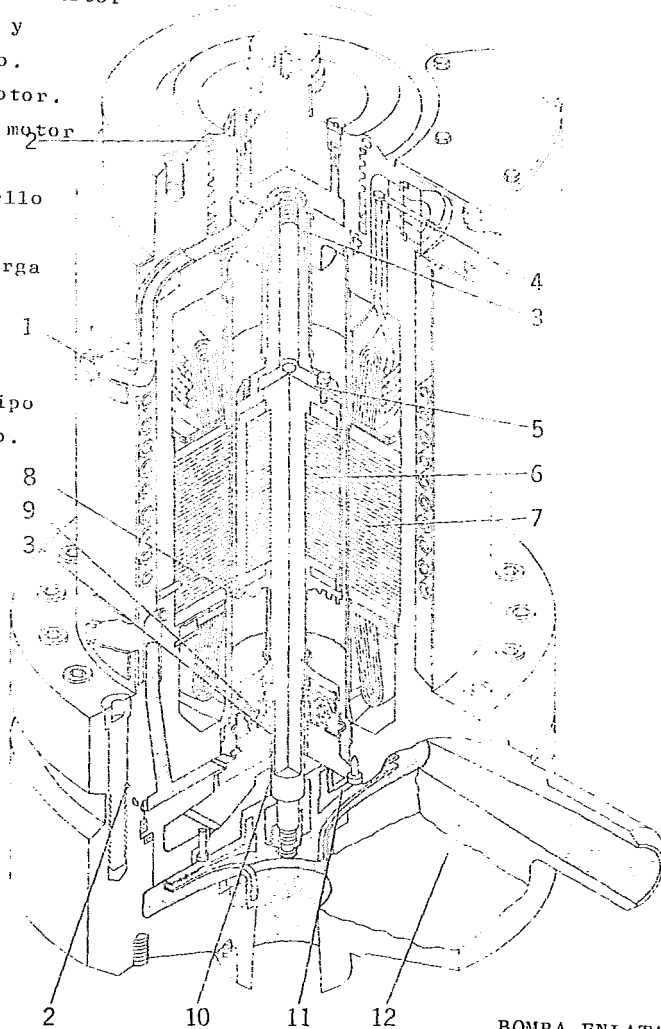
- 1.- Entrada de agua a la chaqueta de enfriamiento.
- 2.- Sello y empaques
- 3.- Baleros de mango radiales.
- 4.- Terminales del motor
- 5.- Lubricación y enfriamiento.
- 6.- Rotor del motor.
- 7.- Estator del motor

- 8.- "Lata" de sello hermético.
- 9.- Balero de carga axial.

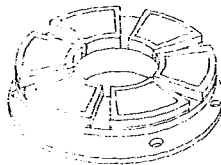
- 10.- Sello del tipo de laberinto.

- 11.- Impulsor.

- 12.- Carcaza de la bomba.



BOMBA ENLATADA



Otro diseño que merece consideración es el de la bomba "enlatada"¹³ donde el impulsor de la bomba está acoplado a la flecha del motor y todo el rotor de éste construido de tal modo que el flujo del líquido es a través de él y a través de la flecha hueca del motor así que no necesita tampoco de ningún tipo de sello o empaque. Esos equipos se ilustran en la Figura 19.

El uso de las bombas centrífugas se amplía también al manejo de metales fundidos siendo aquí necesario, desde luego, que no haya ninguna fuga a través de empaques o el metal al endurecerse dañaría irreparablemente el equipo. Generalmente se usan bombas verticales como las que se ilustran en la Figura 20. Los empaques en las flechas se usan solo para detener humos y no el metal fundido.

Hay una gran variedad de bombas disponibles hoy en día para resolver casi cualquier aplicación en la industria química y los diferentes fabricantes ofrecen cada vez mejores diseños para dar las mejores combinaciones de resistencia a la erosión y corrosión del equipo al trabajar con ácidos, alkalis y suspensiones corrosivas a temperaturas que llegan a veces hasta los 700° C.

Es importante tener presente que al trabajar con suspensiones o productos corrosivos el desgaste es siempre mayor a medida que se aumenta la presión de trabajo así, una bomba trabajando a 200 psi puede tener el doble de vida que una bomba igual trabajando el mismo producto en el mismo volumen pero a 600 psi. Esto se debe a que el desgaste de los elementos de bombeo producido por las materias corrosivas y/o por los sólidos en suspensión es más pronunciado al sumarse los esfuerzos internos por las deformaciones

Soportes del diafragma
 Flecha estacionaria
 Magnetos
 Diafragma no-magnético
 aísla y confina al líquido
 bombeado a la sección mojada

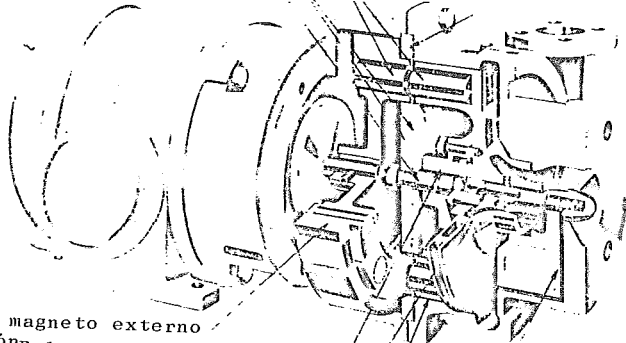
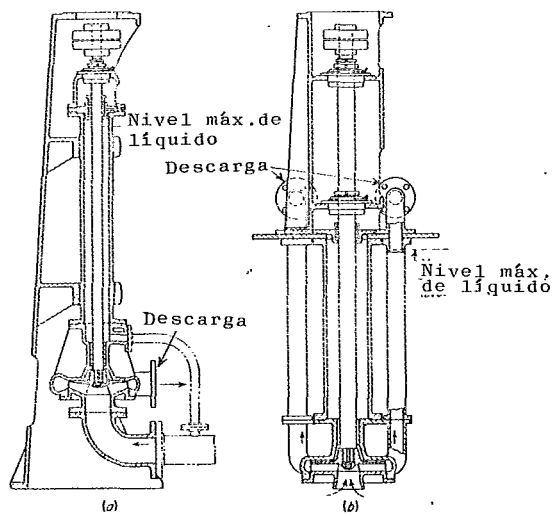


FIGURA 21

Ensamble del magneto externo
 de transmisión
 Baleros radial y axial giran
 con el ensamble seguidor.
 Baleros lubricados por inmersión
 en el líquido a bombear
 Lubricación adicional de los
 baleros por la presión de la bomba
 Magneto seguidor interno
 y ensamble del impulsor

FIGURA 20



debido a la presión.

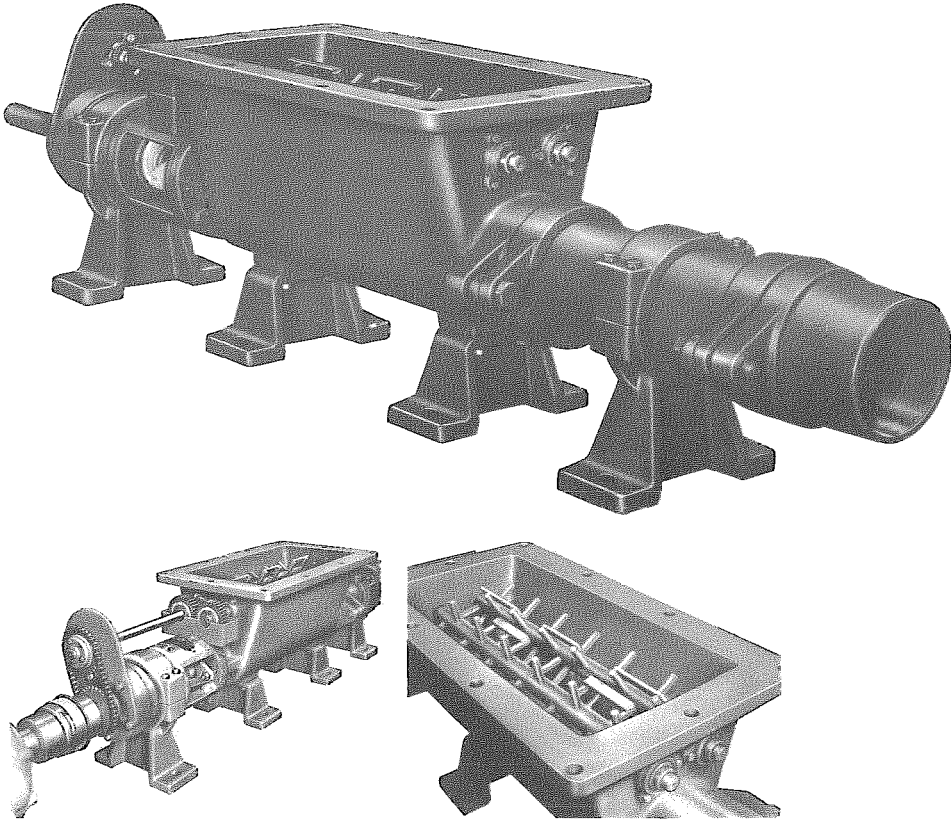
Una innovación interesante es la invención de la bomba de ---- "pistón fluido". Esta fue desarrollada por la Cía. Monsanto - Chemicals en los E.U.A. y su principio es muy sencillo. Se trata simplemente de que al manejar líquidos altamente corrosivos, éstos no entren en contacto con las partes vitales de la bomba, y así, al introducir un fluido "aislante" entre la bomba y el - corrosivo, se consigue este fin. Un diagrama ilustrativo de su - funcionamiento se dá en la figura 21.

Entre los últimos adelantos en materiales de construcción para bombas centrífugas, se tiene el teflon que resiste todos los - ácidos minerales a temperaturas hasta de 300°F. Merece importan- cia también mencionar el nuevo proceso que permite aplicar una - capa continua de vidrio en la carcaza de las bombas para corrosi vos y que forma una sola pieza, una especie de aleación que ase- gura buen funcionamiento por mucho tiempo, si se trabaja a tempe- ratura ambiente. Por último, conviene mencionar las variedades de cerámica y cerámica vidriada (CBR-VIT)¹⁵ que se pueden aplicar - también ahora a las carcazas de las bombas para ofrecer los mejo- res resultados al trabajar con materiales corrosivos que llevan - sólidos suspendidos en bajo porcentaje.

Las aplicaciones mas especiales en industria química se resuelven sin embargo, con bombas rotatorias. El manejo de suspensiones - abrasivas- corrosivas con altos porcentajes de sólidos, es el caso mas frecuente.

Bombas de un solo tornillo se usan con éxito en la descarga de - ácido fosfórico de los carros tanque en las plantas de proceso.

BOMBA MOYNO CON MECANISMO ROMPEDOR Y TORNILLO DE ALIMENTACIÓN DE MATERIALES VISCOSOS A LOS ELEMENTOS DE BOMBEO.



EL MECANISMO ROMPEDOR SE-MUEVE CON LA MISMA FLECHA DE LA BOMBA CON CATARINAS Y CADENA. NO SE REQUIERE-OTRO MOTOR SEPARADO.

EL MECANISMO ROMPEDOR CONSISTE EN UNA SERIE DE "DEDOS QUE SE PROYEC-TAN RADIALMENTE DE FLECHAS QUE GÍ-RAN EN SENTIDO CONTRARIO SOBRE EL TORNILLO DE ALIMENTACION DE LA -BOMBA".

Figura No. 22

La regeneración de catalizadores en polvo ha hecho indispensables a las bombas para el manejo de este material, generalmente semisólido y con alto contenido corrosivo. Las bombas de un solo tornillo se usan aquí también con éxito.

Algunas de las aplicaciones más comunes dentro de las especiales que se han resuelto con bombas de este tipo, se listan a continuación:

-Resina Poliester con tierra diatomácea, viruta de madera y gránulos de cerámica. Esta es una mezcla bastante usada en la fabricación de objetos moldeados de apariencia de madera. Su viscosidad es de 3,000 o 3,500 cps, tiene un porcentaje de sólidos de 30% y se descarga generalmente a 50-50 psi.

-Aceite combustible #2 con óxidos de magnesio y de aluminio en forma de polvo como aditivos. 52% de porcentaje de sólidos operando las 24 horas del día contra una presión de 200 psi. La viscosidad de la mezcla es de 100 cps.

Las tortas de los filtros prensa con contenidos de humedad tan bajos como 30% se pueden alimentar directamente a la succión de una bomba tipo Moyno¹⁶ que incorpora un mecanismo rompedor y un tornillo transportador directamente debajo de éste, para llevarla torta rota a los elementos de bombeo. Esta bomba se ilustra en la figura 22.

La versatilidad de las bombas rotatorias ha sido util también en los procesos de secado instantáneo (Flash Drying), donde es necesario alimentar el producto a secar en forma de suspensión a las espreas de secado situadas en la parte superior del secador, a una presión relativamente alta (300-500 psi.) Anteriormente, debido a la limitación de la concentración de sólidos que podían manejar las bombas centrifugas, los secadores instantáneos funcionaban con baja eficiencia, siendo los lotes muy largos en tiempo. En la actualidad, se puede seleccionar entre varios tipos de bombas rotatorias que pueden surtir a las espreas una descarga constante a presiones adecuadas y con tantos sólidos en suspensión como lo permitan las mismas espreas. El resultado es una operación mucho más eficiente de estos equipos y la elevación considerable en la producción.

Las bombas más comunmente usadas para alimentar secadores instantáneos son las de dos impulsores en forma de creciente como la "Waukesha" y las de un solo tornillo, tipo Moyno .

Habíamos mencionado al principio de este trabajo que con los nuevos sistemas de bombeo disponibles en la actualidad se podían bombear inclusive, sólidos completamente secos en la misma forma que se manejan suspensiones u otros materiales más comunes.

El equipo que hace posible solucionar con éxito este tipo de aplicaciones es un conjunto especial teniendo como componente principal una bomba de un solo tornillo y como accesorios, un sistema pequeño de aire comprimido y una tolva de diseño especial que fluidiza los polvos para dejarlos en los elementos de bombeo.



QUÍMICA

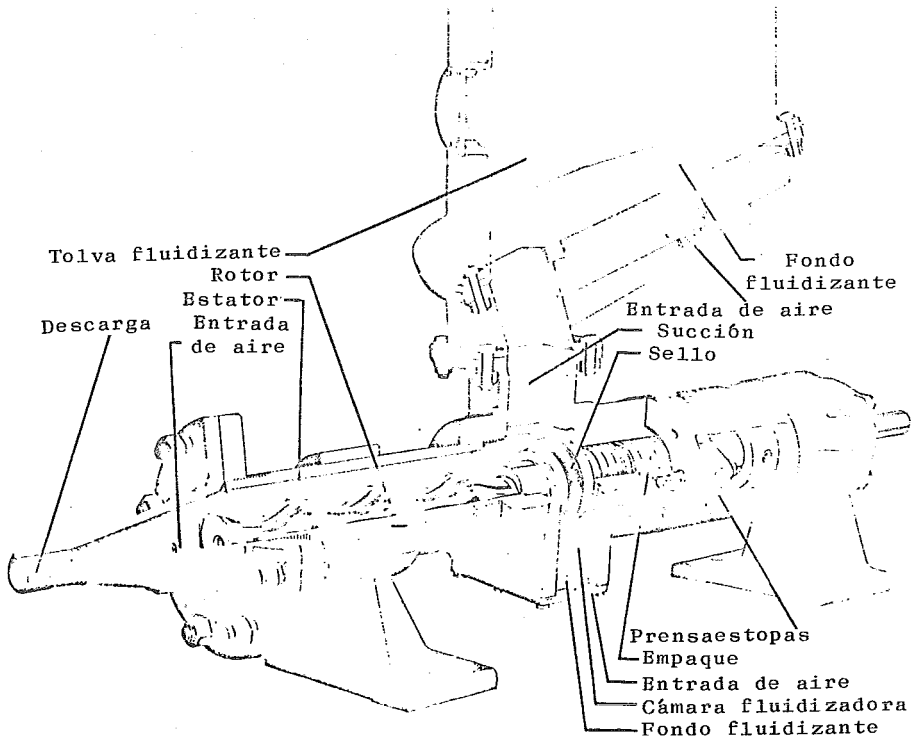


Figura No. 23

En la Figura 23 se muestra un corte de este equipo. Las sustancias como harina, metales pulverizados, arcillas, almidones, carbonato de calcio, algunas resinas, talco, sílica en polvo, y muchos otros se transportan exitosamente usando este tipo de bombas.¹⁷

El manejo de polvos secos por un sistema de tuberías totalmente cerrado, a sido preferido casi siempre para el manejo a granel ya que elimina problemas de mantenimiento y a la vez mucha de la necesidad de equipo costoso para colección de polvo. Usando estas bombas rotatorias se construyen sistemas prácticos y eficientes hasta con líneas de 200 mts. de longitud y elevaciones hasta de 25 mts.¹⁸

El rotor helicoidal, girando dentro de un estator de hule fijo y que tiene la forma de un helicoide doble funciona como un transportador de tornillo de precisión. Estos elementos de bombeo forman cavidades que avanzan hacia la descarga a medida que el motor gira dando como resultado lo mismo que si un pistón se moviera en un cilindro de longitud infinita, suave y libre de turbulencias con desplazamiento positivo y flujo continuo y uniforme adecuados para propósitos de dosificación. Una de las ventajas de este equipo es su habilidad para manejar materiales secos con cantidades mínimas de aire. Las relaciones de producto a aire de 200:1 y mayores, en peso son posibles. Es importante hacer notar que el aire inyectado no se usa para forzar el material a través de la tubería, sino que, su uso se reduce a mantener el material en un estado fluidizado al reducir la

Fricción entre partículas dentro del sistema. La bomba misma hace todo el trabajo, creando la presión requerida para mover el material uniformemente a través de la línea. En algunos casos, se pueden manejar ciertos materiales a través de líneas cortas o elevaciones pequeñas sin necesidad de usar aire.

La tolva fluidizante, que se usa en la mayoría de las aplicaciones, sirve para dar mejores características de flujo al material que se maneja al entrar en la succión de la bomba. El aire inyectado a través de la cámara fluidizante de la bomba, ayuda a mantener el flujo de material a los elementos de bombeo rotor-estator. El rotor de la bomba mantiene una línea de contacto continua con el estator elástico, girando siempre a una velocidad uniforme, crea un sello efectivo que evita que el aire pase de la succión a la descarga de la bomba o viceversa. La baja velocidad de flujo minimiza también el problema de compactación de los polvos que se encuentra frecuentemente en este tipo de operaciones.

Es algo difícil establecer números exactos para la eficiencia de estos sistemas ya que la cantidad de material que se puede manejar por hora depende de la estructura granular, características de fluidización y de la configuración del sistema de tubería. En los mejores casos se han alcanzado capacidades de hasta 10 tons./hr. La Figura 24 muestra un sistema que usa una bomba Moyno para manejar harina de trigo de molienda fina. Usando menos de 2 cfm. de aire a 1 psig. en el lado de succión de la bomba y 8 cfm. a 6 psig. en el lado de la descarga, se

transportan 8,100 lb./hr. a través de 30 mts. de tubo de 2" teniendo una elevación vertical de 15 mts. La presión de operación de la bomba es de 6 psig. y utiliza un motor de 1.5 hp.

Las curvas de funcionamiento mostradas en la Figura 24 indican el resultado típico para otros materiales cuando se manejan en un sistema de configuración similar

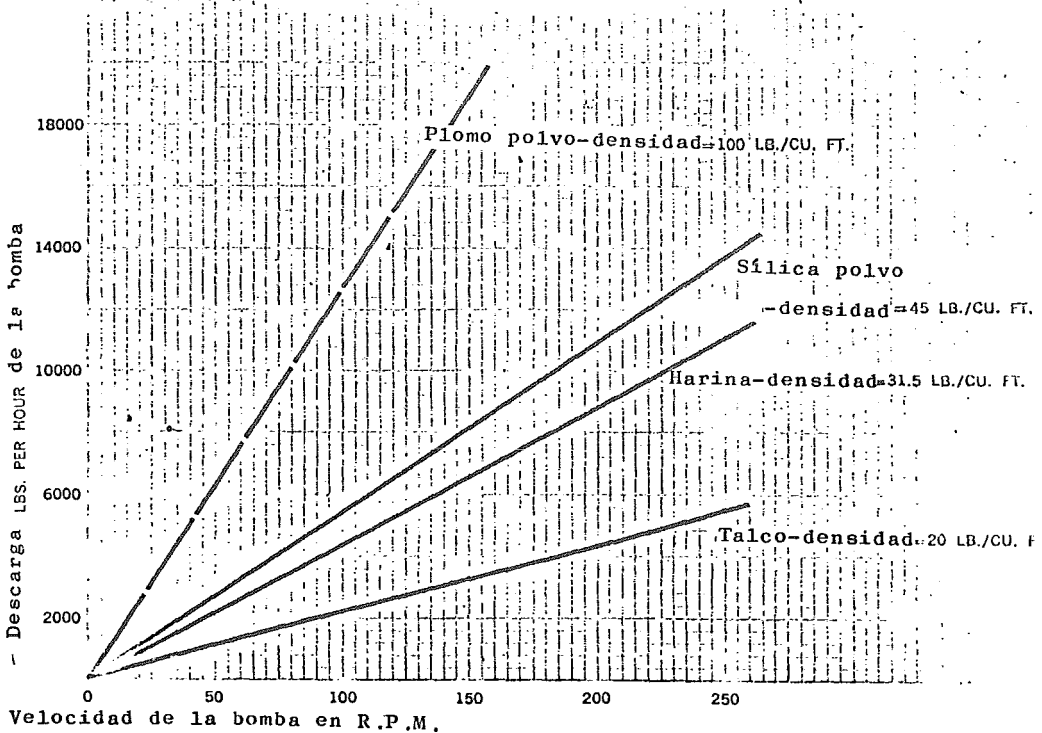


Figura No.24.

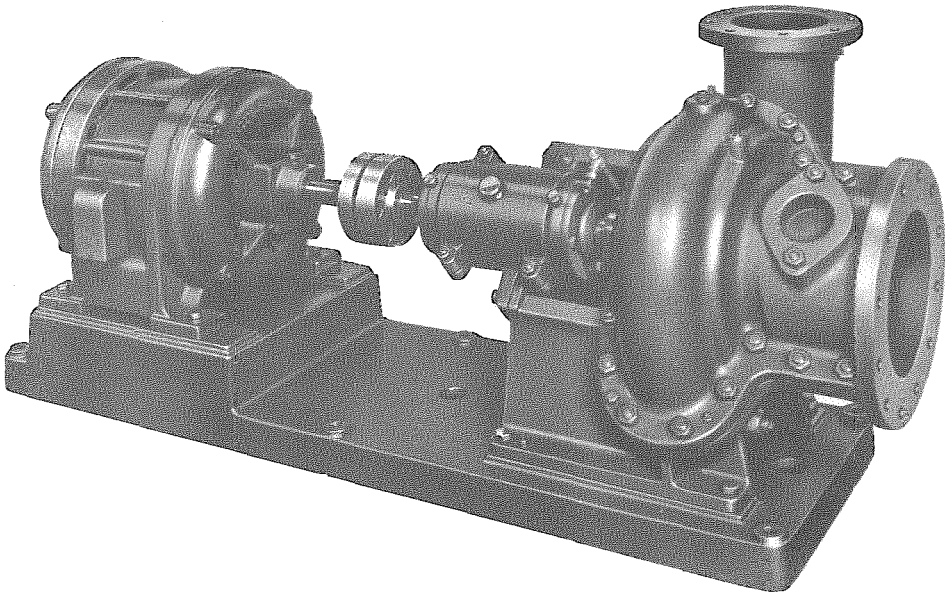
2.-Industria del Papel

Otra vez las bombas centrífugas son las que se usan en mayor porcentaje dentro de las fábricas de papel. En cuanto a usos especiales, hay dos casos interesantes en los que se usan dos tipos distintos de bombas centrífugas.⁶

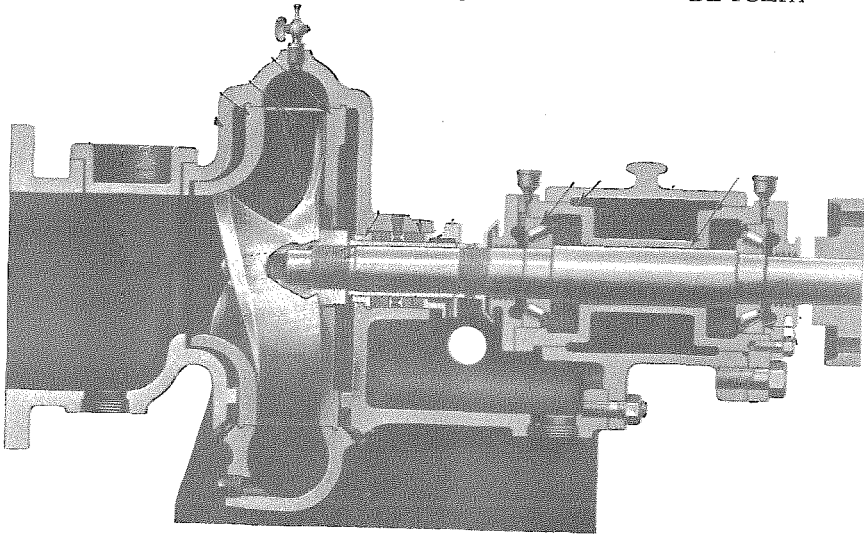
El primero requiere de una bomba alimentadora del tipo de tornillo de Arquímedes y que lleva la pulpa de alta consistencia de los tanques de tratamiento a la succión de las bombas de pulpa. Las aspas fuerzan a la pulpa a fluir por la tubería de succión de las bombas evitando que entre aire o que se atasquen los impulsores de las bombas al variar la consistencia.

El segundo caso es precisamente, el de las bombas de pulpa que pueden manejar suspensiones de consistencia de 8% y en diseños especiales hasta el 10%. El impulsor de estas bombas es del tipo abierto, girando normalmente entre placas de desgaste que pueden reemplazar cuando la abrasión las adelgaza, evitando así desgaste de la carcasa. Generalmente la flecha de estas bombas es de un diámetro bastante mayor que el necesario considerando solo las fuerzas hidráulicas y esto es debido al desgaste que llegan a sufrir a trabajar pulpa de papel. La succión de estas bombas es de diámetro grande, alrededor de 10 a 20 pulgadas para minimizar la Fricción. En la figura 25 muestra un corte típico de estas bombas y del impulsor que se usa normalmente.¹⁹

Una aplicación más difícil es la de alimentar las suspensiones de almidón, caseína y kaolines que se usan en la elaboración y el acabado de los rollos de papel. Estas suspensiones son sumamente abrasivas, de contenido corrosivo alcalino y con viscosidades entre 2,000 y 5,000 cps. Las bombas rotatorias del tipo de impulsor de hule como la "Jabsco" y las de un solo tornillo como la Moyno, son especialmente adecuadas para dar la combinación de capacidad.



VISTA EXTERIOR DE BOMBA PARA MANEJO DE SUSPENSION DE PULPA



CORTE DE LA MISMA BOMBA MOSTRANDO EL IMPULSOR
Y LA CAMARA DE SUCCION.

media, presión de descarga entre 80 y 100 psi. y resistencia a la abrasión y a la corrosión.

3.- Industria Petrolera.

Para efectos de clasificación, las bombas usadas en la industria del petróleo se pueden clasificar en 8 categorías: perforación, - transportación, producción, refinación, fraccionación, de plataformas marinas, portátiles y dosificadoras. El petróleo es , - cerca del agua, uno de los fluidos que más comunmente se manejan con bombas. Siendo así, es algo sorprendente encontrar que los - tipos de bombas usados en esta industria son pocos pues una ca - racterística de esta industria es el alto grado de estandariza - ción en equipo de bombeo^{6,13}.

En perforación, el tipo de bomba más usado es el de reciprocantes ya sea, de accionamiento directo, o por vapor, o bombas horizontales duplex o triplex. En la mayoría de las perforaciones, la - bomba de lodos debe desarrollar presiones altas, alrededor de -- 3,000 psi con flujos moderados. Una sola bomba o arregles en serie o paralelo son comunes. El lodo de perforación manejado por estas bombas tiene una densidad entre 0.40 y 0.65 lb/ft³ y son - bastante abrasivos. Alternativamente, para capacidades menores , hasta 500 gpm como máximo, se usan también las bombas de un solo tornillo con rendimiento superior al de las reciprocantes.

Para extraer el petróleo de los pozos se usan bombas del tipo de barra de succión. Estos son sistemas reciprocantes donde el émbolo es una barra larga que puede o no tener anillos, y las - camisas son generalmente de un diámetro mayor del que se usaría

en otras aplicaciones. El movimiento del émbolo se hace a través de una caja de engranes conectada a una rueda de inercia que se acciona por un motor o máquina de vapor, a través de una viga oscilante. Las válvulas en la succión y descarga son del tipo de bolas.

El transporte del petróleo crudo se hace con bombas centrífugas muy grandes del tipo de voluta o de difusor. Cuando las capacidades no son grandes hasta 750 gpm , se usan frecuentemente las bombas rotatorias de engranes internos o externos como las "Kinney", "Ropper", "Viking", etc. En casos en los que el crudo lleva arena en suspensión se usan las bombas de un solo tornillo como la Moyno.

En refinación se usan otros tipos de bombas especiales para mover los fondos de las torres de fraccionación y para recircular los aceites pesados de residuo de destilación. Los equipos en cuestión, son las bombas de molienda de coke. Estas tienen un molino localizado frente al impulsor en la cámara de succión. Cualquier carbón sólido en el material a bombear debe pasar por el molino. Las partículas de carbón pulverizado son lo suficientemente pequeñas para pasar a través de la bomba y el resto del equipo. La capacidad común en estas bombas es de 10,000 gpm o más contra cabezas de 50 pies o menos y llevan sellos mecánicos.

4.- Industria Hulera

Las bombas en la Industria Hulera manejan un numero diferente de líquidos incluyendo solventes, aceites suavizantes, sosa cáustica, pigmentos, licores, látex, ácidos, catalizadores, modificadores, etc. Las bombas centrífugas tienen muchos usos para flujos altos y presiones de bajas a medias. Las bombas reciprocantes se usan sobretodo para dosificar por ejemplo, rellenadores, lubricantes, y otros ingredientes usados en la composición del hule.

Las aplicaciones especiales en esta industria se refieren a los fluídos de alta viscosidad como los cementos y algunos compuestos solventes, así como el manejo de latex y compuestos similares que son sensibles y no pueden portanto someterse a esfuerzo mecánico considerable. Las bombas de un solo tornillo y las de dos y tres tornillos son eficientes para manejar los cementos y mezclas solventes viscosas. Para el manejo de látex, se requiere de bombas del tipo de un solo tornillo operandose a muy baja velocidad (250 rpm. máximo que no agitan el material y no lo someten a ningún esfuerzo mecánico considerable que pudiera producir coagulos del material.

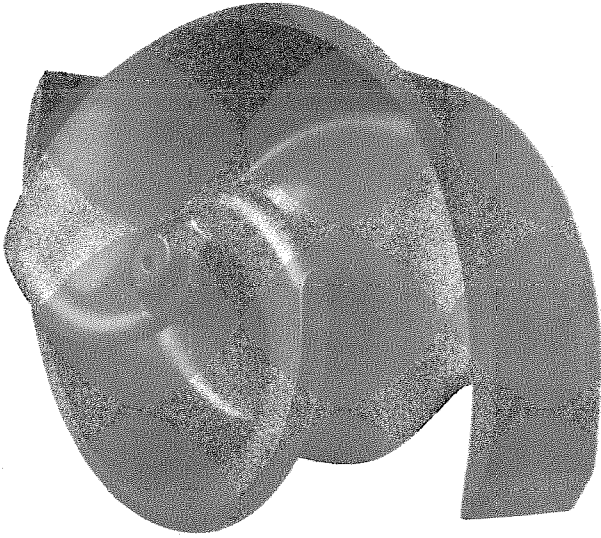
5.- Drenaje Industrial y Urbano

En esta clasificación, estamos incluyendo desde el drenaje crudo de edificios urbanos y fábricas hasta las aguas tratadas de deshecho industrial y otros materiales que pueden descargarse en los caudales del drenaje tratado general.

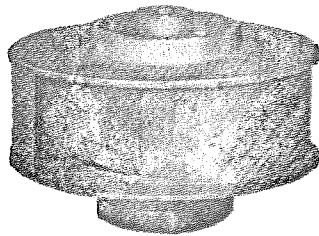
Normalmente, el drenaje se lleva por gravedad a cisternas o depósitos de cierta profundidad para lograr la sedimentación de los sólidos grandes y pesados y poder manejar el líquido con baja concentración de sólidos que se lleva después a las plantas de tratamiento. Las bombas centrífugas de tipo inatas cable con impulsor abierto se usan en la mayoría de estas aplicaciones siendo las verticales las de uso más frecuente. Los diseños de la mayoría de estos equipos son para altas capacidades con baja presión. En la Figura 26 se muestra un impulsor del tipo inatas cable y una bomba completa para drenaje crudo. El impulsor tiene dos aspas del tipo de ojal, siendo su forma escogida para poder manejar trapos, hilos, fibras, y otros materiales que tienden a alojarse en las bombas de drenaje.

Una característica de la bomba mostrada en la Figura 26 es el aumento en la succión del tipo excéntrico que tiene un tapón en la parte superior para permitir el acceso de limpieza del impulsor. Una conexión de agua limpia en la sección del empaque provee un flujo hacia la bomba que protege tanto al empaque como a la flecha contra cualquier material abrasivo en las aguas de drenaje..

El manejo de los lodos de sedimentación de drenaje es una aplicación bastante más difícil que el manejo del crudo debido a las grandes cantidades de trapos, cuerdas, pedazos de madera, metales, hule, y materiales similares que se depositan al hacerse la sedimentación. Algunos diseños especiales de bombas centrífugas con alimentadores de tornillo para el impulsor puede manejar



Impulsor abierto de dos venas



Impulsor inatascable

estos lodos pero los equipos más eficientes son de nuevo los que incorporan bombas rotatorias.

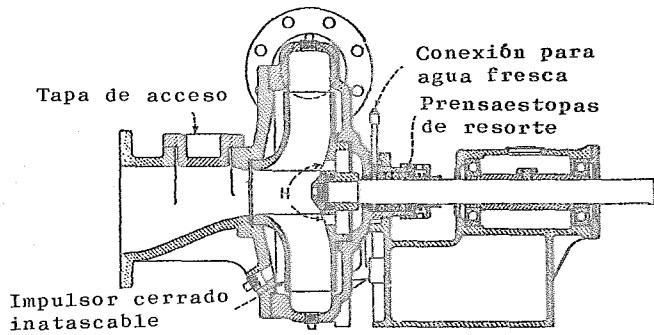
Los dos tipos de bombas más usados para los lodos de sedimentación son la de dos rotores semianulares como la "Waukesha" y la de un solo tornillo como la Moyno. Estas bombas tienen la ventaja de poder pasar sólidos mucho más grandes de lo que permite una bomba centrífuga (5 cms.) haciendo así que se puedan manejar los lodos sin una clasificación primaria, lo que resulta en una operación mas eficiente y económica, a mas de que son bombas autocebantes y que pueden bombear en cualquier dirección con solo invertir el sentido de rotación.

Dado a que usando bombas rotatorias se elimina casi totalmente el problema de los gases disueltos que se presenta al manejar lodos de drenaje con bombas centrífugas, las bombas rotatorias se pueden usar para llevar el material de los tanques de sedimentación a los digestores, traslado de digestor a digestor, etc. y gracias a que pueden producir presiones hasta de 500 psi, aprox., se pueden usar también para alimentar las centrífugas que separan los sólidos en los casos de alta concentración. Estos dos tipos de bombas se ilustran en la figura 27.

6.- Industria de Construcción.

El uso de bombas en industria de construcción, en gran escala, es relativamente nuevo, pero sus consecuencias han sido muy beneficiosas.

BOMBAS PARA MANEJO DE DRENAJE



BOMBA CENTRIFUGA CON IMPULSOR INATASCABLE

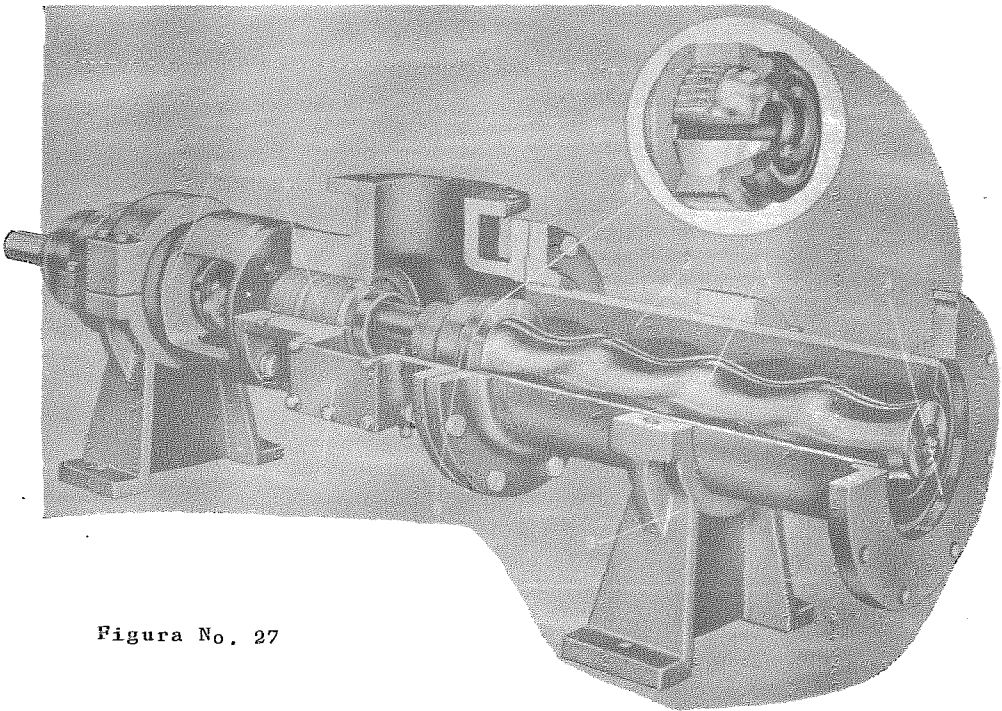


Figura No. 27

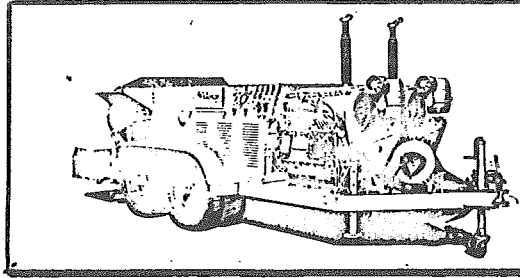
BOMBA MOYNO DE UN SOLO TORNILLO CON ESTATOR DE HULE SINTETICO

La introducción de bombas para manejo de concreto armado vino a revolucionar los sistemas de construcción de edificios, pues en un tiempo inferior a la mitad de lo normal se pueden hacer colados más homogéneos y mejores usando las bombas en vez del acarreo por lotes.

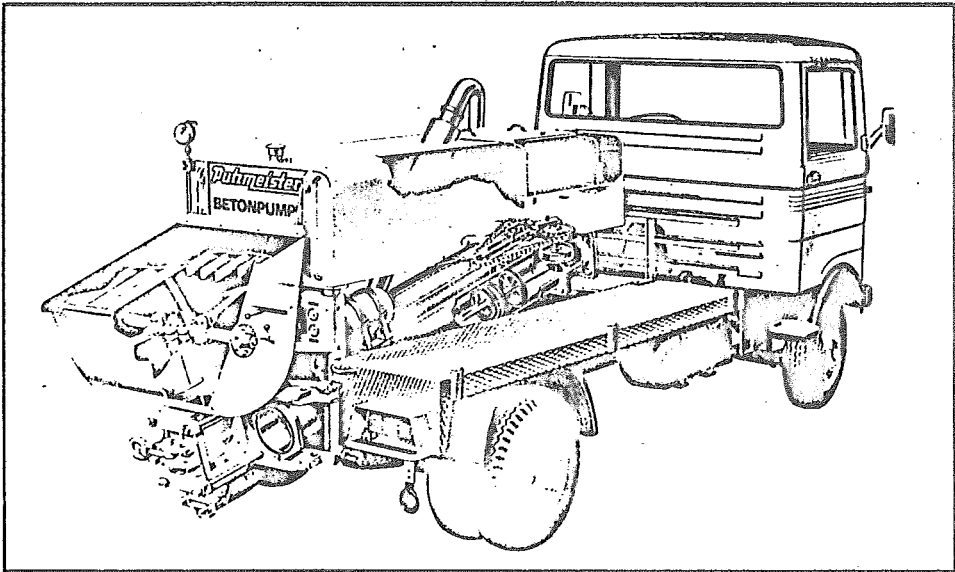
Las bombas usadas para bombear concreto son reciprocantes, simplex o duplex de accionamiento directo con motor de gasolina integrado lo que hace que la unidad sea portátil y muy versátil. El sistema de válvulas de bolas con partes de acero inoxidable permite una operación continua dando de 15 a 20 desplazamientos del émbolo por minuto y pueden trabajar concreto con agregados de hasta 4cms. de diámetro. La velocidad relativamente baja de operación se debe a la alta viscosidad de la mezcla de concreto y que llega a los 7,000 - 8,000 cps. El material se mantiene en composición homogénea mediante un agitador situado en la tolva de succión y generalmente se usa manguera de hule que además de dar flexibilidad ofrece la mejor resistencia al desgaste por los sólidos de la mezcla. Se ilustra este tipo en la figura 28.

Las bombas rotatorias tipo Moyno se han usado con éxito en el manejo de lodos de perforación, inyección de lechadas de cemento, y bentonita, cal, etc. con arena y aún con agregados de hasta 2 cms. de diámetro. El rango de capacidad de estas bombas varía entre 10 y 700 ft.³/min. y pueden dar presiones entre 500 y 600 psi.

Figura No. 28



Bomba para concreto



Bomba para concreto montada en camión

CONCLUSIONES

En los capítulos anteriores se ha puesto en forma condensada los conceptos principales que se deben tener en mente para seleccionar una bomba para una aplicación en un proceso determinado donde se trabaja con un fluido difícil de bombear.

El criterio que se debe seguir en este sistema que se presenta al encontrarse con una aplicación de este tipo es el siguiente:

1.- Observar las características del fluido en cuanto a viscosidad, densidad, (grado de acidez o alcalinidad), abrasividad en las condiciones de presión y temperatura en las que se va a bombear.

2.- Establecer el tipo de régimen de flujo deseable, laminar o turbulento de acuerdo a la viscosidad y contenido y naturaleza de sólidos en suspensión.

3.- De acuerdo a las condiciones de gasto y presión, seleccionar el tipo de bomba adecuado, centrífuga, rotatoria, o reciprocante. Centrífuga si el fluido no tiene una viscosidad mayor de 2,000 cp, no más de 5% de sólidos en suspensión y si la presión de descarga es baja, menos de 100 psi.

Se usaría una bomba rotatoria si el fluido tuviera una viscosidad superior a 3,000 cp, tuviera más de 5% de sólidos en suspensión - y requiriera presiones de descarga arriba de 100 psi.

Una bomba reciprocante se recomienda si la viscosidad no es mayor de 1,000 psi y si la naturaleza de los sólidos, la suspensión no propicia el atascamiento de las válvulas pudiéndose trabajar suspensiones con más del 40% de concentración.

4.- Seleccionar los materiales de construcción más resistentes de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes de equipo.

5.- Determinar las condiciones óptimas de velocidad y potencia de la bomba a modo de minimizar el desgaste abrasivo y justificar la inversión económica si se usa una bomba pequeña a alta velocidad con alta potencia, o una bomba mayor a menor velocidad con menor consumo de potencia.

6.- Al trabajar con fluidos difíciles no se debe olvidar que para que un sistema funcione eficientemente también las tuberías, tanques e instrumentos de medición se deben seleccionar en forma adecuada a modo de evitar fallas en el sistema fuera de la bomba. Se debe tener cuidado especial al calcular o seleccionar la cédula de tubería y los tipos de conexiones cuando se manejan suspensiones abrasivas aún a baja velocidad. Los controles de presión, nivel y temperatura se modifican usando elementos sensores llenos de algún líquido mejor transmisor o del tipo de diafragmas extendidos que pueden dar lecturas correctas aunque se trabaje con materiales muy viscosos o con muchos sólidos en suspensión.

BIBLIOGRAFIA

1. Ludwig Ernest E. "Fluid Flow Fundamentals", Chemical Engineering, June 13, 1960. McGraw-Hill Publishing Co., Inc.
2. Coates Jesse & Bernard S. Pressburg. "Fluid Flow Rules Unit Operations", Chemical Engineering, June 15, 1959. McGraw-Hill Publishing Co., Inc.
3. Foust A.S. & L.A. Wenzel & C.W. Clump & L. Maus & L.B. Andersen "Principles of Unit Operations", John Wiley & Sons, Inc., Publishers, 1960.
4. Coates Jesse & Bernard S. Pressburg. "How to Analyze Two-Phase Flow", Chemical Engineering, September 7, 1959. McGraw-Hill Publishing Co., Inc.
5. Hydraulic Institute Standards, New York, 1969.
6. Hicks Tyler G. "Pump-Selection and Application", McGraw-Hill Book Company, Inc., 1957.
7. Robbins & Myers, Inc. "Moyno Pumps Bulletin No. 100", Springfield, Ohio, 1970.
8. Viking Pump Company, "General Catalog, Section K", Cedar Falls, Iowa, 1968.
9. Worcester William E. "Pumping Viscous Materials", First Pan American Engineering Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 1959.
10. Kinney Manufacturing Co., "Bulletin L-48", Boston, Mass., 1958.
11. Chapus E.E. "Transporting Solid Materials in Pipelines", Chemical Engineering, June 24, 1963, McGraw-Hill Publishing Co., Inc.
12. Chapus E.E. "Operating Solids Pipelines", Chemical Engineering, July 22, 1963, McGraw-Hill Publishing Co., Inc.
13. Kristal Frank A. & F.A. Annett. "Pumps", McGraw-Hill Book Company, Inc., 1953.
14. Monsanto Chemical Co., "Pumping Corrosives, Easy With Fluid Piston Pump", Chemical Engineering, May 11, 1967, McGraw-Hill Publishing Co., Inc.
15. Goulds Pumps Inc., "Form No. 8677", Seneca Falls, New York, 1972.

16. Robbins & Myers, Inc. "Moyno Pump", Bulletin No. 160", Springfield, Ohio, 1972.
17. Robbins & Myers, Inc. "Moyno Powder Pump Application Data", Springfield, Ohio, 1962.
18. Gosset Jay W. "Compact Powder Pumps Offer New Opportunities to CPI Operating Management", Chemical Processing, May 20, 1963,
19. Allis-Chalmers Manufacturing Company, "The Improved Paper Stock Pump", Milwaukee, Wisconsin, 1957.