

261/159



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**

**CALCULO DE LA PERDIDA DE ENERGIA EN UNA CONDUCCION  
QUE TRANSPORTA PARTICULAS SOLIDAS**

**TESIS PROFESIONAL**

Presenta

**SERGIO QUINTANA ROCHA**

Para obtener el título de  
**INGENIERO CIVIL**

**1986**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

	PAGINA
1. INTRODUCCION	1
1.1 ANTECEDENTES Y APLICACIONES GENERALES	1
1.2 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO	2
1.3 OBJETIVO	4
2. ASPECTOS GENERALES DE LAS MEZCLAS DE PARTICULAS SOLIDAS CON LIQUIDOS	6
2.1 INTRODUCCION	6
2.2 PROPIEDADES FISICAS DE LAS PARTICULAS SOLIDAS	8
2.3 PROPIEDADES FISICAS DE LAS MEZCLAS	15
3. FLUJO DE MEZCLAS HOMOGENEAS Y HETEROGENEAS	20.
3.1 INTRODUCCION	20
3.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	24
3.3 SELECCION DE LA CONCENTRACION DE LA MEZCLA	25
3.4 SELECCION DEL DIAMETRO DE LA TUBERIA	25
3.5 CRITERIO PARA DISTINGUIR LOS FLUJOS HOMOGENEO Y HETEROGENEO	26
3.6 MEZCLAS HOMOGENEAS	29
3.7 MEZCLAS HETEROGENEAS	36

	PAGINA
4. ASPECTOS GENERALES DE LA CORROSION Y ABRASION EN TUBERIAS	
4.1 INTRODUCCION	46
4.2 MECANISMO DE CORROSION	47
4.3 MECANISMO DE ABRASION	49
4.4 CONTROL DE LA CORROSION	53
4.5 CONTROL DE LA ABRASION	55
5. EJEMPLO DE APLICACION	57
6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	71
REFERENCIAS	73

# 1. INTRODUCCION

## 1.1 ANTECEDENTES Y APLICACIONES GENERALES

El costo de transportación de materiales sólidos desde sus fuentes de explotación hasta el lugar de su utilización es un factor importante que debe tomarse en cuenta en su costo. Durante las dos últimas décadas se ha observado un aumento en el transporte de material sólido por medio de tuberías, lo cual ha permitido un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, y actualmente se presenta como una posible alternativa en comparación con las formas convencionales de transportación. El transporte de sólidos por tuberías se realiza mezclándolos con algún fluido, generalmente

agua, y ha tenido una amplia y variada aplicación en la industria, destacando entre ellas el transporte de minerales, disposición de desechos, cenizas, mezclas de cemento y transporte de granos. Los sistemas de tuberías son también empleados para el manejo de materiales en proceso y productos en industrias como la del papel, petróleo, siderúrgica, alimentos, química, etc.

En México, las principales aplicaciones de los sistemas de tuberías para transporte de sólidos se han tenido en la industria minera y de la siderurgia, siendo los más importantes sistemas el de la Peña Colorada y el de las Truchas en el puerto Lázaro Cárdenas, Mich., ambos sistemas para transporte de mineral de hierro; el primero de ellos con una longitud aproximada de 40 km, diámetro de 20 cm (8") y una capacidad de transporte de  $1.8 \times 10^6$  ton/año, y el segundo con una longitud aproximada de 27 km, diámetro de 25 cm (10") y con capacidad de  $1.5 \times 10^6$  ton/año, los sistemas entraron en operación en 1974 y 1976 respectivamente. Además en proyecto se tiene el transporte de roca fosfórica en el estado de Baja California Sur.

## 1.2 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

Aunque el objetivo del presente trabajo es el análisis hidráulico de los sistemas de tuberías para el transporte de sólidos, es conveniente mencionar las consideraciones necesarias que deben tomarse en cuenta para el diseño de ellos.

En la explotación de cualquier recurso natural es, generalmente, posible identificar tres etapas. La primera es una etapa de preparación, donde el material es obtenido y procesado, de tal forma - que pueda ser utilizado en las siguientes etapas; la segunda es - la transportación del producto y la tercera es la utilización del producto. Dentro de la segunda etapa, y en especial para el transporte de sólidos por medio de tuberías, las principales consideraciones que deben tenerse en cuenta en su diseño, se podrían resumir de la siguiente manera:

## 1. Condiciones del proceso

### A. Hidráulicas

1. Selección del fluido para transportar el material
2. Selección del tamaño de partículas y concentración de la mezcla.
3. Determinación de la velocidad de diseño
4. Determinación de las pérdidas por fricción

### B. Corrosión y abrasión

1. En la tubería
2. En las bombas

### C. Degradación de las partículas

## 2. Consideraciones mecánicas

- A. Selección del tipo de bombas
- B. Selección del número y ubicación de las estaciones de bombeo.
- C. Planta de energía
- D. Establecimiento del procedimiento de construcción del sistema.
- E. Controles de operación

## III. CONSIDERACIONES DE OPERACION

- A. Selección del tipo de operación
- B. Establecimiento y desarrollo de técnicas de paros y arranques.
- C. Selección de procedimientos de emergencia

Aunque del resumen anterior se observa que la Hidráulica de las mezclas es solamente una pequeña parte del total de los requerimientos que se deben cumplir en sistemas para transporte de sólidos, ésta tiene repercusión en muchas de las consideraciones que se hacen, por ello la gran importancia que la parte hidráulica representa en el diseño de este tipo de sistemas.

### 1.3 OBJETIVO

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de este trabajo es el análisis hidráulico de los sistemas para el transporte de sólidos,



presentándose un panorama de los estudios existentes en la materia, limitándose a la transportación de sólidos no cohesivos, y excluyendo el análisis de las reacciones químicas que se presentan.

El trabajo está dividido en tres capítulos además de éste. En el capítulo 2, se describen y analizan las propiedades físicas de las partículas sólidas como unidad, en conjunto y de su mezcla con algún fluido, además se presenta también el análisis de las características hidráulicas de la mezcla. En el capítulo 3 se presentan los métodos más usuales en el análisis del comportamiento de la mezcla, que puede ser homogénea o heterogénea, y en el último capítulo se hace una descripción de los aspectos de corrosión y abrasión de las tuberías. El trabajo se complementa con un ejemplo de aplicación en una situación real de transporte de sólidos por medio de tuberías.

## 2. ASPECTOS GENERALES DE LAS MEZCLAS DE PARTICULAS SOLIDAS CON LIQUIDOS

### 2.1 INTRODUCCION

El flujo de algún fluido con partículas sólidas por tuberías difiere del de líquidos en varios aspectos. En el flujo de líquidos la distribución de velocidades está definida y la naturaleza del flujo (laminar, turbulento o transición) puede ser determinada en base a las propiedades físicas del fluido y de la tubería. En cambio la caracterización del flujo de mezclas no es tan simple, ya que las propiedades del líquido y de las partículas sólidas están superpuestas.

Existen dos tipos de comportamiento en el flujo de mezclas; uno es el flujo homogéneo que se caracteriza porque la mezcla contiene partículas sólidas distribuidas uniformemente en el medio líquido, este tipo de flujo o una aproximación cercana a él es encontrada en mezclas con alta concentración de sólidos y tamaño fino de partículas; algunos ejemplos típicos de este tipo de mezclas son los lodos de desecho, lodos de perforación, lechadas de cemento, etc. El segundo es el flujo heterogéneo donde las partículas sólidas de las mezclas no se encuentran distribuidas uniformemente a través de la sección transversal de la conducción ya que algunas de ellas fluyen arrastrándose sobre el fondo de la tubería y otras en suspensión; en este tipo de flujo el fluido de transporte y las partículas sólidas mantienen sus propiedades separadas. Generalmente las mezclas heterogéneas tienden a ser de baja concentración de sólidos y la distribución de los tamaños de éstos es más grande que la que se maneja en las mezclas homogéneas.

El conocimiento del comportamiento de las partículas sólidas en un fluido es importante en el diseño de tuberías para transporte de mezclas, por lo que debe realizarse una determinación cuidadosa de este comportamiento. En este capítulo se describirán las más importantes propiedades individuales de las partículas sólidas y las de su mezcla con algún fluido, su efecto en el diseño de las tuberías y los métodos para la determinación de dichas propiedades.

## 2.2 PROPIEDADES FISICAS DE LAS PARTICULAS SOLIDAS

### 2.2.1 PESO ESPECIFICO

El peso específico de una partícula es la relación entre su peso y su volumen, se expresa en  $\text{kgf/m}^3$ , y se designa por  $\delta_s$ .

### 2.2.2 MASA ESPECIFICA O DENSIDAD

Es la relación entre la masa de la partícula y su volumen, se expresa en  $\text{kgf seg}^2/\text{m}^4$ , y se designa como  $\rho_s$ .

### 2.2.3 DENSIDAD RELATIVA

Es la relación entre el peso o masa específica de la partícula sólida y el peso o masa específica del agua a  $4^\circ \text{C}$ .

### 2.2.4 FORMA

La forma de una partícula tiene influencia sobre la fuerza de arrastre necesaria para provocar su movimiento dentro de la tubería. Se han realizado investigaciones<sup>1, 2</sup> muy extensivas sobre el efecto de la forma de las partículas en el arrastre de las mismas. Las formas geométricamente regulares han sido estudiadas analíticamente y experimentalmente, mientras que las de forma irregular, que son las de mayor interés en el diseño de tuberías para mezclas, sólo han sido estudiadas experimentalmente.

El efecto de la forma irregular de las partículas se ha determinado experimentalmente por el uso del llamado factor de forma S.F. sugerido por McNown<sup>1,2</sup> que se define como:

$$S.F. = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (2.1)$$

donde a, b, c, son tres longitudes de la partícula, medidas en tres direcciones perpendiculares, haciendo coincidir una de ellas con su máxima longitud, a es la máxima longitud, c la mínima y b la dimensión restante.

Las principales conclusiones de los estudios sobre la forma de las partículas se resumen en una gráfica, ver fig. 2.1, del coeficiente de arrastre contra el número de Reynolds para partículas con distintos factores de forma.

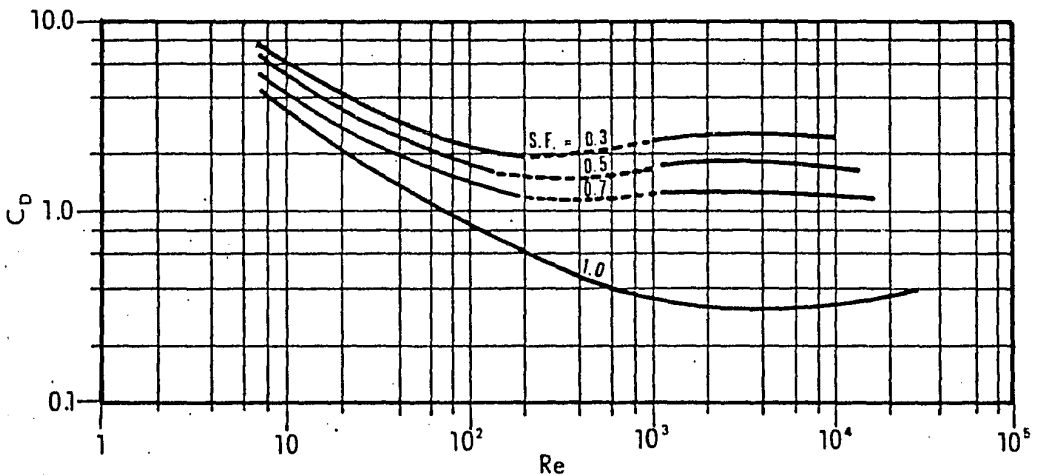


fig. 2.1 Coeficiente de Arrastre-Número de Reynolds para distintos Factores de Forma

El número de Reynolds de la partícula, en la fig. 2.1, es obtenido usando el diámetro nominal de la misma, o sea

$$Re = \frac{V d_n}{\nu} \quad (2.2)$$

donde

V velocidad del flujo, en m/seg

$d_n$  diámetro nominal de la partícula, en m

$\nu$  viscosidad cinemática del fluido, en  $m^2/seg$

#### 2.2.5 TAMAÑO

El tamaño de las partículas sólidas que son transportadas por medio de tuberías varía desde el límite para las arenas hasta partículas coloidales. El principal efecto del tamaño de las partículas se tiene en la velocidad de caída.

#### 2.2.6 VELOCIDAD DE CAIDA

La velocidad de caída es la máxima velocidad que adquiere una partícula al caer dentro del agua, y se designa como  $\omega$ . La velocidad de caída se alcanza cuando el peso sumergido de la partícula se equilibra con la fuerza de empuje que el agua ejerce sobre ella.

La velocidad de caída toma en cuenta no sólo el peso de las partícula, sino también su tamaño y forma, existiendo expresiones para de-

terminarla cuando se trata de partículas esféricas, o por medio de una gráfica para partículas de forma irregular.

Para partículas de forma esférica la velocidad de caída se obtiene por medio de la siguiente expresión.

$$\omega = \left( \frac{4 g \Delta D}{3 C_D} \right)^2 \quad (2.3)$$

donde

$\omega$  velocidad de caída, en m/s

D diámetro de la partícula, en m

$C_D$  coeficiente de arrastre, adimensional

$$\Delta = \frac{\delta_s - \delta}{\delta}$$

$\delta_s$  peso específico de las partículas sólidas, en  $\text{kgf/m}^3$

$\delta$  peso específico del agua, en  $\text{kgf/m}^3$

Sin embargo, al igual que en el caso de la forma de la partícula en el diseño de tuberías para transporte de sólidos, interesan más las partículas de forma irregular, cuya velocidad de caída puede obtenerse utilizando las figs. 2.2, 2.3 y 2.4. El uso de dichas figuras - será explicado por medio de un ejemplo, que se desarrolla en el capítulo referente al ejemplo de aplicación.

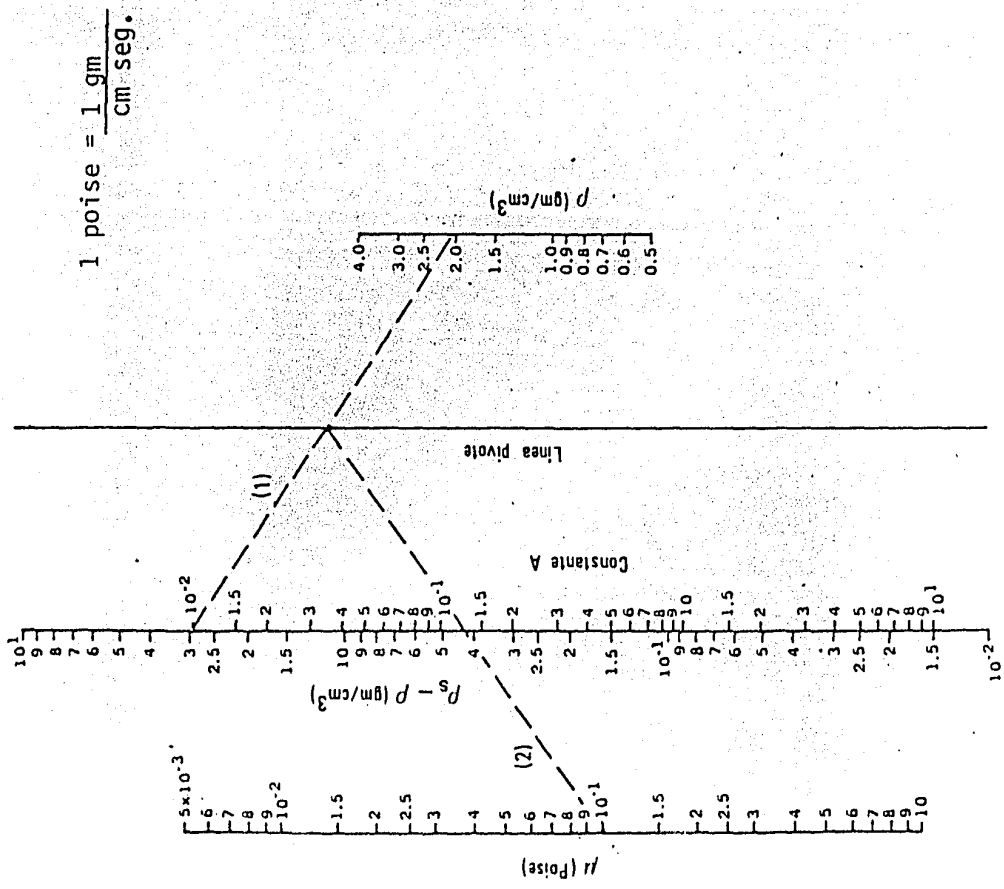


fig. 2.2 Solución gráfica de la Constante A

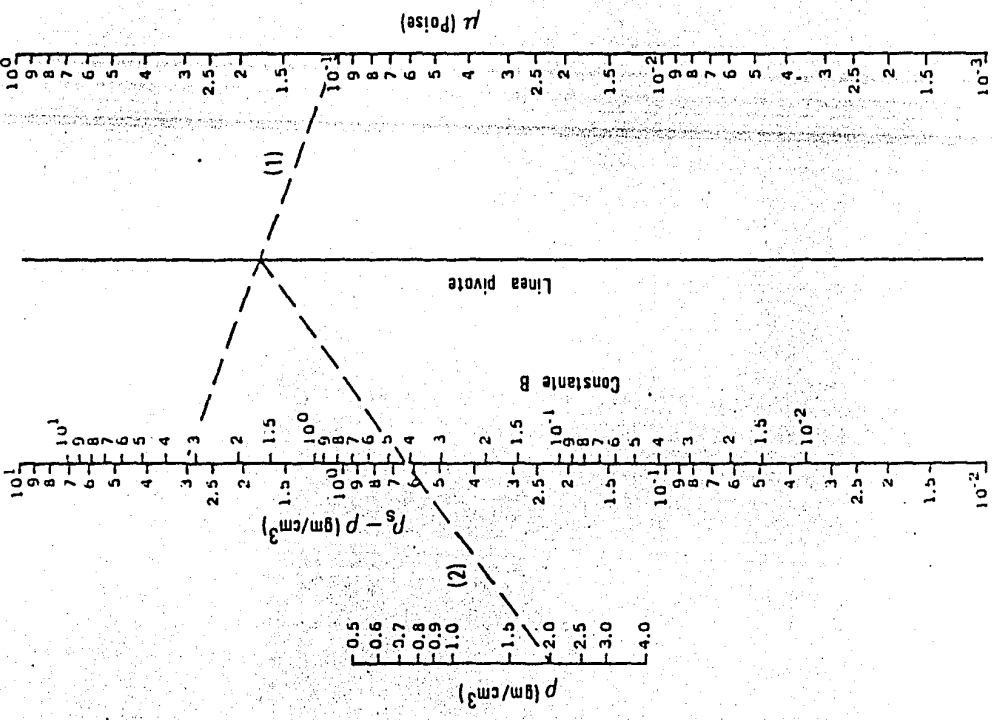


fig. 2.3 Solución gráfica de la Constante B



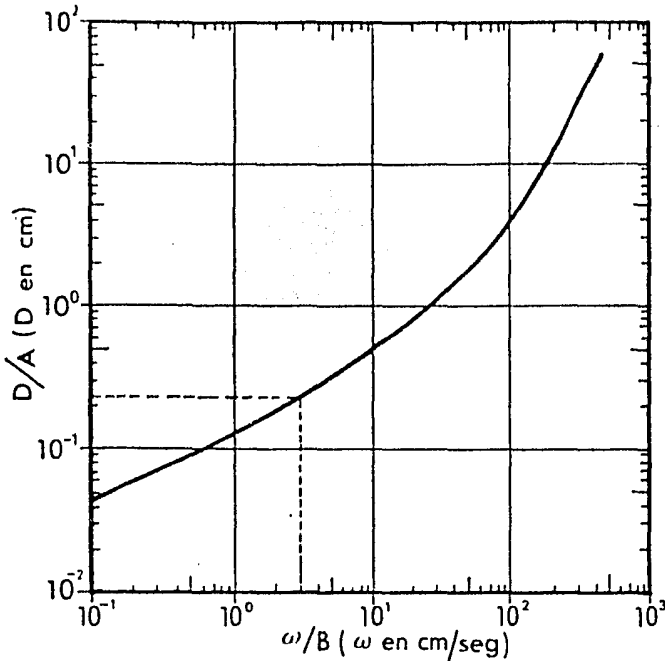


fig. 2.4 Solución gráfica para la Velocidad de Caída

### 2.2.7 FUERZA DE ARRASTRE

El arrastre es la componente de la fuerza ejercida en la dirección del flujo sobre la partícula por el fluido en movimiento. La fuerza de arrastre a la que es sometida una partícula es una cantidad difícil de determinar ya que depende de factores difíciles de analizar, como por ejemplo, el comportamiento de la capa límite que se forma cerca de la superficie de la partícula siendo, por tanto, necesaria para su determinación la utilización de resultados de estudios experimentales. De acuerdo a dichos estudios<sup>1,2</sup> es ampliamente aceptado calcular la fuerza de arrastre por medio de la siguiente expresión.

$$R = C_D A_p \frac{\rho_s V}{2} \quad (2.4)$$

donde

- R fuerza de arrastre, en kgf
- $C_D$  coeficiente de arrastre, adimensional
- $A_p$  área de la partícula proyectada normalmente a la dirección del flujo, en  $m^2$
- $\rho_s$  densidad, en  $kgf \text{ seg}^2/m^4$
- V. velocidad del flujo, en m/seg

El coeficiente de arrastre varía según la forma de las partículas, - obteniéndose de estudios experimentales unas relaciones de este coeficiente con el número de Reynolds, los resultados obtenidos se han presentado generalmente, en forma gráfica. En la fig. 2.5 se presenta una relación  $C_D$ -Re para partículas esféricas y en la fig. 2.1 para partículas que tienen distintos factores de forma.

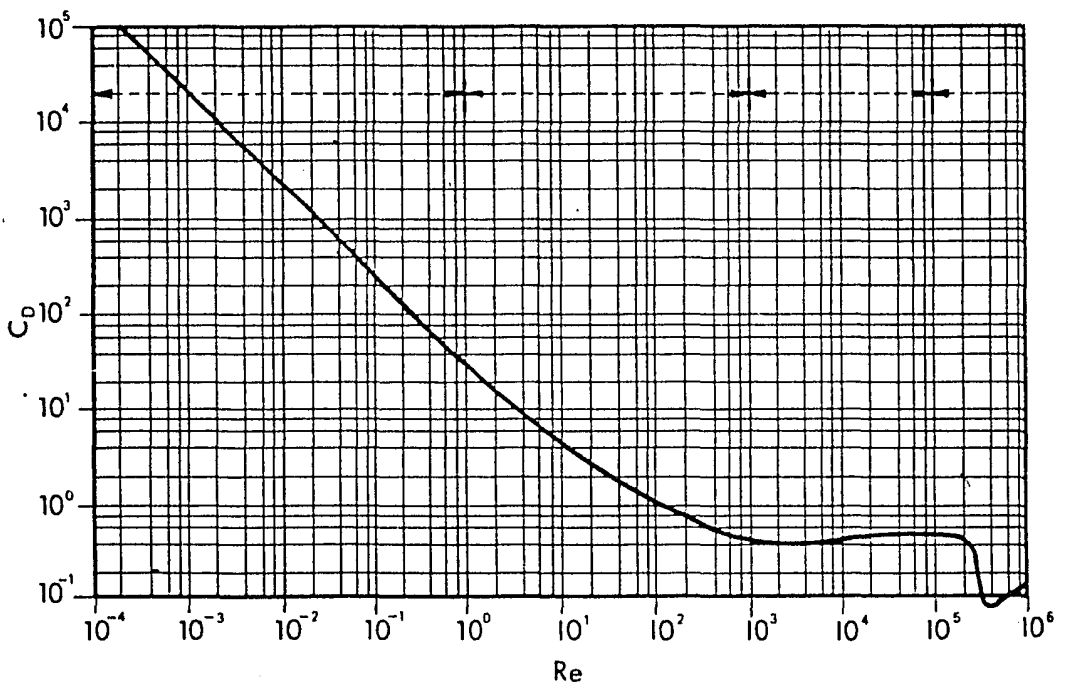


fig. 2.5 Coeficiente de Arrastre-Número de Reynolds para partículas esféricas

## 2.3 PROPIEDADES FISICAS DE LAS MEZCLAS

### 2.3.1 CONCENTRACION

La concentración de la mezcla es la cantidad de partículas contenidas dentro del fluido, se puede expresar en volumen,  $C_v$  o en peso,  $C_w$  siendo más fácil obtenerla en este último. Ambas se pueden expresar en  $\text{kgf/m}^3$  o en  $\text{kgf/l}$ , y están definidas por las siguientes ecuaciones

$$C_v = \frac{\text{volumen de las partículas sólidas}}{\text{volumen de la mezcla}} \quad (2.5a)$$

$$C_w = \frac{\text{peso de las partículas sólidas}}{\text{peso de la mezcla}} \quad (2.5.b)$$

Existe otra forma usual de indicar la concentración que es en partes - por millón (ppm), también se puede expresar en peso o en volumen y ambas se definen como

En peso

$$1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ miligramo}}{1 \text{ litro}} = \frac{1 \text{ gf}}{1 \text{ m}^3} = 10^{-3} \text{ kgf/m}^3 \quad (2.5c)$$

En volumen

$$1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ mililitro}}{\text{m}^3} = 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (2.5d)$$

Para determinar la concentración en peso es necesario separar el material sólido y pesarlo, por lo que se tendrá que filtrar o decantar,

y no evaporar el líquido ya que en este caso en los sólidos quedarían también las sales disueltas en el fluido.

### 2.3.2 PESO ESPECIFICO DE LA MEZCLA

El peso específico de la mezcla,  $\delta_m$  se puede obtener relacionando - el peso de la mezcla, del líquido y de las partículas, o sea,

$$\delta_m V_m = \delta_a V_a + \delta_s V_s \quad (2.6)$$

donde

$\delta$  peso específico

$V$  volumen

Los subíndices  $m$ ,  $a$  y  $s$ , indican lo correspondiente a la mezcla, fluidos y partículas sólidas.

De la relación anterior se tiene que

$$\delta_m = \delta_a + \frac{V_s}{V_m} (\delta_s - \delta_a) \quad (2.6a)$$

ya que

$$V_a = V_m - V_s \quad (2.7)$$

y como la concentración, expresada en peso, de la mezcla es

$$C_w = \frac{\delta_s V_s}{\delta_a V_m} \quad (2.8)$$

Finalmente la relación para determinar el peso específico de la mezcla se expresa como

$$\delta_m = \delta_a + \delta_a C_w - \frac{\delta^2 C_w}{\delta_s} \quad (2.9)$$

### 2.3.3 DENSIDAD DE LA MEZCLA

Aunque la densidad de la mezcla puede ser medida directamente por técnicas convencionales, en ellas es necesario tener cuidado que al medirla las partículas sólidas de la mezcla estén distribuidas uniformemente para poder obtener un valor más real de la densidad.

En la práctica se recomienda obtener la densidad de la mezcla en base a las densidades propias de cada uno de sus componentes y para una determinada concentración, por medio de la siguiente ecuación.

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{100 - C_w}{\rho_a}} \quad (2.10)$$

donde

$\rho_m$  densidad de la mezcla, en  $\text{kgf seg}^2/\text{m}^4$

$C_w$  concentración de sólidos, expresada en peso y porciento

$\rho_s$  densidad de sólidos, en  $\text{kgf seg}^2/\text{m}^4$

$\rho_a$  densidad del fluido, en  $\text{kgf seg}^2/\text{m}^4$

#### 2.3.4 VISCOSIDAD DE LA MEZCLA

Dada la naturaleza compleja de una mezcla es difícil definir el concepto de viscosidad de la misma. Sin embargo no es difícil comprender que la presencia de partículas en un fluido incrementa la resistencia de éste a fluir, es decir su viscosidad.

Hasta ahora sólo se ha estudiado la viscosidad de mezclas que contienen partículas esféricas uniformes, y que además generalmente presentan características newtonianas, este tipo de mezclas es poco común en la práctica, pero su estudio es de importancia dado que el valor de su viscosidad representa el valor mínimo de la viscosidad de mezclas con características no-newtonianas, que son más comunes.

Para mezclas con partículas esféricas muy diluidas, y con concentraciones menores de 1.0% expresadas en volumen, Einstein<sup>2</sup> propuso la siguiente expresión para obtener la viscosidad dinámica de la mezcla.

$$\mu_m = \mu_a (1 + 2.5 C_v) \quad (2.11)$$

donde

$\mu_m$  viscosidad dinámica de la mezcla, en Kgf seg/m<sup>2</sup>

$\mu_a$  viscosidad dinámica del fluido a la misma temperatura de la mezcla, en Kgf seg/m<sup>2</sup>

Para concentraciones mayores, Ward<sup>2</sup> propuso una relación similar a la anterior, dada como:

$$\mu_m = \mu_a (1 + 4.5 C_v) \quad (2.11a)$$

Del análisis de una gran cantidad de datos Thomas<sup>2</sup> sugirió la siguiente expresión para determinar la viscosidad de la mezcla

$$\frac{\mu_m}{\mu_a} = 1 + 2.5 C_v + 10.05 C_v^2 + 0.00273 e^{16.6 C_v} \quad (2.12)$$

Esta última expresión es la más utilizada para obtener la viscosidad de las mezclas en la solución de problemas reales

### 3. FLUJO DE MEZCLAS HOMOGENEAS Y HETEROGENEAS

#### 3.1 INTRODUCCION

Considerando una tubería horizontal por la que ha escurrido una mezcla de agua y partículas sólidas, ésta presenta un estado donde la parte inferior del tubo está cubierta de una capa formada por las partículas sólidas, mientras que el resto del tubo está lleno con agua; si ésta empieza a fluir nuevamente, se ejercerán fuerzas hidrodinámicas sobre las partículas asentadas en la parte inferior de la tubería; al aumentar la velocidad del flujo se provoca un incremento en la magnitud de esas fuerzas capaz de empezar a mover las partículas. Inicialmente se moverán las partículas de la parte superior de la capa asentada, llegando el movimien



to hasta el fondo de la capa. En la condición de movimiento inicial de la capa, las partículas estarán bajo la acción de fuerzas hidrodinámicas de sustentación, arrastre y peso de las partículas, como se muestra en fig. 3.1.

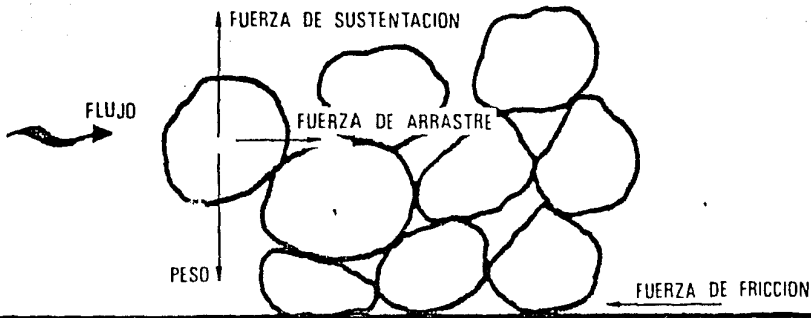


fig. 3.1 Diagrama de fuerzas sobre las partículas en la condición de movimiento inicial

Al iniciarse el escurrimiento de la mezcla ocurre un cambio de energía en energía calorífica, a este cambio se le conoce como pérdidas de energía o pérdidas por fricción, las cuales son función de las características de la tubería (diámetro, longitud y material) y de la velocidad de flujo.

Considerando las pérdidas por fricción como función tan solo de la velocidad del flujo y tomando un caso particular como por ejemplo, una mezcla de agua y arena con un diámetro de 2.0 mm, se tendría lo siguiente (ver fig. 3.2).

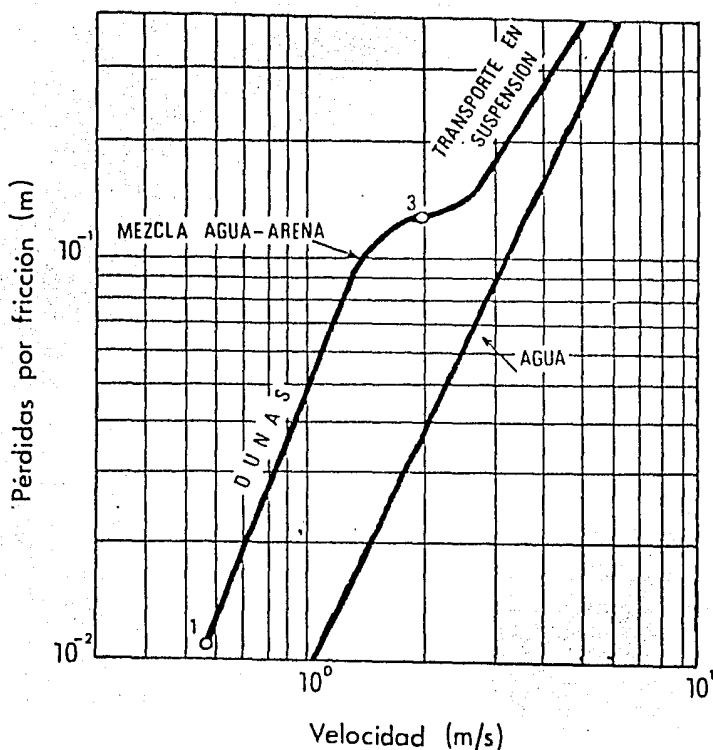


fig. 3.2 Relación Pérdidas por Fricción-Velocidad de Flujo para una mezcla de agua y arena con  $d = 2.0\text{mm}$

El punto 1 de la gráfica de la fig. 3.2 representa la condición de movimiento inicial, al incrementarse la velocidad de flujo las pérdidas se incrementan proporcionalmente, observándose en este inicio que en la capa asentada aparecen deformaciones en forma de pequeñas dunas las cuales son barridas al incrementarse la velocidad de flujo<sup>2</sup>.

Después de esta parte inicial de la gráfica, existe una discontinuidad, en donde para incrementos de velocidad se tienen cambios

imperceptibles en las pérdidas, es en esta parte donde se inicia el movimiento total de la capa de partículas depositadas y dentro de esta zona existe una velocidad para la cual aún pueden ocurrir depósitos de partículas (punto 3), a esta velocidad se le llama velocidad crítica.

Para las velocidades correspondientes a la parte superior de la gráfica, todas las partículas son transportadas en suspensión y las pérdidas son proporcionales a la velocidad.

Para velocidades menores a la velocidad crítica ocurren depósitos de partículas y el transporte de éstas es debido a un intercambio entre partículas de la capa asentada y partículas que viajan en suspensión.

De lo mencionado anteriormente si la distribución de las partículas es uniforme a través de la sección transversal del tubo se trata de un flujo homogéneo, y si no lo es, el flujo es heterogéneo.

En la gráfica de la fig. 3.2 se presenta, por simple comparación la relación correspondiente al flujo de agua limpia, y como es de esperarse se tienen pérdidas de energía menores.

Dentro de este capítulo se describen los principales métodos que permiten predecir las pérdidas por fricción, así como los crite-

rios para evaluar la velocidad crítica, mencionando la utilidad de cada uno de ellos.

### 3.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Es conveniente en el diseño de cualquier sistema que conduzca una mezcla de sólidos y líquidos el establecimiento de un procedimiento de cálculo para el mismo; para el caso de una tubería que transporta una mezcla, se han propuesto diversos procedimientos, la mayor parte de ellos son semejantes entre sí. A continuación se presenta una recopilación de los pasos más importantes y comunes en ellos.

- 1.- Selección de la concentración de la mezcla.
- 2.- Selección del diámetro preliminar de la tubería, determinado en función del requerimiento del sistema.
- 3.- Clasificación de la mezcla, homogénea o heterogénea
- 4.- Determinación de la velocidad crítica de flujo
- 5.- Determinación de la velocidad de diseño
- 6.- Determinación de las pérdidas por fricción.
- 7.- Cálculo del gradiente de presión, ubicación de las estaciones de bombeo y determinación de la potencia de las bombas
- 8.- Determinación de los porcentajes de corrosión y abrasión de la tubería.

A continuación se examinarán cada uno de estos pasos, los pasos 4, 5 y 6 se tratarán por separado para mezclas homogéneas y heterogéneas, el resto de los pasos se tratarán conjuntamente para ambos tipos de mezclas.

### 3.3 SELECCION DE LA CONCENTRACION DE LA MEZCLA

Como un criterio general se ha establecido que las mezclas con partículas sólidas donde el 25% de ellas pase por la malla 325, pueden transportarse fácilmente si la concentración expresada en volumen es cercana al 40%. Para mezclas con características distintas a la mencionada debe hacerse un análisis de su viscosidad y concentración para poder determinar si bajo esas condiciones es adecuada transportarla.

### 3.4 SELECCION DEL DIAMETRO DE LA TUBERIA

El diámetro preliminar de la tubería puede obtenerse en función del gasto de diseño y de la velocidad de flujo. El gasto de diseño depende de la cantidad de partículas sólidas a ser transportadas y de la concentración de su mezcla con algún fluido, el gasto variará para cada sistema de transporte que se tenga, mientras que para la velocidad de flujo se recomienda<sup>3</sup> considerar una velocidad de flujo dentro del rango de 1.2 a 2.2 m /seg como primera aproximación siendo necesario, posteriormente, verificar que la velocidad de flujo seleccionada sea mayor que la velocidad crítica para evitar asentamiento de las partículas sólidas.

### 3.5 CRITERIO PARA DISTINGUIR LOS FLUJOS HOMOGÉNEO Y HETEROGÉNEO

Se ha mencionado que un flujo puede ser homogéneo o heterogéneo, por ello es conveniente establecer un criterio para diferenciarlos y poder aplicar el procedimiento de cálculo adecuado, según sea el caso.

Es difícil adoptar un criterio único para realizar esta distinción, dado que existe una gran cantidad de ellos, la mayoría obtenidos en base a observaciones y experimentos de personas que han llevado a cabo estudios dentro de este campo. A continuación se describen los criterios más aceptados en el diseño de una tubería para transporte de mezclas.

#### a) CRITERIO DE GOVIER<sup>1</sup>

Se basa en la velocidad de caída de las partículas dentro del fluido de transporte, estableciendo como mezcla homogénea aquella en donde la velocidad de caída es menor a  $0.6 \times 10^{-3}$  m/seg y como mezclas heterogéneas aquellas en donde la velocidad de caída es mayor del valor indicado.

#### b) CRITERIO DE DURAND<sup>7</sup>

Establece la distinción entre las mezclas utilizando una fracción del tamaño de las partículas, y considera que una mezcla con tamaños de

partículas menores de 20 a 30 micras ( $1 \text{ micra} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ), se comportan como una mezcla homogénea, y mayores de 200 micras como mezclas heterogéneas. En el rango intermedio de los valores dados el comportamiento de la mezcla puede ser tanto homogénea como heterogénea dependiendo de las características específicas del sistema, tales como concentración de sólidos, diámetro del tubo velocidad de flujo, etc.

c) CRITERIO DE THOMAS<sup>5</sup> Y CHARLES<sup>6</sup>

Sugieren hacer la distinción en base a la relación velocidad de caída de las partículas sólidas ( $\omega$ ) y la velocidad al cortante del flujo ( $U_*$ ) ésta última dada por la siguiente relación.

$$U_* = \frac{V}{\sqrt{f/2}} \quad (3.1)$$

donde

- $U_*$  velocidad al cortante, en m/seg
- $V$  velocidad media del flujo, en m/seg
- $f$  factor de fricción, función ( $Re, \epsilon/D$ )

Thomas propone que para  $\frac{\omega}{U_*} > 0.20$  la mezcla se considere como mezcla heterogénea y Charles en base a los resultados de sus pruebas sugiere modificarla a  $\frac{\omega}{U_*} > 0.13$ . Para valores menores de esta relación, según el criterio adoptado, la mezcla será homogénea.

d) CRITERIO DE WASP<sup>1</sup>

Este criterio es tal vez el más confiable para determinar la homogeneidad y heterogeneidad de las mezclas, está basado en la relación  $C/C_A$  la cual es igual a:

$$\log \frac{C}{C_A} = \frac{-1.8 \omega}{\chi U_*} \quad (3.2)$$

donde

- C      concentración de sólidos, en volumen
- $C_A$     concentración de sólidos en volumen
- $\omega$       velocidad de caída de las partículas, en m/seg.
- $U_*$     velocidad al cortante, en m/seg
- $\chi$       constante de Von Karman, igual a 0.4

Vanoni e Ismail<sup>1,2</sup> han observado que el valor de la constante de Von Karman decrece con la presencia de partículas sólidas en suspensión, sin embargo el grado de reducción de su valor no tiene influencia significativa en la ec. 3.2, por lo que se recomienda tomar un valor igual a 0.4.

La aceptación que tiene este criterio es debida a la gran cantidad de pruebas realizados por Wasp respecto a la relación  $C/C_A$  por medio de las cuales han demostrado que las mezclas heterogéneas presentan valores de  $C/C_A$  de 0.10 o menores, mientras que en las homogéneas al valor de  $C/C_A$  es mayor de 0.10



### 3.6 MEZCLAS HOMOGENEAS

Se ha establecido anteriormente que una mezcla homogénea es aquella que no presenta una marcada concentración de sólidos a lo largo del eje de la tubería. En la fig. 3.3 se presenta la relación entre las pérdidas por fricción y la velocidad del flujo para una mezcla homogénea.

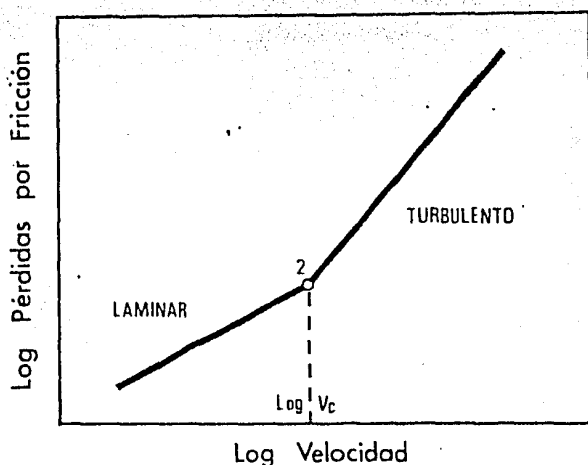


fig. 3.3 Relación Pérdidas por Fricción-Velocidad para una Mezcla Homogénea

En el rango de velocidades bajas el flujo es laminar, hasta el punto 2 donde existe un cambio a turbulento, a dicho punto corresponde la velocidad crítica de transporte  $V_C$ . Para velocidades mayores a la crítica las partículas son transportadas en suspensión. Una velocidad del flujo menor que la crítica puede ser aceptable, teniendo-se en estos casos un límite bajo de seguridad en su operación, por ello se recomienda que la velocidad de diseño sea mayor que la crítica, por lo que es necesario establecer algún criterio para evaluar esta última.

### 3.6.1 Velocidad crítica

La velocidad con que ocurre la transición de flujo laminar a turbulento en una mezcla homogénea está en función del número de Reynolds,  $(Re = \frac{VD}{\nu})$ , y como la mayoría de las mezclas homogéneas presentan características de fluido no-newtoniano, que es aquel en el cual el esfuerzo cortante no es proporcional al gradiente transversal de velocidades, será este tipo de fluidos el que se considere dentro de este análisis.

La velocidad crítica puede obtenerse por medio del método propuesto por Hanks<sup>8</sup>, que encontró que en la zona de transición esta velocidad dependía de un parámetro o número adimensional que fue propuesto por Hedstrom, conocido como "Número de Hedstrom", expresado como

$$He = \frac{\tau_0 \rho D^2}{\eta^2} \quad (3.3)$$

donde

- He número de Hedstrom, adimensional
- $\tau_0$  esfuerzo cortante sobre el fondo, en Kgf/m<sup>2</sup>
- $\rho_m$  densidad de la mezcla, en Kgf seg<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>
- D diámetro del tubo, en m
- $\eta$  coeficiente de rigidez, en Kgf seg /m<sup>2</sup>

La ec. 3.3 puede ser expresada en función del número de Reynolds como

$$He = \frac{D V \rho}{\eta} \frac{\tau_0/\eta}{V/D} \quad (3.4)$$

donde

V velocidad media de flujo

El primer término del segundo miembro de la ec. 3.4 es semejante al número de Reynolds definido en base al coeficiente de rigidez ( $\eta$ ), el segundo término se conoce como número de plasticidad (PI).

Hanks y Pratt<sup>10</sup> realizaron el análisis de una gran cantidad de datos publicados sobre el flujo de mezclas en tuberías, y sus resultados se resumen en una gráfica del número de Reynolds crítico  $(Re)_c$  como función del número de Hedstrom, ver fig. 3.4. La línea gruesa - en dicha figura corresponde a la curva ajustada a dichos puntos por medio de las siguientes ecuaciones:

$$(Re)_c = \frac{1 - (4/3)\alpha_c + (1/3)\alpha_c}{\alpha_c} He \quad (3.5a)$$

$$He = 16\,800 \frac{\alpha_c}{(1 - \alpha_c)^3} \quad (3.5b)$$

$$\alpha_c = \frac{\tau_o}{(\tau_w)_c} \quad (3.5c)$$

donde

$(Re)_c$  Número de Reynolds crítico

He Número de Hedstrom

$\alpha_c$  Relación del esfuerzo de fluencia al esfuerzo cortante en las paredes del tubo para la velocidad crítica

$\tau_o$  esfuerzo de fluencia

$(\tau_w)_c$  esfuerzo cortante en las paredes del tubo para la velocidad crítica

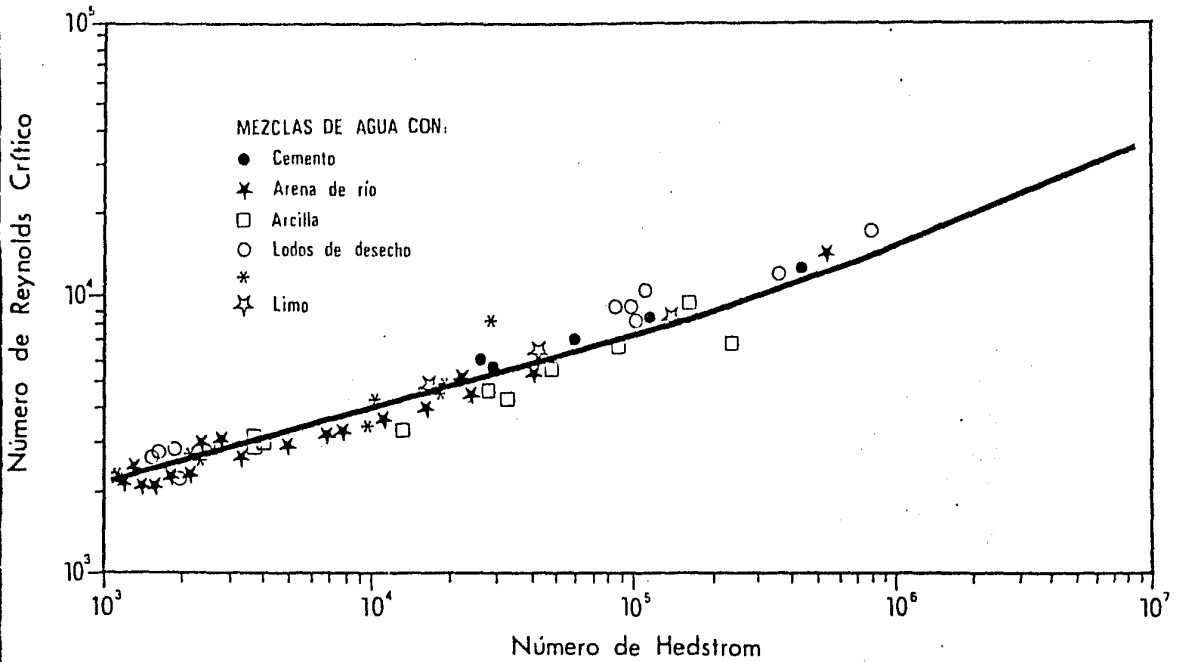


fig. 3.4 Variación del Número de Reynolds Crítico con el Número de Hedstrom para distintas mezclas

Las ecs. 3.5a, 3.5b, 3.5c, o la fig. 3.4 permiten calcular el número de Reynolds crítico o el número de Hedstrom una vez conocidas las propiedades físicas de la mezcla y de la tubería. La velocidad crítica se obtiene de la expresión del número de Reynolds crítico, o sea.

$$(Re)_c = \frac{D V_c \rho}{\eta} \quad (3.6)$$

Thomas<sup>11</sup> demostró que el empleo de una viscosidad efectiva,  $\mu_e$ , - en lugar del coeficiente de rigidez,  $\eta$ , para definir el número de Reynolds crítico da una aproximación aceptable en la obtención de la velocidad crítica.

La viscosidad efectiva de las mezclas está dada por

$$\mu_e = \eta \left( 1 + \frac{\tau_o D}{\delta \eta V} \right) \quad (3.7)$$

Pero en la mayoría de las mezclas el término  $\frac{\tau_o D}{\delta \eta V}$  es mucho mayor que la unidad, por tanto, la ec. 3.7 puede ser expresada como

$$\mu_e = \frac{\tau_o D}{\delta V} \quad (3.7a)$$

y que en la zona de transición es igual a

$$\mu_e = \frac{\tau_o D}{\delta V_c} \quad (3.7b)$$

Sustituyendo la ec. 3.7b en la 3.6, se tiene

$$(Re)_c = \frac{D V_c \rho}{\mu_e} = \frac{\delta V_c^2 \rho}{\tau_o} \quad (3.8a)$$

Despejando a  $V_c$

$$V_c = \sqrt{\frac{(Re)_c \tau_o}{\delta \rho}} \quad (3.8b)$$

Los dos procedimientos, por número de Hedstrom y la ecuación 3.8b, son empleados para predecir la velocidad crítica sin embargo de - comparaciones hechas con las velocidades críticas observadas, se ha comprobado que el primero de los procedimientos da una mejor - aproximación y no implica que la ec. 3.7 sea poco confiable, ya - que la aproximación obtenida con ella es aceptable.

### 3.6.2 Pérdidas por Fricción

La mayoría de los trabajos realizados para establecer un procedimiento que permita obtener las pérdidas por fricción en tuberías concluyen que éstas pueden ser calculadas por medio de la relación de Darcy-Weisbach, la cual está dada como:

$$\left(\frac{\Delta h}{\Delta L}\right)_m \frac{\delta}{\delta_m} = f \frac{V^2}{2gD} \quad (3.9)$$

donde

- $\Delta h$  pérdidas de energía, en m
- $\Delta L$  longitud de la tubería, en m
- $\delta$  peso específico del fluido, en  $\text{kgf/m}^3$
- $\delta_m$  peso específico de la mezcla, en  $\text{kgf/m}^3$
- $f$  factor de fricción, adimensional
- $D$  diámetro del tubo, en m
- $V$  velocidad del flujo, en m/seg
- $g$  aceleración de la gravedad, en  $\text{m/seg}^2$
- $m$  subíndice referido a la mezcla

El término  $\left(\frac{\Delta h}{\Delta L}\right)_m \frac{\delta}{\delta_m}$  representa las pérdidas por fricción expresadas en términos de columna de la mezcla. El factor  $f$  puede obtenerse del diagrama de Moody, ver fig. 3.5, utilizando en el cálculo del número de Reynolds la viscosidad del agua por la de la mezcla, en el cálculo del factor  $f$  se requiere considerar la rugosidad del tubo que existirá durante la operación del sistema,

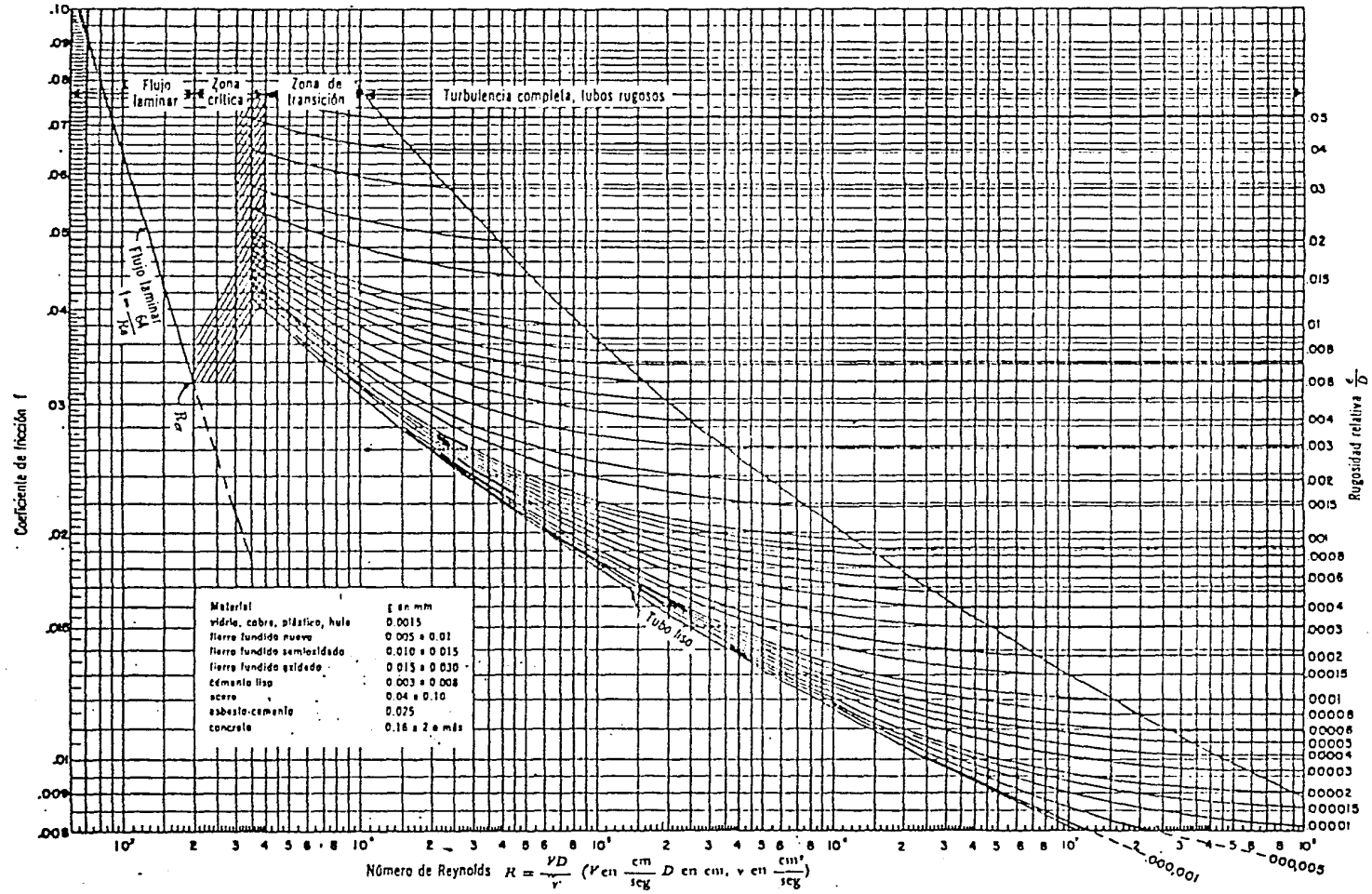


fig. 3.5 Coeficiente de Fricción para cualquier tipo y tamaño de tubo. Diagrama Universal de Moody

previéndose para ello el efecto de posibles depósitos, así como el uso de anticorrosivos.

Se ha demostrado experimentalmente<sup>1</sup> que si el factor de fricción  $f$  para la mezcla se considera igual al que se tendría si sólo se estuviera analizando el fluido, los errores en el cálculo no resultan de consideración

### 3.7 MEZCLAS HETEROGENEAS

Un aspecto importante en el flujo de mezclas heterogéneas es la orientación de los ejes de la tubería. En tuberías horizontales o cercanas a ello, las condiciones de flujo se complican debido a la influencia de la fuerza de gravedad sobre las partículas. En esta sección a menos que se indique otra cosa se tratará sólo el caso de tuberías horizontales.

El flujo de mezclas heterogéneas, como se indicó anteriormente, se caracteriza por presentar una marcada concentración de partículas sólidas a través del eje del tubo. Este tipo de comportamiento es el que presentan la mayoría de las aplicaciones comerciales del transporte de sólidos por tuberías.

La fig. 3.6 muestra la relación pérdidas por fricción - velocidad del flujo típica de las mezclas heterogéneas. Para altas velocidades como se muestra en la figura, la curva tiende hacia una posición paralela a la misma relación que se tiene si sólo estuviera -



escurriendo el fluido; ésto es debido a que con el incremento de velocidad la distribución de las partículas sólidas se hace más uniforme tendiendo hacia la homogeneidad.

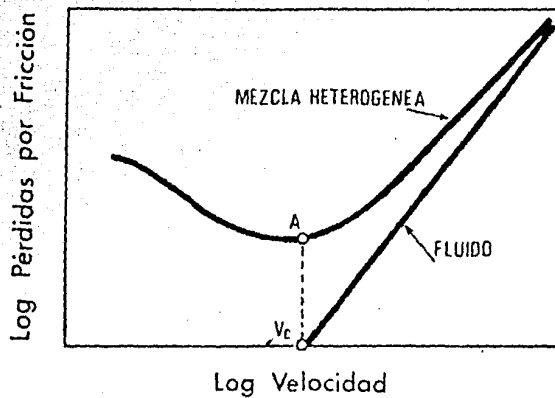


fig. 3.6 Relación Pérdidas por Fricción-Velocidad de una Mezcla Heterogénea

Al descender la velocidad de flujo, la concentración de partículas se incrementa en la parte baja de la tubería, y cuando la relación pérdidas por fricción - velocidad es la del punto A de la gráfica, de la fig. 3.6, empieza a formarse una capa de partículas en el fondo del tubo, la velocidad del flujo en este punto es llamada crítica. Si la velocidad se reduce más allá de ese punto la capa de partículas asentadas crece, y por lo tanto aumentan las pérdidas al reducirse el área de flujo.

A diferencia de la velocidad crítica de una mezcla homogénea, que corresponde a la transición entre el régimen de flujo laminar y turbulento, la velocidad crítica de una mezcla heterogénea es un fenómeno de flujo turbulento, ésto debido al efecto de la gravedad sobre las partículas sólidas.

### 3.7.1 Velocidad Crítica

La velocidad crítica de una mezcla heterogénea representa la velocidad mínima con que el sistema puede operar de tal forma que prevalezcan condiciones estables del flujo.

Se ha comprobado en la práctica que la variación de tamaños de las partículas sólidas de la mezcla tiene un cierto efecto sobre la velocidad crítica, por lo que se ha hecho necesario establecer un criterio para determinar dicha velocidad en mezclas con partículas de tamaño uniforme y otro para partículas de diversos tamaños.

- a) Velocidad crítica para mezclas con partículas de tamaño uniforme.

El criterio más generalizado para determinar la velocidad crítica en este caso es el debido a Durand<sup>7</sup>, que propone determinarla por medio de la siguiente expresión:

$$V_c = F_L \left( 2g D \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

donde

$V_c$  velocidad crítica, en m/seg

$F_L$  constante del sistema

$g$  aceleración de la gravedad, en m/seg<sup>2</sup>

$D$  diámetro del tubo, en m

$\rho_s$  densidad de sólidos, en Kgf seg<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>

$\rho$  densidad del líquido, en kgf seg<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>

La constante  $F_L$  varía de una mezcla a otra, como una función del tamaño de partículas y de la concentración de sólidos y por ello la ec. 3.10 puede escribirse como

$$F_L = \frac{V_c}{\sqrt{2g D}} \frac{1}{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)^{1/2}} \quad (3.11)$$

Donde se nota que la constante  $F_L$  es igual al número de Froude, modificado por el término  $1/\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)^{1/2}$ . Durand estableció la manera en que  $F_L$  varía con la concentración y tamaño de las partículas, ver fig. 3.7. En donde puede observarse que para partículas mayores de 1.0 mm el efecto empieza a ser menor y para mayores de 2.0 mm el valor de  $F_L$  se vuelve constante sin importar las propiedades del sistema.

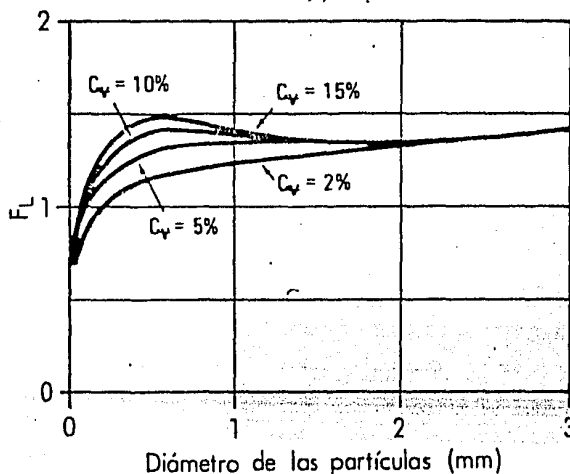


fig. 3.7 Variación del Parámetro  $F_L$  como función del diámetro de las partículas

Wasp ha presentado una revisión de los datos publicados para velocidades críticas de mezclas de arena y agua, sus resultados se presentan en la fig. 3.8, que es la gráfica de  $F_L$  contra concentración de sólidos, en su elaboración utilizó datos de Durand, Sinclair, Yotsukura y Wicks, junto con la línea de correlación de Durand dada por la ec. 3.10.

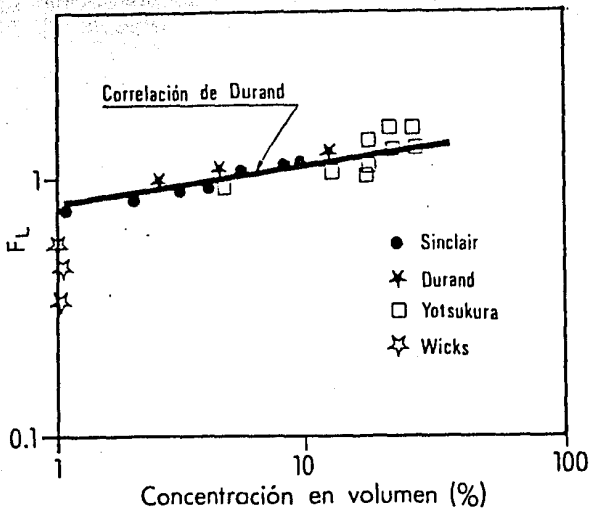


fig. 3.8 Relación  $F_L$ -Concentración de Sólidos.

En la fig. 3.8 se observa que la correlación de Durand da excelentes predicciones de los datos, con excepción de los de Wicks, los cuales fueron obtenidos para concentraciones de volumen bajas (1% en volumen y variaciones de la densidad y viscosidad del fluido de transporte. Para mezclas con las anteriores características la siguiente expresión puede ser utilizada para determinar la velocidad crítica.

$$V_c = 1.87 \left( \frac{d}{D} \right)^{1/6} \left( 2g D \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

donde

$d$  diámetro de las partículas, en m

- b) Velocidad crítica para mezclas con partículas de diversos - tamaños.

La determinación de la velocidad crítica para este tipo de mezclas es generalmente hecha considerando un tamaño medio de las partículas. Para mezclas de arenas con un tamaño mayor de 0.44 mm, Condiolios y Chapus<sup>12</sup> desarrollaron una correlación, independiente del tamaño de las partículas, entre la velocidad crítica y la concentración de la mezcla, como se presenta en la fig. 3.9.

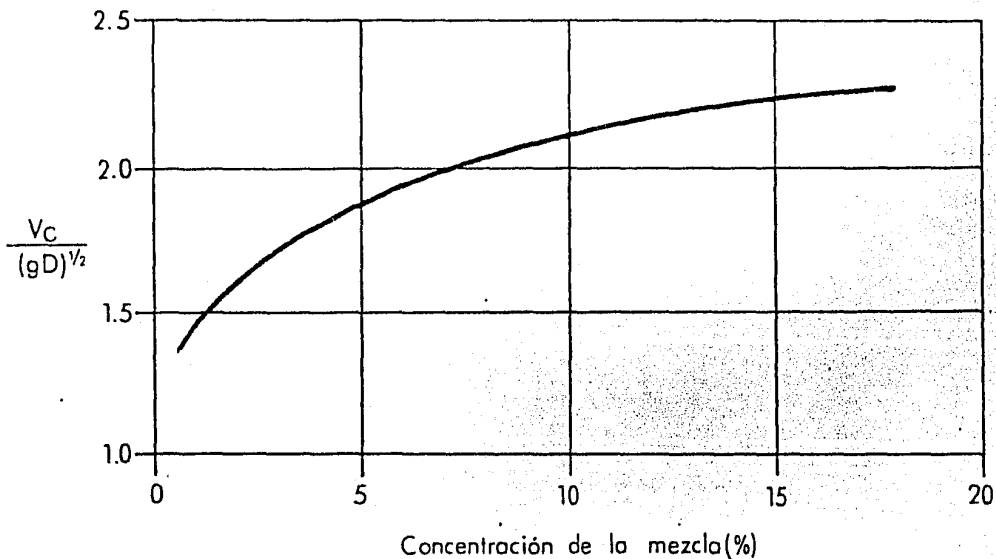


fig. 3.9 Relación entre la Velocidad Crítica y la concentración de la mezcla

### 3.7.2 Pérdidas por fricción

El problema de predicción de pérdidas por fricción para un flujo de mezclas heterogéneas está limitado a flujo turbulento, debido

a que el flujo laminar para estas condiciones nunca se presenta ya que es poco frecuente en la práctica. En esta sección se considerarán dos casos de flujos de mezclas heterogéneas, primero - un sistema conteniendo partículas esencialmente de un solo tamaño, es decir, uniformes, en el segundo un sistema conteniendo un rango de tamaños tal que todo el sistema se comporta heterogéneamente.

a) Sistema con tamaños uniformes de partículas

Aunque este caso puede ser una idealización de la situación real de transporte de mezclas, puede sin embargo ser una ayuda importante en el análisis de situaciones más complejas como las encontradas en la práctica.

Los trabajos de Durand<sup>7</sup>, que en el diseño de tuberías que transportan mezclas son considerados como un estudio clásico, cubren un amplio rango de condiciones, diámetros de tuberías variando - desde 2.0 cm hasta 60 cm; tamaños de partículas de 100 micras hasta 2.54 cm; velocidades de flujo desde 0.60 m/seg hasta 6.0 m/seg, y un rango en las concentraciones del 2% al 23%, en volumen.

Respaldado por los resultados de numerosas y extensivas pruebas - realizadas bajo las condiciones mencionadas anteriormente, Durand obtuvo la siguiente correlación.

a que el flujo laminar para estas condiciones nunca se presenta ya que es poco frecuente en la práctica. En esta sección se considerarán dos casos de flujos de mezclas heterogéneas, primero - un sistema conteniendo partículas esencialmente de un solo tamaño, es decir, uniformes, en el segundo un sistema conteniendo un rango de tamaños tal que todo el sistema se comporta heterogéneamente.

a) Sistema con tamaños uniformes de partículas

Aunque este caso puede ser una idealización de la situación real de transporte de mezclas, puede sin embargo ser una ayuda importante en el análisis de situaciones más complejas como las encontradas en la práctica.

Los trabajos de Durand<sup>7</sup>, que en el diseño de tuberías que transportan mezclas son considerados como un estudio clásico, cubren un amplio rango de condiciones, diámetros de tuberías variando - desde 2.0 cm hasta 60 cm; tamaños de partículas de 100 micras hasta 2.54 cm; velocidades de flujo desde 0.60 m/seg hasta 6.0 m/seg, y un rango en las concentraciones del 2% al 23%, en volumen.

Respaldado por los resultados de numerosas y extensivas pruebas - realizadas bajo las condiciones mencionadas anteriormente, Durand obtuvo la siguiente correlación.

$$\frac{f_m - f}{f C_v} = K' \left( \frac{V^2}{g D (S_s - 1)} \sqrt{C_D} \right)^{-3/2} \quad (3.13)$$

donde

- $f_m$  factor de fricción para la mezcla
- $f$  factor de fricción del líquido
- $C_v$  concentración de sólidos, expresada en volumen
- $K'$  constante
- $V$  velocidad del flujo, en m/seg
- $g$  aceleración de la gravedad, en m/seg<sup>2</sup>
- $D$  diámetro del tubo, en m
- $S_s$  densidad relativa de sólidos
- $C_D$  coeficiente de arrastre

De acuerdo con las pruebas realizadas por Newitt y Bonnington se determinó el valor de  $K'$ , considerándose un valor promedio de 150. El coeficiente de arrastre,  $C_D$ , está dado por la siguiente expresión.

$$C_D = \frac{2}{3} \frac{gd(S_s - 1)}{\omega^2} \quad (3.14)$$

donde

- $d$  diámetro de las partículas, en m
- $\omega$  velocidad de caída de las partículas, en m/seg



La expresión anterior sólo es aplicable a partículas de forma esférica; para partículas no esféricas este coeficiente puede obtenerse con la fig. 2.1.

La ec. 3.13 muestra que las pérdidas por fricción de la mezcla expresadas como una fracción del fluido de transporte son función del número de Froude, la concentración de sólidos, la densidad relativa y del coeficiente de arrastre de las partículas.

#### b) Mezclas con diferentes tamaños de partículas

Aunque la relación propuesta por Durand fue desarrollada inicialmente para mezclas con tamaños uniformes de partículas. ésta se ha hecho extensiva para poder aplicarla a mezclas con varios tamaños de partículas. Son diversos los criterios existentes para la determinación de las pérdidas por fricción para este tipo de mezclas, todos basados en la relación de Durand.

Condolios sugiere, para este tipo de mezclas, considerar el coeficiente de arrastre,  $C_D$ , en la relación de Durand (ec. 3.13) como

$$\sqrt{C_D} = P_1 \sqrt{C_{D1}} + P_2 \sqrt{C_{D2}} + \dots + P_n \sqrt{C_{Dn}} \quad (3.15)$$

donde  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , son los porcentajes en peso de los distintos tamaños de partículas, correspondientes a los coeficientes de arrastre  $C_{D_1}, C_{D_2}, \dots, C_{D_n}$ . El resto de los parámetros de la ec. 3.12 no tienen modificación.

Bonnington propone definir el coeficiente de arrastre como el promedio pesado de los coeficientes de arrastre de los tamaños de partículas, o sea

$$C_D = \frac{\sum C_{D_i} P_i}{\sum P_i} \quad (3.16)$$

Otro criterio, tal vez el más preciso, es el propuesto por Wasp<sup>1</sup>, que propone considerar cada fracción de tamaños de partículas como flujo independiente y aplicar a cada uno de ellos la relación de Durand con el coeficiente de arrastre correspondiente y la suma de las contribuciones de los mismos da el valor total de las pérdidas.

## 4. CORROSION Y ABRASION

### 4.1 INTRODUCCION

El desgaste del metal de las tuberías que transportan mezclas es debido a la corrosión y abrasión, que juegan un papel muy importante en el diseño de las mismas. La corrosión se presenta tanto en el interior como en el exterior de las tuberías. La corrosión externa de las tuberías para mezclas no difiere de la que se presenta en tuberías de acero para transporte de agua, ya que en ambos casos la corrosión depende del medio que la rodee, si la tubería está enterrada la corrosión depende de las características del suelo tales como porosidad y humedad; si está expuesta a la intemperie la corrosión es insignificante, excepto en áreas industriales y costeras. La corrosión interna en tu-

berías para agua y mezclas difiere esencialmente por la presencia de partículas sólidas en las últimas, las cuales tienden a acelerar el proceso de corrosión, además de producir la abrasión o desgaste del tubo.

En la actualidad no ha sido todavía posible establecer métodos que permitan determinar el grado de desgaste de la tubería debido a estos fenómenos, siendo necesario para cada caso particular efectuar pruebas de laboratorio antes y después de la operación de la tubería que den una idea del grado de desgaste.

En el presente capítulo se describirán los mecanismos de acción de los fenómenos de corrosión y abrasión, así como los métodos que existen para su control.

#### 4:2 MECANISMO DE CORROSION

La corrosión es un fenómeno electroquímico, por lo que en él intervienen reacciones químicas y flujo de una corriente eléctrica, para lo cual se requiere de un ánodo donde el metal se oxide, un cátodo donde el oxidante se reduzca, un conductor eléctrico entre el ánodo y el cátodo, y una solución de electrolito<sup>2</sup>.

En el caso de tuberías de acero, el hierro cede electrones al ánodo y éstos son conducidos a través del acero hacia el cátodo donde son aceptados por un oxidante. Los iones de hierro cargados en el electrolito llevan la carga al ánodo para completar el circuito.

Las reacciones en el ánodo y el cátodo pueden resumirse de la siguiente manera:

Reacción en el ánodo



Reacción en el cátodo



La reducción definida por la ec. 4.2, que se denomina oxígeno, es la principal reacción catódica en agua. La interacción entre los productos anódicos y catódicos produce la corrosión, como se muestra en la fig. 4.1.

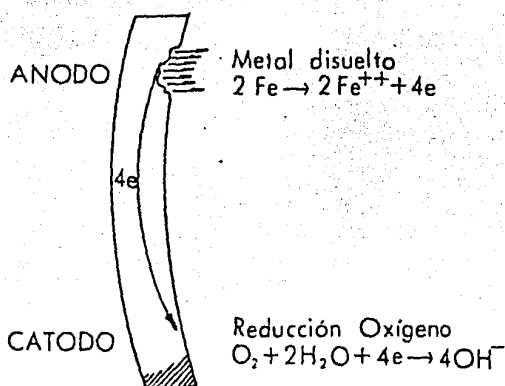


fig. 4.1 Interacción entre las reacciones en el ánodo y cátodo

Los productos finales de la corrosión interna son el óxido férrico y la magnetita o hematita, estos productos forman una barrera contra la difusión de oxígeno en la región catódica, reduciendo con ello el porcentaje de corrosión. Sin embargo la barrera puede ser destruida por la presencia de cloruros y sulfuros en el agua.

La fig. 4.2 muestra el efecto de las partículas de arena mezcladas con agua destilada sobre el porcentaje de corrosión.

El porcentaje de corrosión se incrementa considerablemente por las partículas de arena debido a la presencia de oxígeno; sin embargo, en ausencia de este último el porcentaje de corrosión no cambia por la adición de las partículas de arena, lo mencionado sirve para ilustrar que los sólidos erosionan la capa protectora e incrementan el porcentaje de corrosión cuando el medio es corrosivo.

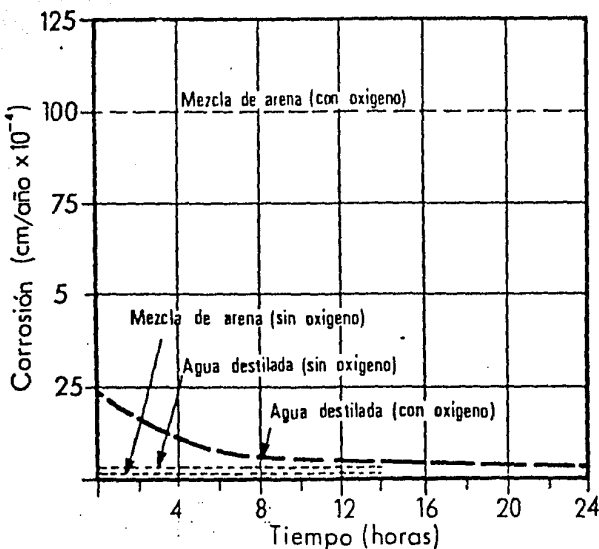


fig. 4.2 Efecto de la arena sobre el grado de corrosión del agua destilada

### 4.3 MECANISMO DE ABRASION

La abrasión o erosión de las paredes de la tubería es el resultado de la acción dinámica del movimiento de las partículas sólidas de la mezcla sobre ellas. La abrasión puede ser por impacto o por rozamiento. La primera es causada por el impacto normal de las partículas sólidas,

ya que algunas de estas partículas tienen suficiente energía cinética para causar esfuerzos locales mayores que el esfuerzo de fluencia del acero, dañando la tubería al chocar contra ella; la segunda es causada por el impacto oblicuo de las partículas sólidas, desgastando la tubería. La fig. 4.3 muestra los casos típicos de desgaste por abrasión en una tubería.

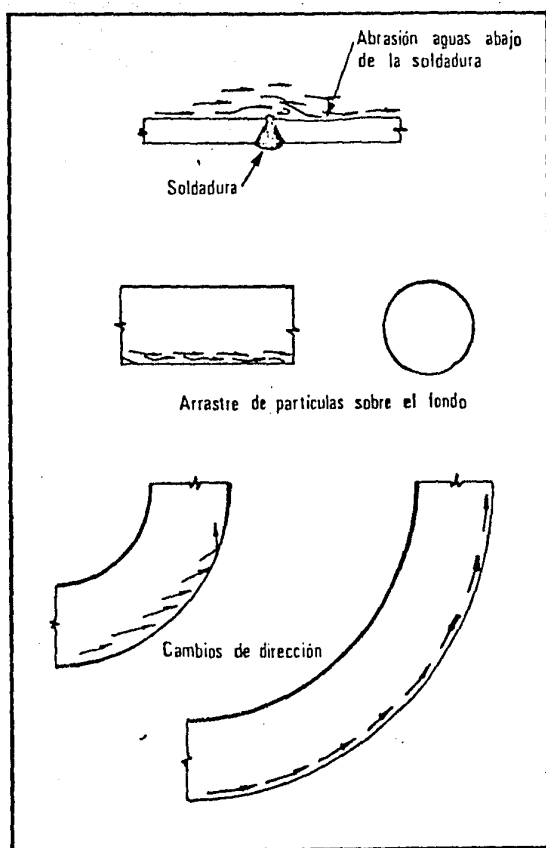


fig. 4.3 Algunas causas del desgaste por abrasión

La abrasión de la tubería depende de los siguientes factores:

- a) Características de los sólidos; tamaño, dureza, densidad, forma y composición
- b) Características del fluido de la mezcla: corrosividad, densidad, y viscosidad.
- c) Condiciones de flujo: laminar o turbulento, homogéneo o heterogéneo, y velocidad del flujo.
- d) Material del tubo: resistencia, ductilidad.

Para que la abrasión tenga lugar, los sólidos deben tener una dureza mayor que la del material de la tubería, por lo que el desgaste de la tubería por abrasión puede eliminarse utilizando una tubería hecha con un material que tenga una dureza mayor que la de las partículas. El componente abrasivo más común es el sílice con una dureza de 800  $\text{kgf/mm}^2$ , que es mayor que la dureza del acero, la cual varía entre 200 y 800  $\text{kgf/mm}^2$ .

Además de los factores mencionados que provocan la abrasión, ésta depende del ángulo de impacto de las partículas sólidas sobre la pared del tubo. La fig. 4.4 muestra el efecto de este ángulo sobre el porcentaje de abrasión para materiales blandos y dúctiles, así como para materiales duros y frágiles. En ellas se puede observar que los materiales blandos y dúctiles son útiles para ángulos de impacto grandes, mientras que los materiales duros y frágiles lo son cuando el ángulo de impacto es pequeño.



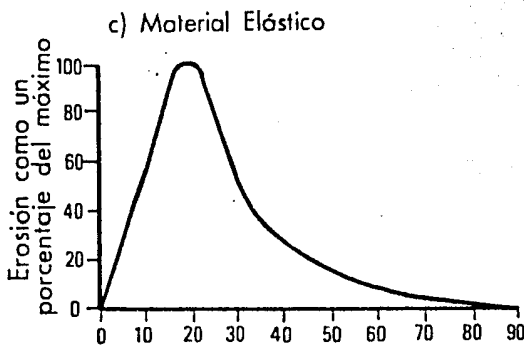
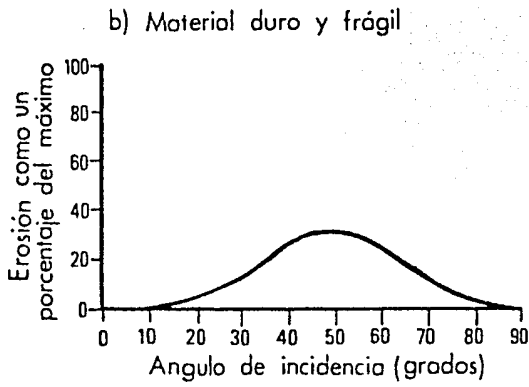
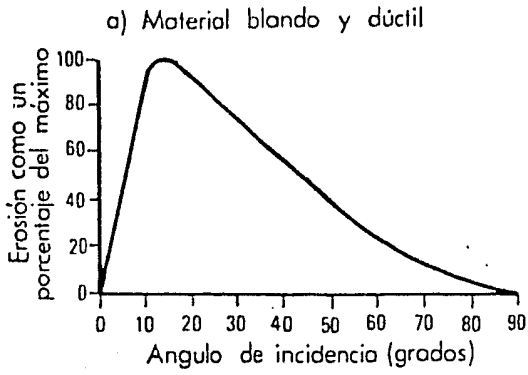


fig. 4.4 Efecto del ángulo de impacto en el grado de abrasión

#### 4.4 CONTROL DE LA CORROSION

El grado de corrosión puede ser reducido considerablemente eliminando el oxígeno disuelto y controlando el pH de la mezcla. Existen también varios tipos de inhibidores que son empleados para reducirla.

Se ha observado que en algunas mezclas, el oxígeno disuelto se reduce con el tiempo de flujo en la tubería, teniéndose por lo tanto un mayor desgaste, por corrosión, en los primeros kilómetros que en el resto de la tubería.

La eliminación de oxígeno puede ser lograda por el uso de agentes reductores, por ejemplo, el sulfato de sodio o por el uso de desareadores mecánicos.

Existen dos métodos para desaerear mecánicamente, uno es el de vacío rápido y otro el de los separadores de gas. En el primero de ellos, el oxígeno disuelto junto con el vapor es eliminado por medio de una cámara de vacío. En el segundo método un gas inerte, generalmente nitrógeno, es circulado a través de una gran área expuesta de la mezcla, logrando la eliminación de oxígeno.

La aplicación de los métodos anteriores ha sido descartada por problema con el asentamiento de las partículas sólidas en las unidades desareadoras que complican su funcionamiento.

Los principales inhibidores existentes son de tres tipos: anódicos, catódicos o mixtos. Los inhibidores anódicos terminan con la reacción anódica produciendo sustancias insolubles directamente en el ánodo. Algunos inhibidores anódicos son, por ejemplo, cromo, nitrito, molibdato y tungsteno. Sin embargo las tuberías cromadas sufren un proceso de reducción debido a la materia orgánica o algunas sales disueltas en la mezcla; las protecciones con nitritos son susceptibles de ser atacadas por las bacterias de la mezcla, destruyéndolas; las protecciones de molibdato y tungsteno aunque dan buena protección tienen altos costos. Las desventajas anteriores dan como resultado una casi nula aplicación de este tipo de inhibidores.

Los inhibidores catódicos reducen la efectividad de la reacción de reducción en el cátodo. Las cubiertas de tuberías con materiales como carbonatos y polifosfatos, que pertenecen a este tipo de inhibidores, cubren el área catódica no permitiendo el contacto oxidante con el - - cátodo. La presencia de iones de metal divalente en los polifosfatos aumentan su capacidad de protección.

Las mezclas de inhibidores anódicos y catódicos son las que presentan una mayor efectividad en el control de la corrosión. Un ejemplo de ellas son los cromo-polifosfatos, que en concentraciones bajas de cada uno de ellos y combinadas han tenido mayor efectividad que su uso por separado y concentraciones mayores. Resultados mayormente efectivos se han obtenido al adicionar a los cromo-polifosfatos cantidades pequeñas de zinc.

Otro procedimiento para prevenir la corrosión es el uso de revestimientos resistentes del tipo epóxico con lo que con una película con espesor cercano a 0.254 mm es suficiente para lograr buenos resultados.

#### 4.5 CONTROL DE LA ABRASION

Ya que el desgaste abrasivo de las tuberías para mezclas depende en gran parte del tamaño de las partículas sólidas, de la concentración de la mezcla y la velocidad de flujo y que en algún grado estos factores dependen unos de otros, la abrasión puede ser reducida disminuyendo el tamaño de los sólidos y como consecuencia de ello la velocidad de flujo para su transportación. Sin embargo, para realizar la disminución del tamaño deben tenerse en cuenta el costo adicional de trituración de los sólidos y compararse con el ahorro en los costos de bombeo y la reducción del desgaste de la tubería, seleccionándose de esta manera el tamaño adecuado con el cual es conveniente transportar los sólidos.

En la práctica se ha demostrado que para mezclas homogéneas, el desgaste por abrasión empieza a ser de consideración cuando la velocidad de flujo es mayor de 3.0 m/seg. Para mezclas heterogéneas la abrasión puede ser fuerte para velocidades del flujo mayores de 1.5 m/seg.

El efecto de la concentración de la mezcla sobre el desgaste por abrasión es más complicado que el tamaño de sólidos y velocidad de flujo. Sin embargo, se ha demostrado experimentalmente que cuando la relación  $C/C_A$  del máximo tamaño de partículas en la mezcla es mayor que 0.5 y

la velocidad de flujo menor de 3.0 m/seg la abrasión en la tubería es pequeña.

También se ha demostrado que para valores de  $C/C_A$  menores de 0.5 la abrasividad de la mezcla se incrementa.

La abrasión también ocurre en los cambios fuertes de dirección del flujo, como en codos, tees y válvulas, lugares en los que habrá - que dotar de un mayor espesor de material, previendo con ello su - desgaste.

## 5. EJEMPLO DE APLICACION

### 5.1 INTRODUCCION

En la zona de Matancita ubicada en Baja California Sur se dispone de minas con roca fosfórica, que para su aprovechamiento necesita ser transportada hasta un lugar de embarque, en el cual se haga la distribución a los centros de consumo.

Existen varias opciones para el transporte del material, entre las -- que están en llevarlo por tubería, bandas o barcazas hasta el puerto de Magdalena donde puede ser embarcado para su distribución.

En este capítulo se muestra, a manera de ejemplo de aplicación de los conceptos enunciados en los capítulos anteriores, el cálculo de las pérdidas por fricción en la tubería para transporte de la producción de roca fosfórica desde el lugar de explotación hasta el puerto Magdalena.

## 5.2 DATOS GENERALES

### a. Tubería

Diámetro	20.32 cm (20")
Material	acero
Longitud	72 Km
Rugosidad relativa ( $\epsilon$ )	0.05 mm

### b. Partículas sólidas

Peso específico	1.9 ton/m <sup>3</sup>	
Granulometría	Malla	% Peso
	60	4.17
	100	74.13
	200	21.70

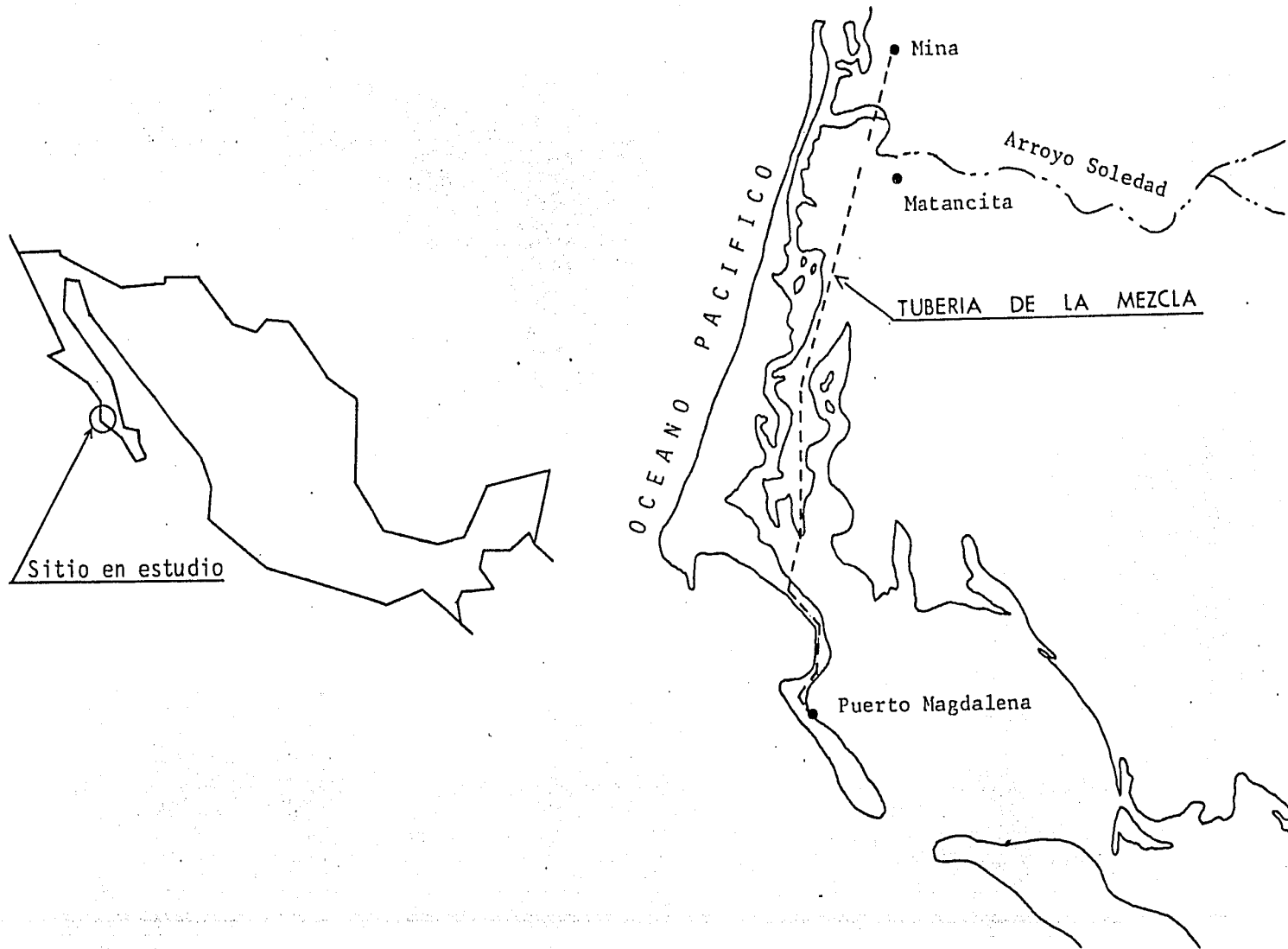


fig. 5.1 Localización de la zona para transporte de roca fosfórica



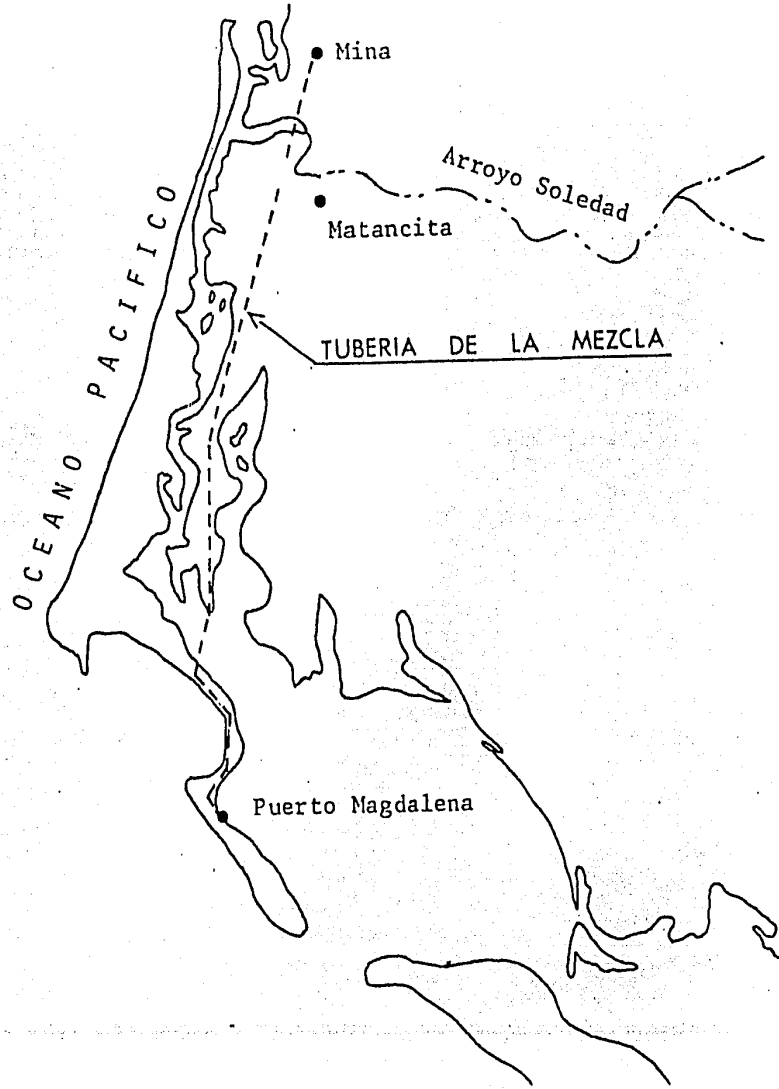
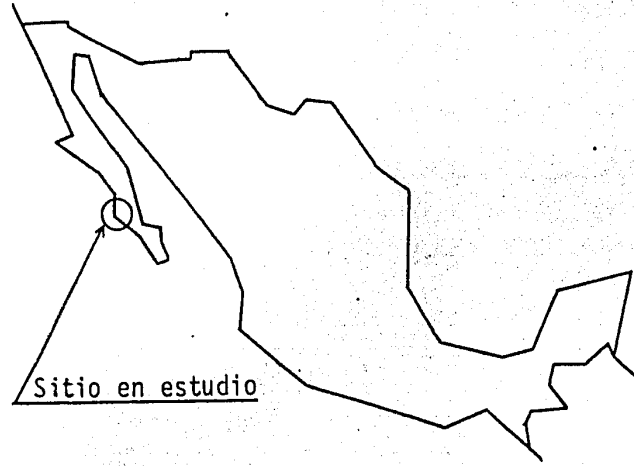


Fig. 5.1 Localización de la zona para transporte de roca fosfórica

## c. Fluido de transporte

Agua a 20°C (promedio)

## d. Mezcla

Concentración de sólidos ( $C_v$ )	30% en volumen
Temperatura	20°C (en promedio, considerando 30°C en el día y 10°C en la noche)
Velocidad de transporte	2.16 m/seg
Peso volumétrico	1.27 ton/m <sup>3</sup>

## Gasto de Diseño

$$\text{Producción} = 1.2 \times 10^6 \text{ ton/año} = 0.038 \text{ ton/seg}$$

$$Q_{\text{sólidos}} = 0.038/1.9 = 0.020 \text{ m}^3/\text{seg}$$

como

$$C_v = Q_{\text{sólidos}}/Q_{\text{mezcla}}$$

$$Q_{\text{mezcla}} = Q_{\text{sólidos}}/C_v$$

$$Q_{\text{mezcla}} = 0.020/0.30$$

$$Q_{\text{mezcla}} = 0.067 \text{ m}^3/\text{seg}$$

sin embargo el gasto de diseño se considerará como

$$Q_{\text{diseño}} = 0.070 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$Q_{\text{diseño}} = 70 \text{ lts/seg}$

Obtenido el gasto de la mezcla por transportar se obtienen las pérdidas para una tubería de 20.32 cm (8") de diámetro, verificándose que la velocidad de transporte sea mayor que la velocidad crítica.

Viscosidad de la mezcla.-

de la ec. 2.12

$$\frac{\mu_m}{\mu_a} = 1 + 2.5 C_v + 10.05 C_v^2 + 0.00273 e^{16.6 C_v}$$

$$\frac{\mu_m}{\mu_a} = 1 + 2.5 (0.3) + 10.05 (0.3)^2 + 0.00273 e^{16.6(0.3)}$$

$$\frac{\mu_m}{\mu_a} = 3.052$$

como

$$\mu_{a_{20^\circ\text{C}}} = 9.905 \times 10^{-3} \text{ grm}/(\text{cm}\cdot\text{seg})$$

$$\mu_m = 0.030 \text{ grm}/(\text{cm}\cdot\text{seg})$$

Peso volumétrico de la mezcla.-

de la ec. 2.9

$$\delta_m = \delta_a + (\delta_s - \delta_a) C_v$$

$$\delta_m = 1.0 + (1.9 - 1.0) 0.3$$

$$\delta_m = 1.27 \text{ ton/m}^3$$

### 5.3 SOLUCION

Debido al desconocimiento del comportamiento de la mezcla (flujo homogéneo o heterogéneo) y con objeto de aplicar los métodos para el cálculo de las pérdidas, en el caso del flujo homogéneo o heterogéneo, se considerará inicialmente que todos los sólidos están perfectamente mezclados en el fluido y que ninguna parte de ellos se arrastra por el fondo, por lo que las pérdidas pueden ser calculadas por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach. Posteriormente se obtendrán las pérdidas considerando que una parte de las partículas viajan en suspensión y otra parte arrastrándose por el fondo de la tubería.

Primer caso.- Considerando la mezcla como homogénea.

De la ec. 3.9 se tiene que

$$\Delta h/\Delta L = f \frac{V^2}{2gD} \left( \frac{\delta_m}{\delta_a} \right)$$

el factor de fricción  $f$  se obtendrá de la fig. 3.5, como función de  $Re$  y  $\epsilon/D$ .

$$Re = VD/\nu$$

$$\nu = \mu_m / \rho_m$$

$$\rho_m = \delta_m / g = 1270 / 9.81$$

$$\rho_m = 129.46 \text{ (Kg-sec}^2\text{)}/\text{m}^4 = 1.27 \text{ gm/cm}^3$$

$$\therefore \nu = 0.030 / 1.27$$

$$\nu = 0.024 \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$\therefore Re = 216(20.32) / 0.024$$

$$Re = 1.829 \times 10^5$$

$$\epsilon/D = 0.0002$$

con Re y  $\epsilon/D$  de la fig. 3.5 se obtiene

$$f = 0.0173$$

$$\therefore \Delta h / \Delta L = 0.0173 \frac{(2.16)^2}{2(9.81)(0.2032)} \left( \frac{1.27}{1.00} \right)$$

$$\Delta h/\Delta L = 0.0257 \text{ m}$$

$$\Delta h = 0.0257 \text{ m/m}$$

$$\Delta h_{\text{total}} = 0.0257 (72\ 000) = 1\ 850.4 \text{ m}$$

Segundo caso. Considerando la mezcla como heterogénea

Para este caso, se toman como punto de partida los resultados del primer caso para posteriormente ajustarlos hasta llegar a la condición de flujo heterogéneo, es decir se obtienen las pérdidas para cada una de las fracciones de tamaños de partículas tanto de las que viajan en suspensión como las que se arrastran por el fondo. El procedimiento de cálculo para este caso se realiza en forma iterativa, siendo conveniente elaborar una tabla de cálculo (ver tabla 5.1). En esta segunda iteración se obtiene  $\Delta h = 0.0262 \text{ m/m}$ .

Para la tercera iteración, se consideran los resultados de la segunda iteración obteniéndose  $\Delta h = 0.0262 \text{ m/m}$ , que resulta igual al calculado en la segunda iteración, concluyendo con ello el cálculo de la pérdida. La pérdida total será:

$$\Delta h_{\text{total}} = 0.0262(72\ 000) = 1\ 886.4 \text{ m.}$$

MALLA TIPO TYLER (1)	DIAMETRO MEDIO cm 2	VELOCIDAD DE CAIDA cm/s (3)	%VOLUMEN DE SOLIDOS (4)	$Z = \frac{\omega}{\beta \lambda U}$ (5)	$\frac{C}{C_A} = 10^{-1.8Z}$ (6)	(7)	(8)	VELOCIDAD DE CAIDA EN EL AGUA cm/s (9)	$C_D$ (10)	$C_D^{-3/4}$ (11)	$\Delta p_{\text{fondo}}$ (12)	$\Delta p_{\text{transp.}}$ (13)	$\Delta p_{\text{mezcla}}$ (14)
PRIMERA ITERACION													
60X100	0.0197	0.956	1.251	—	—	1.251	0.0	0.856	31.31	0.076	0.0		
100X200	0.0111	0.215	22.239	—	—	22.239	0.0	0.275	172.97	0.021	0.0		
-200	0.0037	0.009	6.510	—	—	6.510	0.0	0.0305	4678.78	0.002	0.0		
			<u>30.000</u>			<u>30.000</u>					<u>0.0</u>	<u>0.0257</u>	<u>0.0257</u>
SEGUNDA ITERACION													
60X100	0.0197	0.956	1.251	0.2390	0.3714	0.465	0.786	0.856	31.31	0.076	0.0002		
100X200	0.0111	0.215	22.239	0.0538	0.8001	17.793	4.446	0.275	172.97	0.021	0.0003		
-200	0.0037	0.009	6.510	0.0023	0.9905	6.448	0.062	0.0305	4678.78	0.002	4.4x10 <sup>-4</sup>		
			<u>30.000</u>			<u>24.706</u>	<u>5.294</u>				<u>0.0005</u>	<u>0.0257</u>	<u>0.0262</u>
TERCERA ITERACION													
60X100	0.0197	0.956	1.251	0.2359	0.3762	0.471	0.780				0.0002		
100X200	0.0111	0.215	22.239	0.0531	0.8025	17.847	4.392				0.0003		
-200	0.0037	0.009	6.510	0.0022	0.9909	6.451	0.059				4.2x10 <sup>-4</sup>		
			<u>30.000</u>			<u>24.769</u>	<u>5.231</u>				<u>0.0005</u>	<u>0.0257</u>	<u>0.0262</u>

## ACLARACIONES Y COMENTARIOS SOBRE LA TABLA DE CALCULO

### Primera Iteración.

En esta primera iteración se considera que todos los sólidos están homogéneamente mezclados en el agua. El cálculo de las pérdidas bajo esta consideración se realizó como en el primer caso, sin embargo en esta iteración se obtienen propiedades del transporte necesarias en las siguientes iteraciones.

En la columna (1) se coloca el número de malla, según el análisis -- granulométrico de los sólidos.

En la columna (2) se coloca el diámetro medio de las partículas que cruzan cada una de las mallas (media de la abertura de las mallas)

En la columna (3) se anota la velocidad de caída de las partículas ( $\omega$ ), dentro de la mezcla y para cada uno de los diámetros. Para obtenerla se utilizan las figs. 2.2, 2.3 y 2.4 y para utilizarlas se requiere conocer la densidad de transporte y la diferencia de ésta con la de los sólidos para cada una de las fracciones de partículas, calculándose éstas con las expresiones siguientes

$$\rho = (\rho_s - 1) C_v + 1$$



$$\Delta\rho = \rho_s - \rho$$

En la columna (4) se coloca el % de volumen de sólidos, obtenido a partir del % en peso multiplicado por la concentración en volumen.

En la columna (5) se calcula  $Z = \frac{\omega}{\beta X U_*}$  (ver ecs. 3.1 y 3.2)

En la columna (6) se calcula  $C_A/C = 10^{-1.8Z}$  (ver ec. 3.2)

Las columnas (5) y (6) no se calculan en la primera iteración, ya que ambas son para el caso de mezclas heterogéneas.

La columna (7) se obtiene multiplicando las columnas (4) por (6), su resultado es la concentración en volumen de cada fricción de las partículas que viajan en suspensión. Para esta iteración esta columna es igual a la (4) ya que se considera que todas las partículas - viajan en suspensión.

La columna (8) es la resta de las columnas (4) menos (7) y es la -- concentración en volumen de cada fracción de las partículas que se arrastran por el fondo.

La columna (9) es el cálculo de la velocidad de caída de las partículas dentro del fluido (agua), para lo cual

$$\omega = \frac{g}{18} \left( \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right) \frac{1.0}{\nu} d^2$$

donde

- $\omega$  velocidad de caída
- $g$  aceleración de la gravedad
- $\rho_s$  densidad de sólidos
- $\rho_a$  densidad del agua
- $\nu$  viscosidad cinemática del agua
- $d$  diámetro de las partículas

En la columna (10) se obtiene el coeficiente de arrastre (ver 2.2.7)

En la columna (11) se obtiene  $CD^{-3/4}$

En la columna (12) se obtienen las pérdidas correspondientes a las partículas que se arrastran por el fondo, por medio de la ecuación

$$\Delta p_{\text{fondo}} = 6.31 C_{v \text{ fondo}} CD^{-3/4}$$

En esta primera iteración es cero ya que así se supuso.

La columna (13) son las pérdidas debidas a las partículas en suspensión, su cálculo es igual a los del primer caso.

La columna (14) es la suma de las columnas (12) y (13) y el resulta-

do es igual a la pérdida de la mezcla por unidad de longitud.

Para las siguientes iteraciones, las columnas (1) a (4) son iguales a las de la primera.

Para la columna (5) se calcula  $Z$ , utilizando la velocidad al cortante ( $U_*$ ) calculada en la iteración inmediata anterior.

Las columnas (9), (10) y (11) son iguales a las de la primera iteración.

En la columna (12) se calcula  $\Delta p_{\text{fondo}}$  con la ecuación

$$\Delta p_{\text{fondo}} = 82 \Delta p_{\text{agua}} C_{v\text{fondo}} \left( \frac{g D (\rho_s - 1)}{V^2 \sqrt{C_D}} \right)^{1.5}$$

$$\Delta p_{\text{agua}} = \frac{4}{2} f \frac{V^2}{g D}$$

$$v_{\text{agua}} = \frac{\mu_a}{\rho_a}$$

$$\rho = 1 \frac{\text{grm}}{\text{cm}^3}$$

$$v_{\text{agua}} = 9.905 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{seg}}$$

$$Re = \frac{216 (20.32)}{9.905 \times 10^{-3}} = 4.4 \times 10^5$$

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.005}{20.32} = 0.0002$$

Con  $Re$  y  $\frac{e}{D}$ , de la fig. 3.5 se tiene

$$f = 0.0158$$

$$\therefore \Delta p_{\text{agua}} = \frac{1}{2} \frac{0.0158 (216)^2}{981 (20.32)} = 0.0185 \text{ cm/cm}$$

Sustituyendo en la ec. de  $\Delta p_{\text{fondo}}$

$$\Delta p_{\text{fondo}} = 82 (0.0185) C_{v\text{fondo}} \left( \frac{981 (20.32) (1.9-1)}{(216)^2 \sqrt{C_D}} \right)$$

$$\Delta p_{\text{fondo}} = 0.362 C_{v\text{fondo}} C_D^{-3/4}$$

Para la columna (13) el peso específico de la muestra será el resultado de sustituir en la ec. 2.9 el valor de la concentración en volumen de los sólidos en suspensión (columna 9).

En la columna (14) se anota la suma de las columnas (12) y (13) y si no es igual a la de la iteración anterior, se repite el procedimiento hasta lograr la igualdad.

## 6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Una de las hipótesis más importantes en la Hidráulica, por las simplificaciones que trae consigo, es la consideración del flujo en tuberías como flujo unidimensional, sin embargo para el flujo de mezclas la presencia de partículas sólidas dentro del fluido hace que la consideración de flujo unidimensional sea menos válida, siendo necesario considerar el flujo de mezclas como un flujo tridimensional, creando con ello un problema más complejo de analizar. El flujo de mezclas por tuberías ha sido analizado teóricamente en una mínima parte y los avances en su conocimiento se han basado en observaciones experimentales, por lo que para la solución de problemas relacionados con el flujo de mezclas se han presentado una gran cantidad de métodos y criterios de análisis, sin embargo los métodos y criterios expuestos al respecto son los más aceptados, debiendo adoptarse aquel que proporcione los mejores resultados.

Es importante recalcar que en el cálculo de pérdidas por fricción para el caso de mezclas homogéneas, las cuales se obtienen a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach, utilizada para líquidos, debe sustituirse en el cálculo del número de Reynolds el valor de la viscosidad cinemática del líquido por el de la mezcla, ya que no considerarse ésta el valor obtenido para el número de Reynolds será menor, dando como resultado un valor mayor del factor de fricción calculado en base a él y con ayuda del diagrama de Moody.

Para el caso de mezclas heterogéneas, el criterio más recomendable para su análisis es el propuesto por Durand, según se ha comprobado con los resultados obtenidos en la mayoría de los sistemas construidos para el transporte de mezclas.

Como se mencionó en el capítulo 3 lo hasta aquí presentado sobre el análisis del comportamiento hidráulico del transporte de mezclas por tuberías corresponde al caso de tuberías horizontales para el caso de tuberías inclinadas para pérdidas por fricción pueden ser consideradas como la suma de pérdidas en la proyección horizontal y vertical de la tubería inclinada, o sea

$$\left(\frac{\Delta h}{\Delta L}\right)_m = \left(\frac{\Delta h}{\Delta L}\right)_m \cos \theta + \left(\frac{\Delta h}{\Delta L}\right)_m \sin \theta$$

donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la tubería. El transporte de mezclas en tuberías verticales se considera como flujo homogéneo, ya que las partículas sólidas se distribuyen uniformemente a través de la sección transversal de la tubería vertical.

## REFERENCIAS

- 1 WASP, E. J., KENNY, J. P. and GANDHI, R. L., "Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation", Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, 1977.
- 2 GRAF, W. H., "Hydraulics of Sediment Transport", McGraw-Hill - Book Company, New York, 1971.
- 3 AUDE, T. C., COWPER, N. T. and WASP, E. J., "Slurry Piping Systems: Trends, Design Methods, Guidelines", Chemical Engineering, Vol. 78, pp 74-90, June 1971.
- 4 ASCE, "Sedimentation Engineering", Headquarters of the Society, New York, 1975.
- 5 THOMAS, D. G., "Transport Characteristics of Suspensions, - - Part IV", AIChE Journal, Vol. 8, pp 373-378, July 1962.

- 6 CHARLES, M. E.. and STEVENS, G. S., "The Pipeline Flow of Slurries-Transition Velocities", 2nd Int. Conf. on Hyd. Transport of Solid in Pipes, BHRA Fluid Engng., Cranfield, V. K., Sept. 1972.
- 7 DURAND, R., "The Hydraulic Transportation of Coal and Other Materials in Pipes", Colloq. of National Coal Board, London, Nov.1952.
- 8 HANKS, R. W., "A Generalized Criterion for Laminar-Turbulent Transition in the Flow of Fluid", Union Carbide Co., Nov. 1962.
- 9 HEDSTROM, B. O. A., "Flow of Plastic Materials in Pipes", Ind. Eng. Chem., Vol. 44, pp. 651-656, 1962.
- 10 HANKS, R. W. and PRATT, D. R., "On the Flow of Bingham Plastic - - Slurries in Pipes and Between Parallel Plates", Soc. of Petroleum Engineers Jr., pp. 342-346, Dec. 1967.
- 11 THOMAS, D. G. "Non-Newtonian Suspensions", Part I, Ind. Eng. Chem., V. 55, pp. 18-29, Nov. 1963.
- 12 CONDOLIOS, E. and CHAPUS, E. E., "Solids Pipelines, Designing Solids Handling Pipelines", Chem. Eng., Vol. 70, pp. 131-138, - - - July 1963.