

30  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DE PROCEDIMIENTOS PARA EL  
CALCULO HIDRAULICO DE UN  
FRACTURAMIENTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A :

MANUEL AMBROSIO MERCADO ORTIZ



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1989



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.

## TEMARIO BASICO

- 1.- INTRODUCCION
- 2.- HIDRAULICA DEL FRACTURAMIENTO
- 3.- REOLOGIA DE LOS FLUIDOS
- 4.- DESARROLLO DE ECUACIONES PARA EL CALCULO DE CAIDAS DE PRESION POR FRICCION (METODO CRAFT & HOLDEN)
- 5.- DESARROLLO DE ECUACIONES PARA EL CALCULO DE CAIDAS DE PRESION POR FRICCION (METODO R. MONRICARD)
- 6.- DESARROLLO DE PROGRAMAS DE COMPUTO
- 7.- ANALISIS DE RESULTADOS
- 8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- 9.- APENDICES: (A) ANALISIS DIMENSIONAL  
(B) LEYES BASICAS DEL FLUJO DE FLUIDOS  
(C) FLUJO EQUIVALENTE EN ESPACIO ANULAR  
(D) DIFERENCIA ENTRE VISCOSIDADES  
(E) ADELGAZAMIENTO AL CORTE  
(F) CALCULO DEL FACTOR DE FRICCION

**CAPITULO 1**  
**INTRODUCCION**

El objetivo fundamental del presente trabajo, es analizar en forma detallada las pérdidas de presión por fricción ocasionadas al inyectar un determinado fluido (en este caso fluido fracturante) a través de un conducto. Lo anterior es de vital importancia para llevar a cabo el diseño de un fracturamiento hidráulico.

Asimismo se hará una clasificación general de los fluidos. De esta clasificación se obtendrá el modelo que más se acerque al comportamiento de los fluidos empleados en la realización de un fracturamiento.

Del modelo obtenido se desglosarán cada uno de los parámetros que intervienen en éste y se analizará en que magnitud contribuye cada uno de éstos para aumentar o disminuir las caídas de presión por fricción.

También se definirán a partir de la elaboración de programas de cómputo las diferentes alternativas en las que se puede llevar a cabo un fracturamiento, de las cuales se determinarán las que generen las menores caídas de presión por fricción, mediante la variación de los parámetros

reológicos del fluido así como de las condiciones de flujo ya sea por tubería de producción, tubería de revestimiento y/o espacio anular. El determinar la mínima caída de presión, representará un ahorro de energía y potencia requerida en la superficie, evitando así la posibilidad de un cálculo sobrepasado cuya potencia no se pueda alcanzar en la superficie o bien genere problemas mecánicos, al sobrepasar las presiones permisibles pudiendo ocasionar la pérdida del pozo. Todo esto constituirá una pérdida económica, de ahí la importancia del desarrollo de este trabajo.

## CAPITULO 2

### HEBRAULICA DEL FRACTURAMIENTO (1)\*

Un fracturamiento se define como el proceso mediante el cual se genera el rompimiento de una formación hidráulicamente al inyectar a alta presión y alto gasto un fluido, llamado fluido fracturante, acarreador de un agente, llamado sustentante, que permite mantener abierta la fractura resultante.

El fracturamiento tiene como objetivo incrementar o crear un canal altamente conductivo para el flujo de los fluidos del yacimiento al pozo o del pozo al yacimiento. De aquí que una fractura inducida y sustentada tendrá una marcada influencia en el patrón de flujo y en la distribución de presiones en la formación.

Las aplicaciones principales de un fracturamiento hidráulico son las siguientes:

- 1- Formaciones de baja permeabilidad.
- 2- Formaciones con daño severo.
- 3- Formaciones con sistemas permeables aislados.
- 4- Procesos de recuperación secundaria.
- 5- Almacenamiento en el subsuelo.

\* Referencias al final.

Para una mejor comprensión de las condiciones hidráulicas en que se lleva a cabo un fracturamiento, se enunciarán a continuación cada uno de los parámetros que intervienen:

$$P_s = P_t + \Delta P_f + P_p - P_h$$

donde:

$P_s$  = Presión requerida en la superficie

$P_t$  = Presión de tratamiento o de extensión de la fractura.

$\Delta P_f$  = Pérdida de presión por fricción

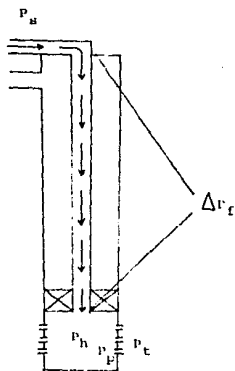
$P_p$  = Pérdida de presión en los disparos

$P_h$  = Presión de la columna hidrostática

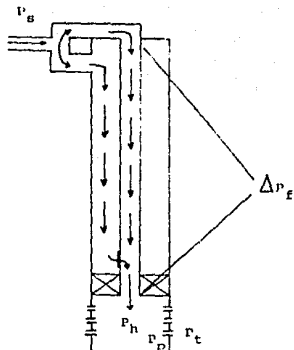
La distribución de cada uno de éstos parámetros en un sistema de circulación se puede apreciar en la fig.2.1.

La presión requerida en la superficie es la presión necesaria, para que un fluido penetre en la formación a una presión mayor que la presión de fractura de la misma.

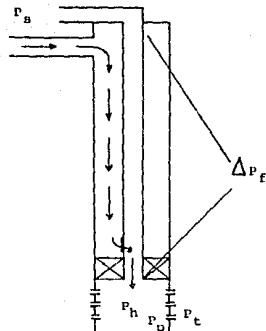
La presión de tratamiento o de extensión de la fractura es la presión necesaria para, que una vez abierta una fractura en la formación, esta presión se mantenga para que la fractura se prolonge a través de la misma, generando así un canal de alta conductividad.



TRATAMIENTO  
POR T.P.



TRATAMIENTO  
POR T.P. y E.A.



TRATAMIENTO  
POR E.A.

FIG. (2-1) CALCULO HIDRAULICO DE UN FRACTURAMIENTO



La pérdida de presión por fricción es aquella que se genera al bombear un fluido a través de un conducto, donde esta pérdida dependerá; del diámetro del conducto por el cual fluye, del ritmo de inyección o gasto, y en general de las propiedades reológicas del fluido empleado en el fracturamiento.

La pérdida de presión en los disparos es aquella que se genera al inyectar un fluido a través de los disparos, esta pérdida generalmente dependerá; de la densidad y del diámetro de los disparos.

La presión de la columna hidrostática es aquella que ejerce el fluido por su propio peso en el pozo, donde, esta presión depende de la densidad del fluido fracturante y de la profundidad del pozo.

Como se dijo en el capítulo anterior, el objetivo del presente trabajo esta enfocado a las pérdidas de presión por fricción.

## CAPITULO 3: REOLOGIA DE LOS FLUIDOS (2,3)

### 3.1 CONCEPTOS BASICOS

Para una mejor comprensión durante el desarrollo del presente trabajo, se definirán a continuación los siguientes conceptos básicos.

**REOLOGIA:** Es la rama de la ciencia que se encarga del estudio de la deformación de los fluidos, los cuales al aplicarles una fuerza los inducen a fluir a través de un conducto.

**RITMO DE CORTE:** Es la diferencia de velocidades entre dos capas adyacentes de fluido dividida entre la distancia que hay de una capa a otra, matemáticamente se puede definir como la derivada de la velocidad con respecto a la distancia, es decir:

$$\text{RITMO DE CORTE} = \frac{d v}{d r} \quad \dots\dots\dots(3.1.1)$$

cuyas dimensiones son (ver apéndice A):

$$\frac{d v}{d r} \left[ \frac{L \ T^{-1}}{L} \right] = T^{-1}$$

**ESFUERZO DE CORTE ( $\tau$ ):** Es la fuerza por unidad de Área aplicada a una placa inducida al corte, es decir empleando dimensiones del sistema absoluto:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{M L T^{-2}}{L^2} [M L^{-1} T^{-2}] \dots\dots(3.1.2)$$

O bien, en el sistema gravitacional:

$$\tau [F L^{-2}]$$

**VISCOSIDAD:** Es la resistencia que presenta un fluido a fluir a través de un conducto, por lo tanto esta propiedad es la responsable de la fricción la cual se desarrolla cuando una capa de fluido resbala sobre otra adyacente. Matemáticamente la viscosidad absoluta se puede definir como la relación del esfuerzo de corte entre el ritmo de corte, es decir:

$$\mu = \frac{g_c \tau}{dv/dr} = \frac{g_c F/A}{dv/dr} \dots\dots(3.1.3)$$

cuyas dimensiones son (en el sistema gravitacional):

$$\mu \left[ \frac{F L^{-2}}{T^{-1}} \right] = [F L^{-2} T]$$

Si la viscosidad se maneja en el sistema absoluto (ver apéndice A), entonces se hace el cambio de F a este sistema:

$$F = M L T^{-2}$$

por lo tanto:

$$\mu [M L^{-1} T^{-1}]$$

donde:  $\mu$  = viscosidad absoluta.

**RUGOSIDAD ABSOLUTA:** Se representa por  $\epsilon$ , y determina el promedio de irregularidades que presenta la pared de la tubería y se mide en pulgadas.

**RUGOSIDAD RELATIVA:** Es el cociente que resulta de dividir  $\epsilon$  entre el diámetro de la tubería, es decir:  $\epsilon/d$  (adim.).

Para visualizar mejor el concepto de rugosidad relativa, considérese dos tuberías con la misma rugosidad absoluta, pero con diferentes diámetros, entonces la tubería más grande será la de menor rugosidad relativa, Cullender & Smith<sup>(6)</sup> sugieren un valor de  $C=6.5 \times 10^{-4}$  pg. obtenido de experiencias de campo (ver fig. 3.1.1).

**FLUJO ESTABLE:** Es un flujo continuo (es decir, la velocidad de flujo con respecto al tiempo es constante) y además se puede presentar en régimen laminar o turbulento.

**FLUJO LAMINAR:** Se presenta cuando todas las partículas que constituyen un fluido se mueven en líneas rectas paralelas con respecto al eje del conducto por el que viajan, conformando así capas de fluido adyacentes entre sí, donde además, estas capas no se mezclan ni intercambian entre sí.

Por otra parte, en este régimen de flujo, la velocidad máxima de flujo se registra en el eje de la tubería, y

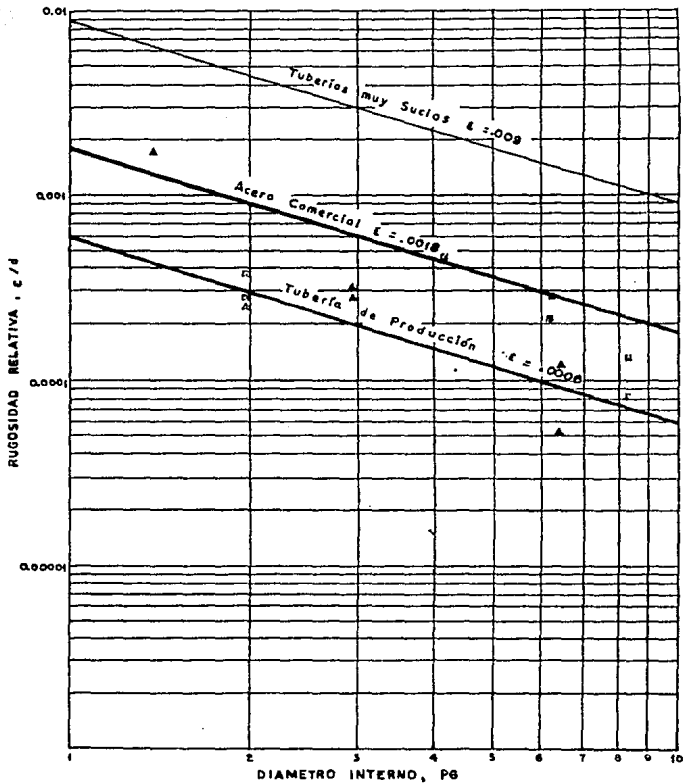


FIGURA 3.1 RUGOSIDAD RELATIVA DE TUBERÍAS

decrece conforme se va alejando de éste, hasta llegar al valor de cero a la pared de la tubería, siempre y cuando no haya resbalamiento.

Lo anteriormente dicho puede definirse matemáticamente de la siguiente manera:

$$v_r = v_{\text{máx}} \left( 1 - \frac{r^2}{r_w^2} \right) \dots \dots \dots (3.1.4)$$

donde:

$$v_{\text{máx}} = q / A$$

Para comprender mejor este régimen de flujo, ver la fig.(3.1.2)

**FLUJO TURBULENTO:** Es aquel que se genera a altas velocidades de flujo, originando que las partículas que constituyen el fluido se muevan en forma caótica o irregular formando así remolinos.

En la fig(3.1.2) se puede observar que el perfil de velocidades en flujo turbulento es más parejo, y el gradiente de velocidades cerca de la pared de la tubería es mucho más grande que en el perfil de flujo laminar para un correspondiente valor de velocidad promedio.

**FLUJO TRANSICION:** Ocurre justamente después de que las condiciones de flujo han sido modificadas y antes que las nuevas condiciones permanentes de flujo se hayan estabilizado; por ejemplo, al momento en que el fluido se comienza a bombear, al modificar los gastos, o bien al cambio de diámetros de tubería.

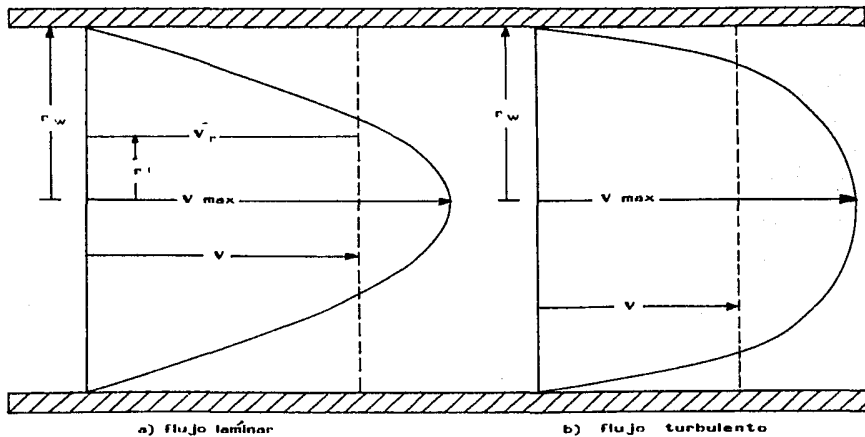


Fig. 3.1.2 Perfiles de velocidad de fluidos a través de tuberías.

**NUMERO DE REYNOLDS (Nr):** Es el parámetro de flujo adimensional cuya magnitud indica cuándo un fluido esta en régimen laminar o bien en régimen turbulento y se define como:

$$N_r = \frac{g_c d v \rho}{\mu} \quad \dots (3.1.5)$$

empleando unidades prácticas de campo:

$$N_r = \frac{25401.5 d v \rho}{\mu} \quad \dots (3.1.5a)$$

Cuando el Nr excede un valor crítico de 2100 para flujo en tuberías, entonces el flujo es turbulento, mientras que para valores menores de 2100 el flujo es laminar.

### 3.2 CLASIFICACION REOLOGICA DE LOS FLUIDOS

En esta clasificación se hace la suposición de que los fluidos se encuentran sometidos a una temperatura y presión constante, ya que si varía cualquiera de éstos parámetros, entonces variará la reología del fluido.

**FLUIDOS NEWTONIANOS:** Son aquellos que exhiben una relación directamente proporcional entre el esfuerzo de corte aplicado y el ritmo de corte resultante. La ecuación que determina éste comportamiento es:



$$\tau = \mu/g_c ( -dv_r/dr ) \dots\dots\dots(3.1.6)$$

La gráfica generada por la ecuación (3.1.6) en coordenadas cartesianas da una línea recta que pasa por el origen, con una pendiente igual a  $\mu$  como se muestra en la figura (3.1.3), por lo tanto para determinar este comportamiento sólo es necesario realizar una determinación experimental del ritmo de corte a un esfuerzo de corte aplicado.

**FLUIDOS NO NEWTONIANOS:** Son aquellos que no exhiben una relación directamente proporcional entre el esfuerzo de corte aplicado y el ritmo de corte producido, dentro de estos fluidos se tienen:

a) **FLUIDOS PLASTICOS DE BINGHAM:** Son aquellos cuyo esfuerzo de corte varía linealmente con el ritmo de corte, pero a diferencia de los fluidos newtonianos, éstos requieren sobrepasar un esfuerzo mínimo para que el fluido fluya, este esfuerzo mínimo se conoce como punto de cedencia, la ecuación que define el comportamiento de estos fluidos es:

$$(\tau - \tau_y) = \mu_p/g_c ( -dv_r/dr ) \quad ; \quad \tau > \tau_y \dots\dots\dots(3.1.7)$$

b) **FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS Y DILATANTES:** Estos fluidos se caracterizan por no tener punto de cedencia y además su viscosidad aparente (apéndice D) es una función no lineal del esfuerzo de corte y posiblemente de la duración del corte.

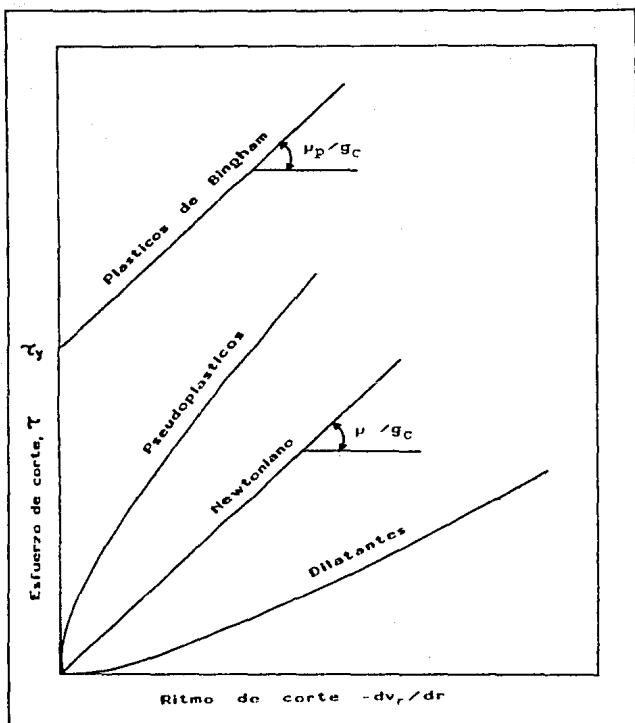


fig. 3.1.3 Curvas de flujo de fluidos newtonianos y no newtonianos.

En un fluido pseudoplástico, la viscosidad aparente (apéndice D) decrece al incrementarse el esfuerzo de corte como se observa en la figura (3.1.3), por lo tanto la pendiente de esta curva decrece continuamente hasta aproximarse a un valor constante a altos ritmos de corte.

Por otra parte los fluidos dilatantes exhiben un comportamiento reológico opuesto al pseudoplástico, pues su viscosidad aparente aumenta cuando aumenta el esfuerzo de corte.

**c) FLUIDOS CON COMPORTAMIENTO DEPENDIENTE DEL TIEMPO:** Son aquellos cuya viscosidad aparente no permanece constante a un valor fijo de ritmo de corte y de temperatura. Dentro de estos fluidos se tienen a los llamados:

**c.1) TIXOTROPICOS:** Son aquellos que exhiben un decremento en el esfuerzo de corte con respecto al tiempo de corte.

**c.2) REOPECTIVOS:** Son aquellos que exhiben un incremento en el esfuerzo de corte con respecto al tiempo de corte.

**d) MODELO DE FLUIDOS DE LA LEY DE POTENCIAS:** Este modelo representa la relación esfuerzo de corte-ritmo de corte de una gran variedad de fluidos no newtonianos (presentando como caso particular a los fluidos newtonianos) sobre un amplio rango de ritmos de corte. Este modelo esta representado por

la siguiente ecuación:

$$\tau = K (-dv_r/dr)^n \dots\dots\dots(3.1.8)$$

Donde  $n$  se conoce como índice de comportamiento de flujo y se emplea para evaluar el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido.

Si  $n$  toma el valor particular de la unidad, entonces este modelo toma la forma de la ec.(3.1.6) que es la que define a los fluidos newtonianos, donde  $K = \mu/g_c$ .

Para  $0 < n < 1$ , determina a los fluidos pseudo-plásticos, mientras que para valores de  $n > 1$  determina a los fluidos dilatantes.

De lo anterior se puede deducir que entre mayor sea la diferencia entre  $n$  y la unidad, en cualquier dirección, indicará una mayor pronunciación de las características no newtonianas de un fluido dado.

Por otra parte el coeficiente  $K$ , conocido como índice de consistencia, indicará en forma directamente proporcional que tan espeso o viscoso es un fluido.

El índice  $K$  tiene establecido un rango de valores comprendido por  $0 < K < 2$ , obtenido de datos experimentales, por lo tanto se puede decir que entre mayor sea el valor de  $K$  comprendido dentro de este rango, entonces, el fluido será más viscoso

## 4 CALCULO DE CAIDAS DE PRESION POR FRICCION (2)

## 4.1. FLUIDO NEWTONIANO

## FLUJO LAMINAR A TRAVES DE TUBERIA

En este caso las caidas de presión por fricción se deben en su totalidad a los esfuerzos de corte provocados por el resbalamiento entre las capas que conforman el fluido, y estas caidas pueden ser calculadas a partir de la ecuación de fanning:

$$\Delta P_f = \frac{2 f l \rho v^2}{g_c d} \dots\dots(4.1.1)$$

Donde  $f$  es el factor de fricción fanning, el cual está en función del número de Reynolds así como de las condiciones de superficie interna de la tubería, llamada rugosidad relativa ( $e/d$ ), tal y como se estableció en el capítulo 3 de este trabajo.

En la región laminar, donde  $Nr \leq 2000$ ,  $f$  no es afectado por la rugosidad de la tubería, como consecuencia la correlación factor de fricción-número de Reynolds es una simple recta cuya ecuación es:

$$f = \frac{16}{Nr} = \frac{16 \mu}{d v \rho} \dots\dots(4.1.2)$$

La cual al ser sustituida dentro de la ecuación (4.1.1) quedará:

$$\Delta P_f = \frac{32 \mu l v}{g_c d^3} \dots\dots\dots(4.1.3)$$

introduciendo unidades prácticas de campo :

$$\Delta P_f = \frac{\mu l v}{139.43 d^3} \dots\dots\dots(4.1.3a)$$

donde se debe recalcar que esta ecuación es válida únicamente para flujo laminar, es decir para  $Nr \leq 2100$ .

#### 4.2 FLUIDO NEWTONIANO, FLUJO TURBULENTO

##### A TRAVÉS DE TUBERÍAS..

Para un flujo turbulento estable ( $Nr > 4000$ ) a través de tuberías rectas de sección transversal circular, se ha encontrado que las caídas de presión por fricción son afectadas por las propiedades físicas del fluido así como de la geometría y de las condiciones de superficie interna (rugosidad) de la tubería.

Partiendo de la ecuación de fanning(2):

$$F = \frac{\Delta P_f}{\rho} = \frac{2 f l v^2}{g_c d} \dots\dots\dots(4.2.1)$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación por  $\rho$  e introduciendo unidades prácticas:

$$\Delta P_f = \frac{f l \rho v^2}{11.41 d} \dots\dots\dots(4.2.2)$$

Donde el parámetro adimensional  $f$  se define como el factor de fricción fanning, el cual está en función del número de Reynolds así como de las condiciones de superficie interna de la tubería conocida como rugosidad relativa, para ver el procedimiento de cálculo de  $f$ , referirse al apéndice (F).

#### 4.3 FLUIDO NEWTONIANO, FLUJO LAMINAR A TRAVÉS DE ESPACIO ANULAR

Considerando que el flujo a través del espacio anular de dos tuberías de sección transversal circular y concéntricas, es equivalente al flujo a través de un canal de amplitud  $w$  y de área de sección transversal  $A$ , formada por dos placas paralelas de longitud  $L$  (ver apéndice C), entonces, partiendo de la ley de Hagen-Poiseuille<sup>(2)</sup>:

$$q = \frac{g_c A w^3 \Delta p_f}{12 \mu L} \dots \dots \dots (4.3.1)$$

donde:

$$A = \frac{w (d_o - d_i)^2}{4}$$

$$w = \frac{d_o}{2} - \frac{d_i}{2} = \frac{d_o - d_i}{2}$$

$d_o$  = diámetro interno de la tubería externa

$d_i$  = diámetro externo de la tubería interna

Haciendo:  $q = v A$  y  $w^3 = (d_o - d_i)^3 / 8$  sustituyendo en (4.3.1) y despejando  $\Delta p_f$ :

$$v_A = \frac{g_c A P_f}{12 \mu L} \frac{(d_0 - d_1)^2}{4}$$

$$\Delta P_f = \frac{48 \nu \mu L}{g_c (d_0 - d_1)^2} \dots\dots\dots(4.3.2)$$

empleando unidades prácticas:

$$\Delta P_f = \frac{\mu L v}{92.95 (d_0 - d_1)^2} \dots\dots\dots(4.3.2a)$$

#### 4.4 FLUIDO NEWTONIANO, FLUJO TURBULENTO A TRAVÉS DE ESPACIO ANULAR

Para flujo turbulento a través del espacio anular, se parte del concepto diámetro equivalente ( $d_e$ ) (ver apéndice C), cuya característica principal es la de simular el flujo a través del espacio anular.

Calculando  $d_e$ , y sustituyéndolo en la ec.(3.1.5.a) se obtiene  $N_r$ , si  $N_r < 2100$ , entonces se obtiene  $\Delta P_f$  en forma directa al sustituir este valor en la ecuación (4.1.3.a), en caso contrario, calcular  $f$  por medio de la gráfica o bien de las ecuaciones presentadas en el apéndice (F), con el valor de  $f$  obtenido sustituir en la ec.(4.2.2) y obtener  $\Delta P_f$ .



#### 4.5 ECUACIONES GENERALIZADAS DE FLUJO A TRAVES DE TUBERIAS

En el presente subtema se desarrollarán ecuaciones generalizadas para flujo de fluidos newtonianos y no newtonianos.

Para un flujo estable e isotérmico que fluye a través de una tubería circular recta, la caída de presión por fricción puede ser determinada analíticamente, haciendo las siguientes suposiciones:

1.- No hay deslizamiento en la pared, es decir, la velocidad del fluido en contacto con la pared de la tubería es cero.

2.- Todas las partículas situadas en una capa cilíndrica de radio  $r$  y espesor infinitesimal  $d_r$  viajan en grupo a una velocidad constante  $v_r$  paralela al eje de la tubería.

3.- El ritmo de corte o gradiente de velocidad producido en cualquier punto en el flujo, como una capa de fluido que desliza sobre otra, es función únicamente del esfuerzo de corte a ese punto.

Considerar el flujo estable de un fluido a través de una sección de tubería horizontal de radio  $r_w$ , dentro de la cual se coloca un cilindro aislado en forma concéntrica a la tubería, este cilindro es de radio  $r$  y de longitud  $L$  como se muestra en la fig (4.5.1). Se puede observar que este cilindro está bajo la acción de dos fuerzas opuestas. La presión diferencial  $(P_1 - P_2)$ , que actúa en los extremos

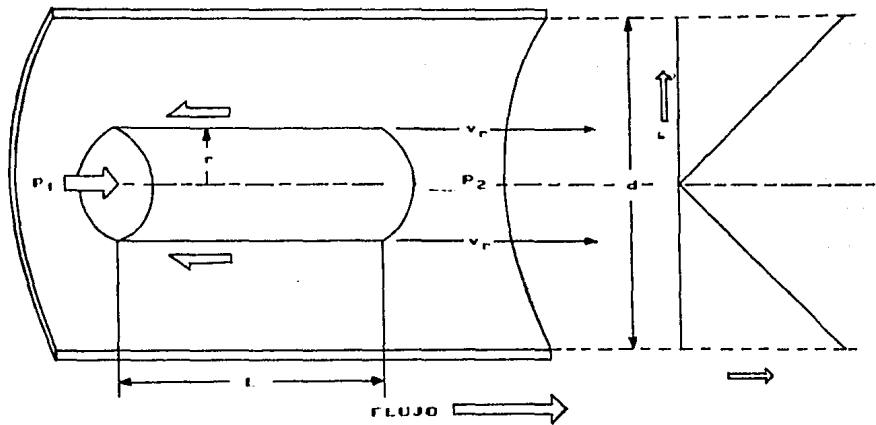


Fig. 4.5.1 Diagrama de cuerpo libre y distribución de esfuerzos de corte para flujo laminar a través de tuberías

del cilindro de área igual a  $\pi r^2$ , tiende a empujar el cilindro en dirección del flujo. Al mismo tiempo, las partículas de fluido que residen justo en la superficie curvada del cilindro ( $2\pi rL$ ) están siendo cortadas, pasando estas partículas inmediatamente fuera de esta superficie, y como resultado, esto experimenta un esfuerzo de corte  $\tau$ , el cual se opone a un movimiento hacia adelante del cilindro. Si el fluido en este cilindro no está acelerado (condición de flujo estable) estas dos fuerzas se cancelan una con otra es decir:

$$F_1 = F_2$$

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 = \tau(2\pi rL)$$

$$\Delta P_f \pi r^2 = \tau(2\pi rL)$$

Donde, la caída de presión ( $P_1 - P_2$ ) es causada en su totalidad por la fricción  $\Delta P_f$ . Por otra parte el esfuerzo de corte producido a lo largo de la superficie curvada de radio  $r$  es:

$$\tau = \frac{\Delta P_f \pi r^2}{2 \pi r L}$$

$$\tau = \frac{r}{2} \left( \frac{\Delta P_f}{L} \right) \dots \dots \dots (4.5.1)$$

Y, en particular, el esfuerzo de corte desarrollado en la

pared de la tubería esta dado por:

$$d = 2 r_w$$

$$r_w = d/2$$

donde:  $d$  = diámetro interno de la tubería.

$r_w$  = radio interno de la tubería.

Sustituyendo este valor en la ecuación (4.5.1) y haciendo

$r_w = r$  y  $r_w = r$ :

$$\tau_w = \frac{d \Delta p f}{4 L} \dots \dots \dots (4.5.2)$$

cuya magnitud es determinada directamente.

A partir de las ecs. (4.5.1) y (4.5.2) se puede obtener una expresión para la distribución del esfuerzo de corte en el fluido, en términos del esfuerzo de corte conocido a la pared y de la posición radial del elemento de fluido bajo consideración.

Despejando  $\Delta p f/L$  de (4.5.2) y sustituyendo en (4.5.1):

$$\tau = \frac{r}{2} \left( \frac{4}{d} \tau_w \right)$$

$$\tau = \frac{2}{d} \tau_w r$$

derivando el esfuerzo de corte con respecto al radio:

$$d\tau = \frac{2}{d} \tau_w dr \dots \dots \dots (4.5.3)$$

De la ecuación (4.5.3) se puede ver que el esfuerzo de corte es una función lineal del radio, donde, a lo largo del eje de flujo, el esfuerzo es cero y este se incrementará con el radio a un valor máximo de  $\tau_w$  dado por la ecuación (4.5.2) a la pared interna.

Ya que el ritmo de corte  $dv_r/dr$ , fue supuesto como una función únicamente del esfuerzo de corte, entonces:

$$- \frac{dv_r}{dr} = k \mu(\tau)$$

$$dv_r = -k \mu(\tau) dr \dots\dots\dots(4.5.4)$$

donde  $k$  es una constante y  $\mu(\tau)$  representa alguna función no especificada de  $\tau$ . El signo menos es introducido aquí debido a que  $dv_r/dr$  es una cantidad negativa, es decir,  $v_r$  decrece cuando  $r$  se incrementa, ver fig.(4.5.2).

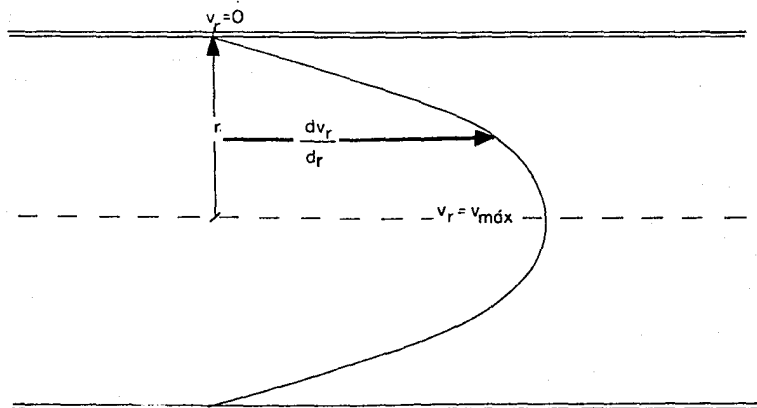
Empleando la ec.(4.5.3) se puede expresar la distribución diferencial de la velocidad de la ec.(4.5.4) en términos de  $\tau$  en lugar de  $r$ , ya que estas dos cantidades se encuentran relacionadas linealmente .

Despejando  $dr$  de (4.5.3):

$$dr = \frac{d\tau}{2 \tau_w}$$

sustituyendo en (4.5.4):

$$dv_r = -k \mu(\tau) \frac{d\tau}{2 \tau_w} d\tau$$



FIG(4.5.2) PERFIL DE VELOCIDADES DE UN FLUIDO

pasando de función de  $r$  a función de  $\tau$ :

$$dv_r = - \frac{k d}{2 \tau W} \mu(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(4.5.5)$$

Integrando esta última expresión; (a) de algún punto de radio  $r$  a la pared, donde  $r=r_W$  y  $v_r=0$ , o bien, (b) de algún punto donde el esfuerzo de corte es  $\tau$ , a la pared donde  $\tau=\tau_W$  y  $v_r=0$ , se obtiene la distribución de velocidades de la partícula en la tubería:

$$\int_r^{r_W} dv_r = \int_\tau^{\tau_W} dv_r = - \frac{k d}{2 \tau W} \int_\tau^{\tau_W} \mu(\tau) d(\tau)$$

integrando el término izquierdo:

$$\left[ v_r \right]_\tau^{\tau_W} = - \frac{k d}{2 \tau W} \int_\tau^{\tau_W} \mu(\tau) d\tau$$

pero  $v_r=0$  cuando  $\tau=\tau_W$ , entonces:

$$- v_r = - \frac{k d}{2 \tau W} \int_\tau^{\tau_W} \mu(\tau) d\tau$$

cancelando signos:

$$v_r = \frac{k d}{2 \tau W} \int_\tau^{\tau_W} \mu(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(4.5.6)$$

El gasto de fluido transferido en una capa cilíndrica de radio  $r$  y espesor  $dr$  la cual se mueve a una velocidad  $v_r$ , está dada por:

$$dq = v_r dA = v_r (2\pi r dr) \dots\dots\dots(4.5.7)$$

Donde, a partir de la ecuación (4.5.3) se puede obtener una expresión para  $dA$ :

$$dv = \frac{2}{d} \frac{v_W}{r} dr \dots\dots\dots(4.5.3)$$

despejando  $dr$ :  $dr = \frac{d}{2} \frac{dv}{v_W} \dots\dots\dots(4.5.3a)$

pero  $dA = 2\pi r dr$ , entonces despejando  $dr$ :  $dr = dA/2\pi r$   
sustituyendo en la ec.(4.5.3a):

$$\frac{dA}{2\pi r} = \frac{d}{2} \frac{dv}{v_W}$$

despejando  $dA$ :

$$dA = 2\pi r \frac{d}{2} \frac{dv}{v_W}$$

pero  $dA = 2\pi r dr$  y  $r = (d/2) \frac{v}{v_W}$ ; sustituyendo y acomodando

$$2\pi r dr = \pi \frac{d}{2} \frac{v}{v_W} \frac{d}{v_W} dv$$

$$2\pi r dr = \frac{\pi}{2} \frac{d^2}{v_W^2} v dv \dots\dots\dots(4.5.7a)$$



El gasto de flujo diferencial previamente establecido en la ecuación (4.5.7) puede ser establecido en términos de  $v$  exclusivamente, esto se logra sustituyendo (4.5.6) y (4.5.7a) en (4.5.7):

$$dq = \frac{v k d^3}{4 \tau_w^3} v \left[ \int_v^{\tau_w} \mu(v) dv \right] dv \dots\dots(4.5.8)$$

La integración de esta ecuación sobre la sección transversal de la tubería, desde  $v=0$  (en el eje) a  $v=\tau_w$  (en la pared) proporcionará el gasto total de flujo:

$$q = \frac{v k d^3}{4 \tau_w^3} \int_0^{\tau_w} v \left[ \int_v^{\tau_w} \mu(v) dv \right] dv \dots\dots(4.5.9)$$

si se define la velocidad promedio de flujo  $\bar{v}$  como:

$$q = \bar{v} A = \bar{v} \frac{v d^2}{4}$$

entonces, se puede reorganizar la ecuación (4.5.9) como sigue:

$$\frac{\bar{v} d^2}{4} v = \frac{v k d^3}{4 \tau_w^3} \int_0^{\tau_w} v \left[ \int_v^{\tau_w} \mu(v) dv \right] dv$$

$$\frac{v}{d} = \frac{k}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau \left[ \int_0^{\tau_w} \mu(\tau) d\tau \right] d\tau \dots (4.5.10)$$

La doble integral dada en la ecuación (4.5.10) se puede simplificar integrando por partes, lo cual generará la expresión general para flujo laminar en tuberías.

$$\frac{v}{d} = \frac{k}{2 \tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \mu(\tau) d\tau \dots (4.5.11)$$

Esta ecuación indica que una gráfica de  $v/d$  contra  $\tau_w$  (o bien,  $d \Delta p / 4L$ ) debe generar una única curva para un tipo de fluido dado, tal curva es dependiente solamente de las propiedades reológicas del fluido o de la dependencia funcional del ritmo de corte bajo el esfuerzo de corte el cual es expresado por  $k\mu(\tau)$ .

Reacomodando la ecuación (4.5.11) de la siguiente forma:

$$\left[ \frac{2}{k} \frac{v}{d} \right] \tau_w^3 = \int_0^{\tau_w} \tau^2 \mu(\tau) d\tau$$

Diferenciando con respecto a  $v_W$  :

$$\left[ \frac{2}{k} \frac{v}{d} \right] \cdot v_W + v_W \cdot \frac{d(2v/d)}{d v_W} = v_W \cdot k'(v_W)$$

La cual, se puede además simplificar multiplicando todos los términos por  $(k/v_W^2)$ :

$$3 \left[ \frac{2}{d} \frac{v}{v_W} \right] + \frac{d(2v/d)}{d v_W} = k'(v_W)$$

En la obtención de la ecuación (4.5.11), el ritmo de corte  $(dv_r/d_r)$  fue supuesto como una función no especificada del esfuerzo de corte representado por  $k'(v)$ . Esta misma función aparece otra vez en la ecuación anterior, sólo que ahora es evaluada al valor particular de esfuerzo de corte desarrollado a la pared de la tubería,  $v_W$  por lo tanto representa el ritmo de corte a la pared, denotado por  $(- dv_r/d_r)_W$ , introduciendo esta expresión equivalente para  $k'(v_W)$ , reemplazando  $v_W$  por  $(d \Delta p_x/4L)$  y además multiplicando todos los términos por  $4/4$  la ecuación anterior se puede reorganizar de la siguiente forma:

$$\left[ - \frac{dv_r}{d_r} \right]_W = \frac{3}{4} \left[ \frac{2}{d} \frac{v}{v_W} \right] + \frac{1}{4} \left[ \frac{d \Delta p_x}{4L} \right] \frac{d(2v/d)}{d(d \Delta p_x/4L)} \quad (4.5.12)$$

La cual constituye una expresión completamente general para la evaluación del ritmo de corte en la pared de la tubería causado por un esfuerzo de corte aplicado ( $\tau_v$ ).

Con el fin de simplificar la relación de derivadas de la ecuación (4.5.12) Metzner y Reed<sup>(7)</sup> introdujeron una modificación adicional, reorganizando el último término de la ecuación (4.5.12) introduciendo  $(\delta v/d)$ :

$$\left[ -\frac{dv_r}{dr} \right]_v = \frac{3}{4} \left[ \frac{\delta v}{d} \right] + \frac{1}{4} \left[ \frac{\delta v}{d} \right] \frac{[d(\delta v/d)] / (\delta v/d)}{[d(\delta \Delta p_f/4L)] / (d \Delta p_f/4L)}$$

La cual no es de gran ayuda, a menos que se introduzca el término  $d(\ln \delta) = d \ln \delta$ , reconociendo este tipo de expresión en la presente ecuación anterior se puede escribir:

$$\left[ -\frac{dv_r}{dr} \right]_v = \frac{3}{4} \left[ \frac{\delta v}{d} \right] + \frac{1}{4} \left[ \frac{\delta v}{d} \right] \frac{d \ln (\delta v/d)}{d \ln (d \Delta p_f/4L)} \dots (4.5.13)$$

Representando la relación de derivadas de la ecuación (4.5.13) mediante el símbolo  $1/n'$  Metzner y Reed<sup>(7)</sup> obtuvieron una expresión final de la forma:

$$\frac{d \ln (\delta v/d)}{d \ln (d \Delta p_f/4L)} = \frac{1}{n'}$$

entonces:

$$\frac{3}{4} + \frac{1}{4n'} = \frac{3n' + 1}{4n'}$$

finalmente:

$$\left[ - \frac{dv_r}{dr} \right]_w = \frac{3n' + 1}{4n'} \left[ \frac{\partial v}{\partial r} \right] \dots (4.5.14)$$

A partir de la pendiente de una gráfica logarítmica hecha a base de datos obtenidos de un viscosímetro en la forma de  $(d\Delta p_f/4L)$  contra  $(8v/d)$ , la relación de derivadas  $n'$  puede ser fácilmente evaluada (ver fig.(4.5.3)).

Mientras que la pendiente de tal curva ha sido definida como constante sobre un amplio rango de esfuerzos de corte para la gran mayoría de fluidos no newtonianos, puede presentarse la circunstancia excepcional en la cual  $n'$  sea definida como una función de  $\tau_w$ , esto no dificulta el hacer una evaluación punto a punto de la pendiente, ésta evaluación gráfica del parámetro  $n'$  junto con la ecuación (4.5.14), hace posible establecer una curva de flujo absoluta para cualquier fluido (excluyendo a los de comportamiento tixotrópico y reopéctico) a partir de datos de flujo laminar a través de tuberías.

En coordenadas logarítmicas,  $\tau$  se graficaría como una función lineal de  $(-dv_r/dr)$  con la misma pendiente de  $\tau_w$  contra  $(8v/d)$ , pero cuando  $n'$  es constante, entonces la ecuación (4.5.14) admite que  $(-dv_r/dr)_w$  y  $(8v/d)$  sean idénticos, excepto por el factor constante que lo multiplica  $(3n'+1)/(4n')$ .

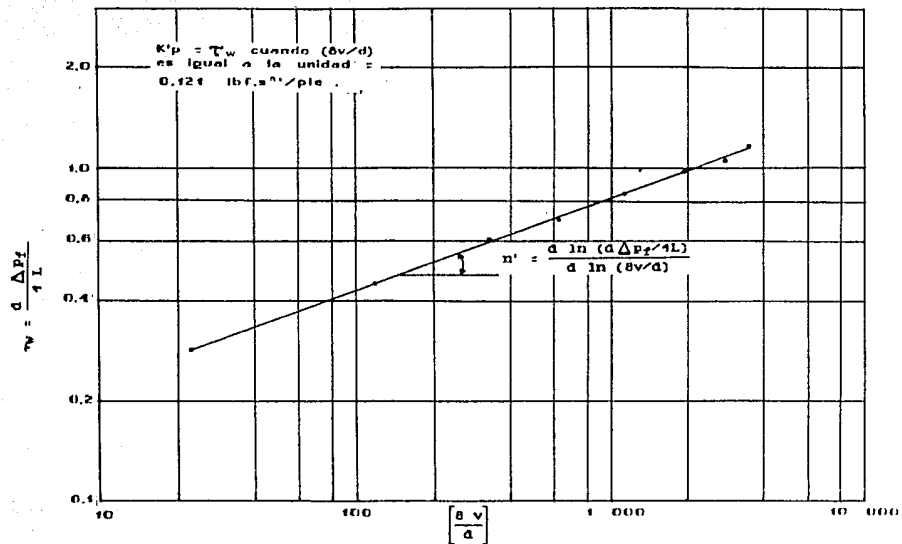


fig. 4.5.3 Datos proporcionados por un viscosímetro de una  
 suspensión de agua que contiene 25 % de carbonato de calcio,  
 con una densidad de 73.5 lbm/pie<sup>3</sup>.

Bajo la investigación del significado físico del parámetro de flujo  $n'$ , Metzner y Reed<sup>(7)</sup>, concluyeron que este parámetro podría ser empleado como un índice cuantitativo para comparar el grado de comportamiento no newtoniano exhibido por todos los fluidos (dependientes del tiempo). Posteriormente esta propuesta ha sido reconocida así como estandarizada para clasificar las propiedades reológicas de los fluidos empleados en fracturamientos hidráulicos (API-RP-39).

Como se sabe  $n'$  se define como:

$$n' = \frac{d \ln (d \Delta P_f / 4L)}{d \ln (8v/d)}$$

Y es evaluada a partir de la pendiente de una línea recta dibujada tangente a la curva logarítmica de  $\tau_w$  contra  $(8v/d)$  a cualquier valor particular de  $\tau_w$  en cuestión. La ecuación de esta línea tangente puede ser descrita de la siguiente forma:

como se sabe:  $d \Delta P_f / 4L = \tau_w$

entonces:

$$n' = \frac{d \ln (\tau_w)}{d \ln (8v/d)}$$

Como  $n'$  es considerado constante sobre un amplio rango de esfuerzos de corte para la gran mayoría de los fluidos:

$$n'd \ln(8v/d) = d \ln(\tau_w)$$

aplicando:

$$n \ln A = \ln A^n$$

$$d \ln(8v/d)^{n'} = d \ln(\tau_w)$$

aplicando:

$$\int \frac{dv}{v} = \ln v + C = \ln v + \ln C = \ln cv$$

donde C es una constante de integración

$$\ln C_1 (8v/d)^{n'} = \ln C_2 (\tau_w)$$

eliminando logaritmos:

$$C_1 (8v/d)^{n'} = C_2 (\tau_w)$$

haciendo  $C_1/C_2 = K'p$  :

$$\tau_w = \frac{d \Delta P_f}{4 L} = K'p \left[ \frac{8v}{d} \right]^{n'} \dots \dots \dots (4.5.15)$$

Donde  $K'p$  es el valor que intercepta a la línea tangente



con el eje  $\tau_w$ , donde  $8v/d$  es igual a la unidad.

Como se ilustra en la figura (4.5.3), la gráfica logarítmica de  $\tau_w$  contra  $8v/d$  para la mayoría de los fluidos será lineal sobre un amplio rango de esfuerzos de corte.

En este rango tanto  $n'$  como  $K'p$  permanecen constantes (es decir son independientes de  $\tau_w$ ), entonces, la ecuación (4.5.15) es la ecuación de la curva logarítmica, así como de su tangente. Para fluidos excepcionales cuyas curvas logarítmicas no son lineales, entonces  $n'$  y  $K'p$  son funciones de  $\tau_w$  pero una reevaluación continua de estos parámetros a cada cambio de valores de  $\tau_w$  (ó de  $8v/d$ ) permite todavía emplear la ecuación (4.5.15) para representar la curva logarítmica. En otras palabras, las características de flujo de todos los fluidos pueden ser definidas completamente por la relación laminar ( $d\Delta p_f/4L$ ) contra ( $8v/d$ ) dada por la ecuación (4.5.15), sin importar si  $n'$  y  $K'p$  son constantes o no.

Cuando la expresión para  $8v/d$  en la ecuación (4.5.14) se sustituye en la ecuación (4.5.15) resulta:

$$\left[ - \frac{dv_r}{dr} \right]_w = \frac{3n' + 1}{4n'} \left[ \frac{8v}{d} \right] \dots\dots(4.5.14)$$

$$\left[ \frac{\partial v}{\partial r} \right] = \left[ - \frac{dv_r}{dr} \right]_W + \left[ \frac{3n' + 1}{4n'} \right]$$

reacomodando:

$$\left[ \frac{\partial v}{\partial r} \right] = \left[ - \frac{dv_r}{dr} \right]_W \left[ \frac{4n'}{3n' + 1} \right]$$

sustituyendo en (4.5.15):

$$\tau_W = K' p \left[ - \frac{dv_r}{dr} \right]_W^{n'} \left[ \frac{4n'}{3n' + 1} \right]^{n'} \dots\dots(4.5.16)$$

Se puede ahora demostrar el significado físico del parámetro de flujo  $n'$ ; para  $n'$  constante con valor igual a 1, la ecuación (4.5.16) se vuelve:

$$\tau_W = K' p \left[ - \frac{dv_r}{dr} \right]_W \dots\dots\dots(4.5.17)$$

Que es la relación lineal básica entre el esfuerzo de corte y el ritmo de corte característico de los fluidos newtonianos como previamente se introdujo en la ecuación (3.1.6), donde  $K' p = \mu/g_c$ .

Para  $n' = \text{cte.}$ , pero menor que la unidad se obtiene:

$$\tau_W = K \left[ - \frac{dv_r}{dr} \right]_W^{n'} \dots\dots\dots(3.1.8)$$

Que es la relación de la ley de potencias, la cual aproxima el comportamiento de algunos fluidos pseudoplásticos, donde:

$$K = K'P \left[ \frac{4n'}{3n' + 1} \right] ; \text{ y } n = n' \dots\dots(4.5.18)$$

Finalmente, si  $n'$  es constante pero mayor que la unidad entonces el fluido será dilatante.

El parámetro adimensional  $n'$ , llamado índice de comportamiento de flujo, es reconocido como la propiedad física de un fluido, la cual caracteriza el grado de su comportamiento no newtoniano. La variación de éste índice con respecto a la unidad en cualquier dirección indica el comportamiento no newtoniano en forma más pronunciada de un fluido.

El parámetro  $K'P$ , el cual se presenta generalmente en  $(\text{lb/seg}^{n'}/\text{pie}^2)$  es igualmente una propiedad física del fluido, llamada índice de consistencia.

Mientras dos fluidos pueden exhibir el mismo índice de comportamiento de flujo, el más espeso o el más aparentemente viscoso, tendrá el mayor índice de consistencia.

En términos de estas dos propiedades físicas fundamentales se puede describir el comportamiento de flujo de todos los fluidos en una forma completamente general y rigurosa. El único reconocimiento especial es el

correspondientes a los fluidos newtonianos cuyo índice de comportamiento de flujo es siempre igual a la unidad.

En general, los fluidos no newtonianos exhibirán valores constantes de  $n'$  y  $K'p$ , sobre un amplio rango de esfuerzos de corte.

Por lo tanto se puede concluir que estos mismos fluidos pueden también seguir la relación de la ley de potencias dada por la ecuación (3.1.8) con  $n$  y  $K$  constantes.

Considerando adicionalmente a los fluidos cuyos parámetros  $n'$  y  $K'p$  sean funciones del esfuerzo de corte, entonces estos fluidos podrán también ser representados por la ec.(3.1.8) entendiendo que  $n$  y  $K$  serán igualmente funciones del esfuerzo de corte.

De lo anterior se puede decir que el par de índices que representan mejor las propiedades físicas de los fluidos son  $n$  y  $K$ , pues estos son independientes del tipo de aparato en el cual se hagan las mediciones reológicas, siendo estos los índices físicos verdaderos.

Desafortunadamente la ec.(3.1.8) la cual emplea estos parámetros, relaciona el esfuerzo de corte sólo al ritmo de corte y no al gasto.

Para obtener una ecuación para la velocidad de flujo promedio en una tubería se requiere efectuar una doble integración de la ec.(3.1.8) sobre un rango de esfuerzos de corte de  $v=0$  a  $v=v_y$  y a menos que  $n$  fuera constante sobre este rango, esto generaría integrales múltiples.

Por otra parte,  $n'$  y  $K'p$  pueden ser obtenidos directamente de datos de flujo laminar a través de tuberías (fig.4.5.3), donde se puede apreciar claramente una relación directa entre la caída de presión  $\Delta p_f$  y la velocidad promedio de flujo  $v$  para flujo laminar en tuberías, la cual es una solución gráfica de la gráfica logarítmica de  $\tau_w$  contra  $8v/d$ , sin embargo la ec.(4.5.15) es inherentemente superior a la ec.(3.1.8) para el análisis de sistemas de flujo a través de tuberías, pues involucra la relación de la ley de potencias así como de la ley de no potencias.

Aunque la ecuación (4.5.15) ha sido ya reconocida como una expresión general que relaciona la caída de presión y la velocidad de flujo a partir de las dimensiones de la tubería y de las propiedades físicas del fluido ( $n'$  y  $K'p$ ), la ecuación de Fanning puede también ser generalizada a partir de la introducción de un factor de fricción modificado. Sin embargo es de mayor importancia el desarrollo de un número de Reynolds generalizado.

Rearreglando la ec.(4.2.1):

$$f = \frac{(d \Delta p_f / 4L)}{(\rho v^2 / 2 g_c)}$$

Sustituyendo la expresión general de la ec.(4.5.15) en  $(d \Delta p_f / 4L)$  se obtiene:

$$f = \frac{2 g_c K' P}{\rho v^2} \left[ \frac{8 v}{d} \right]^{n'}$$

la cual se puede simplificar de la siguiente manera:

$$f = \frac{16 g_c K' P (8^{n'} - 1)}{\rho v^{2-n'} d^{n'}} \dots\dots\dots(4.5.19)$$

Si se requiere de  $f=16/N_R'$  para fluidos newtonianos en flujo laminar, la ec.(4.5.19) sugiere una expresión para un número de Reynolds generalizado  $N_R'$  dado por el grupo adimensional:

$$N_R' = \frac{d^{n'} v^{2-n'} \rho}{g_c K' P (8^{n'} - 1)} \dots\dots\dots(4.5.20)$$

Ya que la ecuación generada originalmente para este desarrollo (ec.4.5.14) o su precursora (4.5.11) involucran sólo tres suposiciones implícitas concernientes a la naturaleza de flujo del fluido (la ausencia de comportamiento tixotrópico o reopéctico y el no resbalamiento del fluido a la pared de la tubería), se puede concluir del presente análisis que el flujo de todos los fluidos en régimen laminar a través de tuberías seguirán la relación universal dada por  $f=16/N_R'$ , donde  $N_R'$  es el número de Reynolds generalizado definido en la ec.(4.5.20).

Este argumento goza de una amplia aplicación y además puede ser empleado para verificar la precisión de los datos proporcionados por el viscosímetro.

Cualquier desviación del criterio de  $f=16/N_R'$  en la región de flujo laminar indica:

- 1.- Que los datos o los cálculos son erróneos.
- 2.- Que los fluidos muestran evidencia de comportamiento tixotrópico o reopéctico, o bien:
- 3.- Hay deslizamiento en la pared de la tubería.

Para fluidos newtonianos,  $N_R'$  se reducirá a la simple expresión  $dv/\mu$ , la cual muestra que es sólo un caso particular de la expresión general dada por la ec.(4.5.20).

En un estudio de datos de flujo publicados que abarcan 60 diferentes fluidos no newtonianos, con diámetros de tuberías que varían de 1/8 a 12 pg. y números de Reynolds generalizados sobre un rango de  $2 \times 10^9$ , Metzner y Reed<sup>(7)</sup> reportaron buenos resultados para todos los datos de flujo laminar con el criterio  $f=16/N_R'$ . Además, tentativamente establecieron el flujo turbulento para todos los fluidos con un  $N_R' \geq 2100$ .

Restringiendo la atención al modelo de fluido de la ley de potencias (es decir aquellos fluidos cuya  $n'$  y  $k'p$  son constantes verdaderas) entonces se puede emplear cualquier ecuación de fanning o bien la ec.(4.5.15) para calcular las caídas de presión por fricción para flujo laminar a través

de tuberías. Haciendo caso omiso de la elección hecha, el número de Reynolds generalizado casi siempre es evaluado para comprobar las condiciones laminares prevaletientes.

Consecuentemente, un procedimiento lógico es calcular  $f$  de la ec.  $f=16/N_R'$  y entonces proceder con la ecuación de Fanning.

Para simplificar parcialmente la evaluación de  $N_R'$  entonces, la ecuación (4.5.20) presentada en unidades consistentes puede ser reducida a:

$$N_R' = 15.52 \frac{(d/12)^{n'} (v\sqrt{3.28})^{2-n'} \rho}{g^{n'} K'p} \dots (4.5.20a)$$

Considerando que las unidades de  $K'p$  permanecen en (lbf  $s^{n'}/pie^2$ ) y además si se reemplaza el término  $K'p(8v/d)^{n'}$  por  $\tau_w$  de la ec.(4.5.15), entonces la expresión para calcular el número de Reynolds se reduce a:

$$N_R' = \frac{8 v^2 \rho}{g_c \tau_w} \dots (4.5.21)$$

empleando unidades de campo:

$$N_R' = 167 \frac{v^2 \rho}{\tau_w} \dots (4.5.21a)$$

La ec.(4.5.21) conviene emplearla sólo cuando se dispone de una gráfica de  $\tau_w$  contra  $8v/d$ , obtenida a partir de



datos de un viscosímetro capilar como se ilustra en la figura (4.5.3) .

Una vez que el parámetro  $8v/d$  ha sido evaluado para una situación particular de flujo, entonces el valor correspondiente de  $\tau_w$  empleado en la ec.(4.5.21) o bien en la (4.5.21a) es simplemente leído de la gráfica logarítmica, entonces si  $N_{R'}$  resulta menor que 2100, este mismo valor de  $\tau_w$  puede ser empleado para calcular  $\Delta p_f$  en forma directa, ya que  $\tau_w = d \Delta p_f / 4L$ .

Los fluidos con comportamiento de la ley de no potencias no presentan problemas adicionales en situaciones de flujo laminar, pues la relación  $f=16/N_{R'}$  es válida sin importar si  $n'$  o  $K'p$  sean constantes o no. Sin embargo, la evaluación de  $N_{R'}$  a partir de la ec.(4.5.20) o de su ecuación alterna requerirá de un procedimiento de ensaye y error, ya que  $n'$  y  $K'p$  serán funciones de  $\tau_w$ , y normalmente  $\tau_w$  es la cantidad buscada.

Afortunadamente empleando la ec.(4.5.21) en combinación con una gráfica logarítmica de  $\tau_w$  contra  $8v/d$  se evita esta dificultad.

Para flujo laminar, las variaciones de  $n'$  y  $K'p$  con cambios de  $\tau_w$  son exhibidos gráficamente.

Dodge y Metzner<sup>(2)</sup> basándose en investigaciones teóricas

y experimentales, establecieron una definición más específica del fenómeno de turbulencia a través de tuberías desarrollando una relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds que abarca la gran mayoría de los fluidos no newtonianos representativos, entre los cuales hay soluciones de polímeros, suspensiones sólidos líquidos y fluidos que siguen la ley de potencias, así como los que no siguen esta ley.

Sus resultados son presentados en la fig.(4.5.4) como una gráfica del factor de fricción generalizado, la cual es aplicable a sistemas newtonianos y no newtonianos por igual.

Como parámetros de correlación son usados el número generalizado de Reynolds y el índice de comportamiento de flujo  $n'$  introducido previamente en el análisis de flujo laminar en tuberías. Como consecuencia, las curvas de la fig.(4.5.4) son adecuadas para el análisis de sistemas de flujo en tuberías manejando fluidos de la ley de potencias.

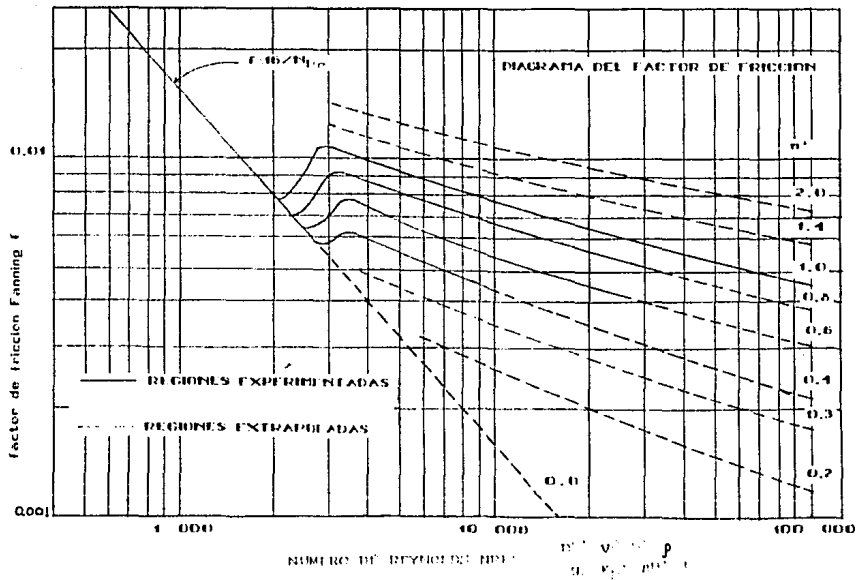


Fig. A-3-4 Factor de fricción generalizado para fluidos no newtonianos

Aunque porciones de la región de transición de las curvas de la fig.(4.5.4) fueron ubicadas un poco arbitrarias, el número de Reynolds correspondiente a la región de flujo turbulento estable fue encontrado para incrementarse lentamente cuando decrecen los valores de  $n'$ .

Una vez que el número de Reynolds ha sido evaluado y el factor de fricción leído de la curva apropiada de  $n'$  de la fig.(4.5.4) el cálculo de la caída de presión por fricción debido al flujo turbulento de un fluido de la ley de potencias se vuelve idéntico al procedimiento usual para fluidos newtonianos.

Quizá el procedimiento alterno para evaluar el número de Reynolds en flujo turbulento presenta consideraciones adicionales, que consisten esencialmente en evaluar  $\tau_w$  utilizado en la ec.(4.5.21) el cual fue leído de una gráfica logarítmica de  $\tau_w$  contra  $8v/d$ , la cual a su vez fue construida a partir de datos de flujo en régimen laminar.

En pocas palabras para la evaluación del número de Reynolds en régimen turbulento se pueden emplear datos en régimen laminar. Se debe recalcar que esta técnica es válida sólo en el caso de fluidos con comportamiento de la ley de potencias que dependen a su vez de los índices  $n'$  y  $K'p$ , los cuales esencialmente permanecen constantes sobre un rango de esfuerzos de corte que a su vez incluirá todos los valores de  $\tau_w$ .

Por otra parte la viscosidad  $\mu$  de un fluido newtoniano, también evaluada bajo condiciones de flujo laminar, se supone que permanece constante y por lo tanto es empleada en la relación  $dv/\mu$  para establecer el número de Reynolds tanto para régimen laminar como turbulento.

Las curvas de factor de fricción-número de Reynolds de la fig.(4.5.4) son válidas también para fluidos que siguen la ley de no potencias siempre que los parámetros  $n'$  y  $K'p$  sean evaluados al esfuerzo de corte existente en la pared  $\tau_w$  entonces se establecerá que la respuesta del ritmo de corte del fluido en la vecindad inmediata de la pared es responsabilidad primaria de la velocidad promedio de flujo. Sin embargo, para flujo turbulento, no puede evitarse un proceso de ensaye y error, pero si  $\Delta P_f$  es la cantidad buscada, entonces  $\tau_w$  es desconocido y sus correspondientes valores de  $n'$  y  $K'p$  empleados en la evaluación del  $N_R'$  son igualmente desconocidos. Afortunadamente, la mayoría de los fluidos no newtonianos son esencialmente modelos de fluidos de la ley de potencias, los cuales rara vez se alejarán de este modelo de comportamiento. Así, los índices de  $n'$  y  $K'p$  cambian lentamente al variar el esfuerzo de corte en la pared, lo cual acelera la convergencia de la solución por ensaye y error.

#### 4.6 ECUACIONES GENERALIZADAS PARA FLUJO A TRAVÉS DE ESPACIO ANULAR

Mediante el empleo de técnicas analíticas similares a las desarrolladas en la sección anterior una ecuación general puede ser desarrollada para flujo a través de un canal. Sea un sistema como el mostrado en la fig. (4.6.1) con extensión lateral  $E$  mucho mayor que su anchura  $W$ .

En este caso se hacen las mismas suposiciones que para flujo a través de tuberías.

Considerar el flujo estable de un fluido a través de una sección de placas paralelas separadas una de otra una distancia  $W$ . Dentro de estas se coloca un plano de espesor  $(2y)$  en forma paralela y equidistante como se muestra en la fig. (4.6.1), se puede observar que esta placa está bajo la acción de dos fuerzas opuestas. La presión diferencial  $(P_1 - P_2)$  que actúa en los extremos de la placa de área igual a  $(2yE)$  tiende a empujar la placa en dirección del flujo. Al mismo tiempo las partículas de fluido que residen justo en la superficie plana de la placa  $(ExL)$  comienzan a cortarse, pasando estas inmediatamente fuera de la superficie, y como resultado esto experimenta un esfuerzo de corte  $\tau$  el cual se opone a un movimiento hacia adelante del plano, si el fluido de éste plano no está acelerado (condición de flujo estable), estas dos fuerzas se cancelan una con otra, es decir:

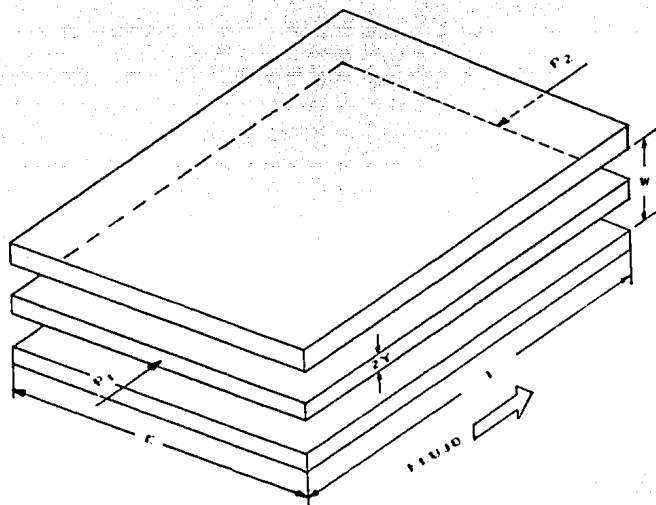


Fig. 4.6.0 Flujo a través de dos placas paralelas fijas

$$F_1 = F_2$$

$$(P_1 - P_2) 2yE = \tau 2EL$$

$$\Delta P_x 2yE = \tau 2EL$$

Donde, la caída de presión  $(P_1 - P_2)$  es causada en su totalidad por la fricción,  $\Delta P_x$ . Por otra parte, el esfuerzo de corte producido a lo largo de la superficie plana de espesor  $2y$  es entonces (despejando  $\tau$  de la ecuación anterior):

$$\tau = \frac{2yE}{2E} \left( \frac{\Delta P_x}{L} \right) \dots\dots\dots(4.6.1)$$

y, en particular, para el esfuerzo de corte en la pared del plano:

$$\tau_w = 2y_w \Rightarrow y_w = \frac{\tau_w}{2} \dots\dots(4.6.2)$$

sustituyendo este valor en (4.6.1) y haciendo  $\tau = \tau_w$  y  $y = y_w$ :

$$\tau_w = \frac{\tau_w}{2} \left( \frac{\Delta P_x}{L} \right) \dots\dots\dots(4.6.3)$$

cuya magnitud es directamente medible.

A partir de las ecuaciones (4.6.1) y (4.6.3) se puede obtener una expresión para la distribución del esfuerzo de corte en el fluido en términos del esfuerzo de corte conocido a la pared y de la posición longitudinal del elemento de fluido bajo consideración.

Despejando  $\Delta P_x/L$  de (4.6.3) y sustituyendo en (4.6.1):

$$\frac{\Delta P_x}{L} = \frac{2\tau_w}{y} \Rightarrow \tau = y \left( \frac{2\tau_w}{y} \right)$$



derivando  $v$  con respecto a  $y$ :

$$dv = \frac{2 \tau_w}{h} dy \dots\dots(4.6.4)$$

De la ecuación (4.6.4) se puede observar que el esfuerzo de corte es función lineal de la distancia entre placas. A la mitad de la placa central el esfuerzo es cero, y este se incrementará a cualquiera de las placas laterales a un valor máximo de  $\tau_w$  dado por la ec. (4.6.3) llegando a la pared de cualquier placa lateral.

Ya que el ritmo de corte  $dv_y/dy$ , fue supuesto como una función únicamente del esfuerzo de corte, entonces:

$$- \frac{dv_y}{dy} = k f(\tau) \Rightarrow dv_y = -k f(\tau) dy \dots(4.6.5)$$

donde  $k$  es una constante y  $f(\tau)$  representa alguna función no especificada de  $\tau$ . El signo (-) es introducido aquí debido a que  $dv_y/dy$  es una cantidad negativa, es decir;  $v_y$  decrece cuando "y" se incrementa.

Empleando la ecuación (4.6.4) se puede expresar la distribución diferencial de la velocidad de la ecuación (4.6.5) en términos de  $v$  en lugar de "y", ya que estas dos cantidades se encuentran relacionadas linealmente.

Despejando (dy) de (4.6.4):

$$dy = \frac{h}{2 \tau_w} dv$$

sustituyendo en (4.6.5):

$$dv_y = -k \mu(\tau) \frac{W}{2 r_W} d\tau$$

pasando de función de (y) a función de ( $\tau$ ):

$$dv_\tau = - \frac{k W}{2 r_W} \mu(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(4.6.6)$$

Integrando (4.6.6) de algún punto donde el esfuerzo de corte es  $\tau$ , a la pared, donde  $\tau=r_W$  y  $v_\tau=0$ , se obtiene la distribución de las velocidades de la partícula en el espacio anular:

$$\int_\tau^{r_W} dv_\tau = - \frac{k W}{2 r_W} \int_\tau^{r_W} \mu(\tau) d\tau \Rightarrow v_\tau \Big|_\tau^{r_W} = - \frac{k W}{2 r_W} \int_\tau^{r_W} \mu(\tau) d\tau$$

cuando  $\tau=r_W \Rightarrow v_\tau=0$ :

$$v_\tau = \frac{k W}{2 r_W} \int_\tau^{r_W} \mu(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(4.6.7)$$

Por otra parte, el gasto de fluido transferido en una capa plana de extensión lateral (E) y de espesor ( $dy$ ) que se mueve a una velocidad ( $v_y$ ), está dado por:

$$dq = v_y dA = v_y (E dy) \quad \dots\dots\dots(4.6.8)$$

Donde, a partir de la ecuación (4.6.4), se puede obtener una expresión equivalente para  $dA$ , despejando  $dy$  de ésta:

$$dy = \frac{W}{2 r_W} dr \dots\dots\dots(4.6.9)$$

multiplicando ambos lados por E:

$$E dy = \frac{E W}{2 r_W} dr \dots\dots\dots(4.6.10)$$

El gasto de flujo diferencial previamente establecido por la ecuación (4.6.8) puede ser establecido en términos de  $r$  exclusivamente, sustituyendo (4.6.10) y (4.6.7) en (4.6.8):

$$dq = \frac{k E W^2}{2 r_W^2} \left[ \int_r^{r_W} \mu(r) dr \right] dr \dots\dots\dots(4.6.11)$$

La integración de esta ecuación sobre la sección transversal que conforman las placas, desde  $r=0$  (centro), hasta  $r=r_W$  (pared de la placa) dará el gasto total de flujo:

$$q = \frac{k E W^2}{2 r_W^2} \int_0^{r_W} \left[ \int_r^{r_W} \mu(r) dr \right] dr \dots\dots\dots(4.6.12)$$

si se define el gasto promedio de flujo como:

$$q = v A = v E W$$

sustituyendo en la ecuación (4.6.12):

$$v E W = \frac{k E W^2}{2 r_W^2} \int_0^{r_W} \left[ \int_r^{r_W} \mu(r) dr \right] dr$$

$$\frac{v}{W} = \frac{k}{2 \tau_w^2} \int_0^{\tau_w} \left[ \int_{\tau}^{\tau_w} \mu(\tau) d\tau \right] d\tau$$

Entonces, integrando por partes se obtiene la ecuación general para flujo a través del espacio anular:

$$\frac{v}{W} = \frac{k}{2 \tau_w^2} \int_0^{\tau_w} \tau \mu(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(4.6.13)$$

A partir de las expresiones analíticas derivadas por Fredrickson y Bird<sup>(8)</sup> para describir el flujo anular de fluidos de la ley de potencias, Savins<sup>(9)</sup> elaboró expresiones desarrolladas para flujo a través de un canal. Para factores de geometría anular ( $\alpha = d_1/d_0$ ) en un rango de  $0.3 \leq \alpha \leq 0.9$  e índices de comportamiento de flujo mayores de 0.3, Savins<sup>(9)</sup> demostró que esta aproximación de flujo a través de un canal introduce un error no mayor del 7%, como el error es muy bajo, se puede proceder con la derivación de un criterio de la relación factor de fricción-número de Reynolds para flujo laminar a través de un canal de todos los fluidos (excluyendo comportamiento dependiente del tiempo) a ser empleados subsiguientemente para un análisis aproximado de sistemas de flujo anular.

Siguiendo el procedimiento empleado en el desarrollo de la ecuación de Rabinowitsch<sup>(2)</sup>, la expresión general para flujo laminar a través de canales, ec.(4.6.13), cuando es

diferenciada con respecto a  $\tau_w$  y multiplicada por  $k/\tau_w$  es:

$$2 \left[ \frac{2v}{W} \right] + \tau_w \frac{d(2v/W)}{d\tau_w} = k \cdot (\tau_w) \dots \dots \dots (4.6.14)$$

Como  $k(\tau_w)$  representa la dependencia funcional del ritmo de corte  $-dv_y/dy$  en esfuerzo de corte, entonces el último término de la ec. (4.6.14) representa el ritmo de corte del fluido en contacto con cualquier pared del canal, el cual es denotado por  $(-dv_y/dy)_w$ .

Introduciendo esta expresión para  $k(\tau_w)$ , reemplazando  $\tau_w$  por  $W\Delta P_2/2L$  y además multiplicando todos los términos por  $3/3$ , se puede reorganizar la ec. (4.6.14) de la siguiente forma:

$$\left[ -\frac{dv_y}{dy} \right]_w = \frac{2}{3} \left[ \frac{6v}{W} \right] + \frac{3}{3} (W\Delta P_2/2L) \left[ \frac{d(2v/W)}{d(W\Delta P_2/2L)} \right]$$

Multiplicando el último término de la ecuación por  $(6v/W)/(6v/W)$ :

$$\left[ -\frac{dv_y}{dy} \right]_w = \frac{2}{3} \left[ \frac{6v}{W} \right] + \frac{1}{3} \left[ \frac{6v}{W} \right] \frac{[d(6v/W)]/(6v/W)}{[d(W\Delta P_2/2L)]/(W\Delta P_2/2L)}$$

aplicando  $d(\ln x) = dx/x$ :

$$\left[ -\frac{dv_y}{dy} \right]_w = \frac{2}{3} \left[ \frac{6v}{W} \right] + \frac{1}{3} \left[ \frac{6v}{W} \right] \frac{d \ln(6v/W)}{d \ln(W\Delta P_2/2L)} \dots \dots \dots (4.6.15)$$

La cual constituye una expresión completamente general para el ritmo de corte a la pared de un canal producido por el esfuerzo de corte a la pared dado por  $(W \Delta p_f / 2L)$ . Esta expresión es análoga a la ec. (4.5.13) la cual es aplicada para flujo laminar a través de tuberías.

Representando la relación de derivadas de la ec. (4.6.15) por el símbolo  $1/n^*$  :

$$\left[ - \frac{dv_v}{dy} \right]_w = \frac{2n^* + 1}{3n^*} \left[ \frac{6v}{W} \right] \dots\dots\dots(4.6.16)$$

Si se dispone de mediciones de caída de presión y velocidad de flujo a partir de un viscosímetro, se pueden graficar estos datos de la forma  $(W \Delta p_f / 2L)$  contra  $(6v/W)$  la cual proporcionará  $n^*$  como la pendiente de la curva a cualquier valor elegido de  $v_w$ . Como  $n^*$  fue definida como:

$$n^* = \frac{d \ln(v_w)}{d \ln(6v/W)}$$

Sobre cualquier rango de esfuerzos de corte en la pared para el cual  $n^*$  permanece constante. Integrando esta expresión en una forma similar al caso de flujo a través de tuberías se obtiene:

$$v_w = \frac{W \Delta p_f}{2 L} = K' a \left[ \frac{6v}{W} \right]^{n^*} \dots\dots\dots(4.6.17)$$

Donde  $K'a$  es una constante de integración. Como la ecuación (4.6.17) es también la ecuación de una línea recta tangente a la curva logarítmica de  $v_w$  contra  $(6v/W)$  a cualquier valor particular de  $v_w$  en cuestión,  $K'a$  es el valor que intercepta la línea tangente con el eje de  $v_w$  donde  $6v/W$  es igual a uno.

Sobre cualquier rango de  $v_w$  en el cual la gráfica logarítmica de  $v_w$  contra  $6v/W$  sea lineal,  $n^a$  y  $K'a$  permanecen constantes; pero si la gráfica logarítmica no es lineal entonces  $n^a$  y  $K'a$  requerirán de una reevaluación punto a punto para obtener el cambio de valores de  $v_w$  paso a paso con el fin de mantener la validez de la ec.(4.6.17).

De lo anterior se puede decir que la ec.(4.6.17) es una expresión completamente general que relaciona las caídas de presión por fricción con la velocidad de flujo promedio en régimen laminar a través de canales, la cual involucra dos nuevos parámetros de flujo  $n^a$  y  $K'a$ . Sustituyendo la expresión  $6v/W$  de la ec.(4.6.16) en la ec.(4.6.17) se obtiene:

$$v_w = K'a \left[ \frac{3n^a}{2n^a + 1} \right]^{n^a} \left[ - \frac{dv_w}{dy} \right]^{n^a} \dots\dots(4.6.18)$$

Si  $n'$  es constante con valor igual a uno, la ecuación (4.6.14) se convierte en una relación lineal entre el esfuerzo de corte y el ritmo de corte que es la relación normalmente asociada con fluidos newtonianos, donde  $K'a = \mu/g_c$ .

Si  $n'$  es constante pero diferente de la unidad, entonces:

$$\tau_w = K \left[ - \frac{dv_y}{dy} \right]_w^{n'} \dots\dots\dots(3.1.6)$$

que es la relación de la ley de potencias entre el esfuerzo de corte y el ritmo de corte, donde los coeficientes constantes están dados por:

$$K = K'a \left[ \frac{3n'^2}{2n'^2 + 1} \right]^{n'} \text{ , y } n = n' \dots\dots\dots(4.6.19)$$

Se debe ahora relacionar  $\Delta p_f$  de la ec.(4.6.17) con la ecuación de Fanning, con la finalidad de obtener una expresión para un número de Reynolds generalizado, la cual se aplicará a flujo anular de todos los fluidos, entonces la ecuación de Fanning se vuelve:

$$f = \frac{\tau_w}{(\rho v^2/2 g_c)} = \left[ \frac{w \Delta p_f / 2L}{\rho v^2 / 2 g_c} \right] \dots\dots\dots(4.6.20)$$

Sustituyendo la expresión general en  $\tau_w$  de la ec.(4.6.17)



y reorganizando términos, se obtiene:

$$f = \frac{2 \mu_c K'a}{\rho v^2} \left[ \frac{6 v}{W} \right]^{2n} \dots\dots\dots(4.6.21)$$

la cual también puede escribirse como:

$$f = \frac{24 \mu_c K'a (12^{2n}-1)}{\rho v^{2-2n} (2W)^{2n}} \dots\dots\dots(4.6.21a)$$

A partir de  $f=24/N_{RS}$  para fluidos newtonianos en flujo laminar a través del espacio anular, se puede definir un número de Reynolds generalizado  $N_{RS}'$  como sigue:

$$N_{RS}' = \frac{(2W)^{2n} v^{2-2n} \rho}{\mu_c K'a (12^{2n}-1)} \dots\dots\dots(4.6.22)$$

Del presente análisis se concluye que todos los fluidos en flujo laminar en espacio anular siguen la ley universal  $f=24/N_{RS}'$ , donde  $N_{RS}'$  es el número de Reynolds generalizado definido por la ecuación (4.6.22), cualquier desviación de este criterio indicará:

- 1) Pocos o malos datos.
- 2) Comportamiento tixotrópico o reopéctico, o bien
- 3) Resbalamiento del fluido a las paredes de la tubería.

La gran mayoría de los fluidos empleados en ingeniería petrolera pueden ser representados a partir de la ley de

potencias, por lo tanto se hace mayor énfasis en las ecuaciones que siguen este comportamiento.

A continuación se hará una simplificación la cual involucra comportamiento de la ley de potencias.

$$n' = n = n^a$$

$$K = K'p \left[ \frac{4n'}{3n' + 1} \right]^{n'} = K'a \left[ \frac{3m'}{2n' + 1} \right]^{n'}$$

$$\frac{K'p}{K'a} = \left[ \frac{9n' + 3}{8n' + 4} \right]^{n'} \quad \dots\dots(4.6.23)$$

Conociendo los índices de comportamiento de flujo y de consistencia de los fluidos con la ley de potencias determinados a partir de un viscosímetro, se puede emplear la ecuación (4.6.23) para calcular el índice  $K'a$  requerido para el análisis de flujo de fluidos en espacio anular.

Continuando con la premisa de que un canal se aproxima con mucha precisión a la geometría del espacio anular, entonces se pueden adaptar las ecs.(4.6.14) con la (4.6.22) a las dimensiones de un sistema de flujo anular reemplazando  $W$  con el término  $(d_0 - d_1)/2$ .

En particular, la ec.(4.6.17) se convierte en:

$$\tau_w = \frac{(d_0 - d_1) \Delta P_f}{4 L} = K'a \left[ \frac{12 v}{d_0 - d_1} \right]^{n'} \dots\dots\dots(4.6.24)$$

En la cual se puede demostrar a partir de una gráfica logarítmica de  $\tau_w$  contra  $12v/(d_0 - d_1)$  para flujo laminar en espacio anular para fluidos de la ley de potencias ( $n' = n^2$ ) debería ser lineal con una pendiente  $n'$  y que intercepta al valor de  $K'a$  en el eje de  $\tau_w$  cuando  $12v/(d_0 - d_1)$  sea igual a la unidad.

Se puede construir una gráfica de  $\log \tau_w$  contra  $\log[12v/(d_0 - d_1)]$  para obtener una solución gráfica de la ec.(4.6.24) a partir de una gráfica similar a la que generan los datos de un viscosímetro.

Una expresión aproximada para el número de Reynolds generalizado obtenido a partir de la ec.(4.6.22) adaptada para un sistema de flujo anular es:

$$N_{RA}' = \frac{(d_0 - d_1)^{n'} v^{2-n'} \rho}{\mu_c K'a (12^{n'} - 1)} \dots\dots\dots(4.6.25)$$

aplicando unidades de campo:

$$N_{RA}' = 23.28 \frac{[(d_0 - d_1)/12]^{n'} (v/3.28)^{2-n'} \rho}{12^{n'} K'a} \dots\dots\dots(4.6.25a)$$

Una vez que la gráfica logarítmica de  $\tau_w$  contra  $12v/(d_0 - d_1)$  ha sido construida, es posible realizar una evaluación semigráfica del  $N_{RA}'$ .

Reemplazando  $K'a[12v/(d_0-d_1)]^{1/2}$  en la ec.(4.6.25) el número de Reynolds generalizado puede ser escrito como:

$$N_{RA}' = \frac{12 v^2 \rho}{g_c \nu_w} \dots\dots\dots(4.6.26)$$

empleando unidades de campo:

$$N_{RA}' = 250.48 \frac{v^2 \rho}{\nu_w} \dots\dots\dots(4.6.26a)$$

Donde  $\nu_w$  se expresa en  $\text{lb}/\text{pie}^2$ .

Para estimar las caídas de presión por fricción en régimen laminar a través del espacio anular se puede emplear cualquier ecuación de Fanning junto con la relación  $f=24/N_{RA}'$  o bien a partir de la solución gráfica de  $\log \nu_w$  contra  $\log(8v/d)$  generada por datos proporcionados por un viscosímetro.

#### 4.7 DETERMINACION EXPERIMENTAL DE PARAMETROS REOLOGICOS (5)

**A) ENSAYO MARSH:** Este fue el primer método para medir el espesamiento de los fluidos, donde la variable medida es el tiempo, en segundos, requerido para que el fluido pase a través del tubo del instrumento, este fluido es recolectado en una vasija graduada (ver fig.4.7.1).

El embudo es un instrumento calibrado a una capacidad de 1 500 c.c. con una perforación en su parte inferior para su descarga. Un litro de agua descarga en 28 segundos y el tiempo requerido para un litro de fluido da una indicación de su espesamiento.

**PROCEDIMIENTO DE EMPLEO:** Tomar el embudo con una mano, tapando el orificio con un dedo.

Vaciar el fluido a estudiar en el embudo hasta llegar a la marca de 1500 c.c.

Quitar el dedo del orificio y vaciar el fluido en la copa graduada, al momento de llegar a la marca de 946 c.c. (1/4 de galón) de la copa graduada tapar el orificio. El tiempo empleado en vaciar esa cantidad es la viscosidad Marsh del fluido.

##### POSIBLES ERRORES:

- a) Error en la calibración del instrumento
- b) Mal bloqueo del orificio
- c) Mantener mucho tiempo el fluido en el embudo antes de

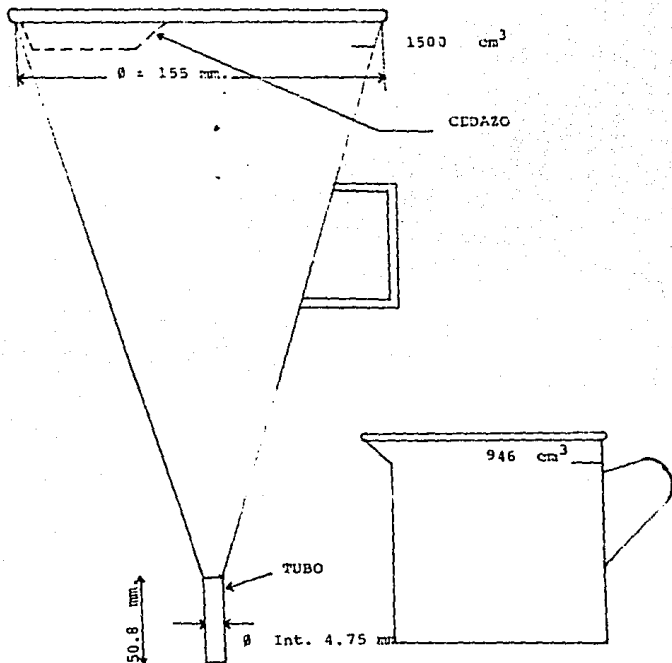


Fig. 4.7.1 Embudo Marsh

hacer la prueba (algunos fluidos tienden a gelificarse al estar mucho tiempo en reposo).

d) Poca precisión al tomar el tiempo de vaciamiento del fluido.

B) VISCOSÍMETROS ROTACIONALES: Estos instrumentos consisten en dos cilindros coaxiales rotacionales generalmente movidos por un motor eléctrico (ver fig. 4.7.2). Unos modelos dan lecturas a 300 y 600 r.p.m. y temperatura ambiente, también se les conoce como reómetros. Otros modelos dan lecturas a 600, 300, 200 y 100 r.p.m.

El modelo más completo es el Fann 35A movido por un motor eléctrico y con el que se obtienen lecturas adicionales a 6 y 3 r.p.m.

Hay algunos modelos de laboratorio que han sido construidos para velocidades variables. El viscosímetro Fann 39 puede trabajar en un rango de 0 a 600 r.p.m. y hasta 200 °F de temperatura. El modelo Fann 50-B, está diseñado para trabajar hasta 600 °F y hasta 1000 psi. de presión, con lo cual se pueden evaluar las propiedades del fluido bajo condiciones similares a las que se encuentren en el pozo.

Como se discutió en la sección 4.5 la gran mayoría de los fluidos empleados en un fracturamiento hidráulico se comportan de acuerdo al modelo de la ley de potencias:

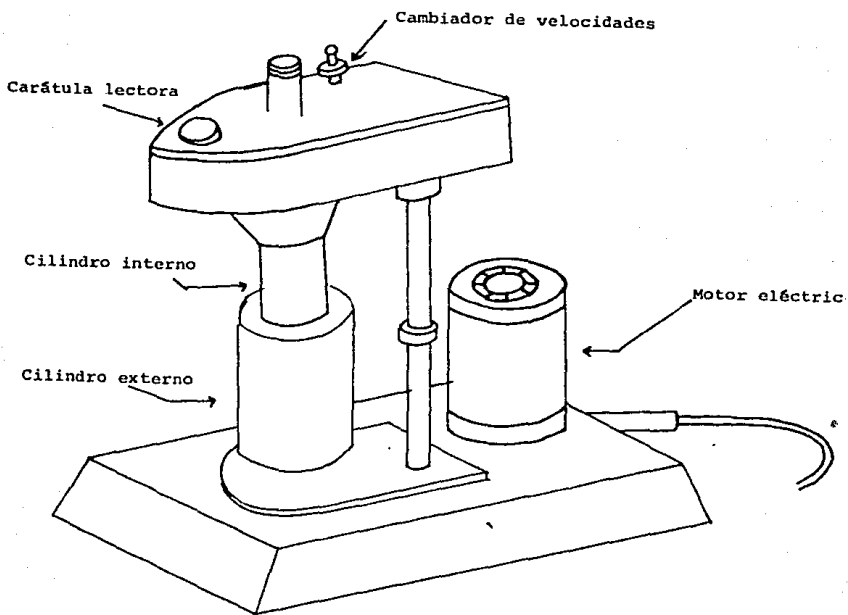


Fig. 4.7.2 Viscosímetro F ann M-35



$$\tau = K (-dv_r/dr)^n \dots\dots(3.1.8)$$

Tomando logaritmos de la ec.(3.1.8) se tiene:

$$\text{Log } \tau = \text{Log } K + n \text{ Log } (-\tau) \dots\dots(3.1.9)$$

Donde el índice de comportamiento de flujo  $n$  representa la pendiente de una línea recta, mientras que el índice de consistencia es la intersección de la curva de flujo con la ordenada ( $\tau$ ), entonces, los valores de  $n$  y  $K$  pueden ser calculados de la siguiente forma:

$$n = 3.32 \text{ Log } (L_{600}/L_{300})$$

$$K = L_{300} / (511)^n$$

**C) VISCOSIMETRO TUBULAR:** Es principalmente una herramienta de laboratorio; mide la caída de presión, a través de una longitud dada de tubería a ciertas velocidades de flujo. Empleando intercambiadores de calor, se pueden determinar las caídas de presión a cualquier temperatura y presión, dentro del límite del instrumento.

**D) VISCOSIMETRO CAPILAR:** Este instrumento mide la caída de presión cuando se hace fluir un fluido newtoniano o no newtoniano a través de un tubo capilar. Sus aplicaciones son únicamente para laboratorio.

**CAPITULO 5**  
**DESARROLLO DE ECUACIONES PARA EL CALCULO**  
**DE CAIDAS DE PRESION POR FRICCION POR**

**EL METODO: R. MONRICADRO (3)**

En este capítulo se presentarán los principios generales para el cálculo de parámetros reológicos de los fluidos empleados en los fracturamientos hidráulicos. Todas las ecuaciones son dadas en el sistema internacional (SI).

La determinación de las características reológicas de los fluidos implican ciertas dificultades por las siguientes razones:

**A. LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS**

Los fluidos no newtonianos. No siguen un comportamiento estricto a las leyes reológicas establecidas (ver capítulo 3) pero muestran un tipo intermedio de comportamiento como se ilustra en la figura 5.1.

Las características reológicas son variables, debido a las variaciones de temperatura y presión en el pozo.

**B. LA GEOMETRIA DEL SISTEMA DE CIRCULACION**

Esta geometría es variable (forma irregular de las paredes, excentricidad, etc). El flujo anular es tratado por métodos aproximados, ver apéndice (C).

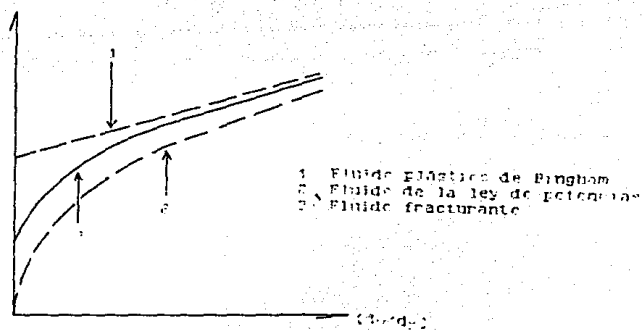
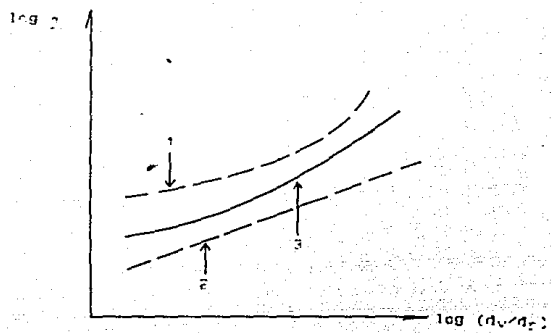


Fig. 5.1. Características reológicas de un fluido con respecto a un modelo.

Una solución rigurosa sería compleja y no puede ser justificada en vista de la naturaleza aproximada de los datos y el nivel de precisión necesario.

De acuerdo a lo anterior, diferentes simplificaciones han sido adoptadas por distintos autores. Unas, adoptadas en este capítulo, las cuales son también encontradas con frecuencia en la literatura, son altamente creíbles y pueden ser resumidas de la siguiente forma:

(a) Las irregularidades en la forma del agujero, el movimiento de la tubería durante la circulación y los efectos de presión y temperatura en el flujo son despreciados.

(b) El flujo en el espacio anular es idealizado como el flujo a través de dos placas paralelas (ver apéndice (C)).

(c) El fluido es considerado con comportamiento similar al modelo de la Ley de Potencias.

(d) A cada ritmo de corte el fluido tiene una viscosidad equivalente característica  $\mu_e$ , definida en la tabla (5.2).

#### EXPRESION GENERAL PARA EL NUMERO DE REYNOLDS Y SU VALOR CRITICO

En la tabla (5.3) se muestran las expresiones para el número de Reynolds así como de sus valores críticos tanto para fluidos newtonianos como para fluidos de la ley de potencias.

TABLA (5.2)  
 ECUACIONES DE VISCOSIDAD EQUIVALENTE PARA FLUIDOS  
 NO NEWTONIANOS

FLUJO \ MODELO		LEY DE POTENCIAS
L A M I N A R	TUBERIA	$\mu_e = k \left[ \frac{8v}{d} \frac{3n+1}{4n} \right]^{n-1}$
	ESPACIO ANULAR	$\mu_e = k \left[ \frac{1.35v}{dc-d1} \frac{3n+1}{3n} \right]^{n-1}$
T U B E R I A - N O N T O	TUBERIA	$\mu_e = k \left[ \frac{16v}{d} \frac{3n+1}{4n} \right]^{n-1}$
	ESPACIO ANULAR	$\mu_e = k \left[ \frac{1.35v}{dc-d1} \frac{3n+1}{3n} \right]^{n-1}$

TABLA 5.3  
 ECUACIONES PARA NUMEROS DE REYNOLDS  
 Y SUS VALORES CRITICOS

MODELO	INTERIOR DE TUBERIAS	POR ESPACIO ANULAR
FLUIDO NEWTONIANO	$Re = \frac{vd\rho}{\mu}$ $Re_c = 2100$	$Re = \frac{0.8165(d_o-d_i)v\rho}{\mu}$ $Re_c = 2100$
FLUIDO LEY DE POTENCIAS	$Re = \frac{vd\rho}{\mu_e} \frac{4n}{3n+1}$ $Re_c = 3470-137Cn$	$Re = \frac{0.8165(d_o-d_i)v\rho}{\mu_e} \frac{3n}{2n+1}$ $Re_c = 3470-137Cn$

Nota: para el caso especial de fluidos de la ley de potencias con  $n=1$ , las ecuaciones se vuelven idénticas a las de fluidos newtonianos.

## FLUIDOS DE LA LEY DE POTENCIAS

### A. FLUJO A TRAVÉS DE TUBERIAS.

Las ecuaciones para  $Re$  y  $\mu_e$  se vuelven:

$$Re = \frac{v d \rho}{\mu_e} \frac{4n}{3n+1} = \frac{v d \rho}{k \left[ \frac{8v}{d} \frac{3n+1}{4n} \right]^{n-1}} \frac{4n}{3n+1}$$

$$Re = \frac{v^{2-n} d^n \rho}{k \theta^{n-1} \left[ \frac{3n+1}{4n} \right]^n}$$

Si  $Re=Rec = 3470-1370n$ , entonces se obtiene la siguiente ecuación:

$$v_c = \left[ \frac{(3470-1370n)k \theta^{n-1} \left[ \frac{3n+1}{4n} \right]^n}{d^n \rho} \right] \frac{1}{2-n}$$

B. FLUJO A TRAVES DEL ESPACIO ANGULAR

En este caso se tiene:

$$Re = \frac{0.8165 v (d_o - d_i) \rho}{\mu_e} \frac{3n}{2n+1}$$

$$Re = \frac{0.8165 v (d_o - d_i) \rho}{k \left[ 12 \frac{v}{d_o - d_i} \frac{2n+1}{3n} \right]^{n-1}} \left[ \frac{3n}{2n+1} \right]$$

$$Re = \frac{0.8165 v^{2-n} (d_o - d_i)^n \rho}{k 12^{n-1} \left[ \frac{2n+1}{3n} \right]^n}$$

$$Vc = \left[ \frac{(3470 - 1370n) k 12^{n-1} \left[ \frac{2n+1}{3n} \right]^n}{0.8165 (d_o - d_i)^n \rho} \right] \frac{1}{2-1}$$



7  
**TABLA 5.1**  
**ECUACIONES PARA EL CALCULO DE CAIDAS DE PRESION**

FLUIDO	INTERIOR DE TUBERIAS	ESPACIO ANULAR
	<b>FLUIDO NEWTONIANO</b> (Re < 2100)	$f = \frac{16}{Re}$ $\Delta Pf = \frac{32L\mu v}{d^3}$
<b>LEY DE POTENCIAS</b> (Re < 3470-13100)	$f = 16/Re$ $\Delta Pf = \frac{32L\mu v}{d^3} \frac{3n+1}{4n}$	$f = 16/Re$ $\Delta Pf = \frac{48L\mu v}{(d_o - d_i)^3} \frac{2n+1}{3n}$
<b>FLUIDO NEWTONIANO</b> (Re > 2100)	$f = \frac{0.005}{Re^{0.2}}$ $\Delta Pf = \frac{0.11L\rho^{0.8}v^{1.8}\mu^{0.2}}{d^{1.2}}$	$f = \frac{0.005}{Re^{0.2}}$ $\Delta Pf = \frac{.127L\rho^{0.8}v^{1.8}\mu^{0.2}}{(d_o - d_i)^{1.2}}$
	<b>LEY DE POTENCIAS</b> (Re > 3470-13700)	$f = \frac{c}{Re^b}$ donde: $c = \frac{\log n + 2.5}{50}$ $b = \frac{1.4 - \log n}{7}$
	$\Delta Pf = \left[ \frac{2cL\rho^{1-b}v^{2-b}}{d^{1+b}} \right] \left[ \mu^{eb} \left[ \frac{3n+1}{4n} \right]^b \right]$	$\Delta Pf = \left[ \frac{2cL\rho^{1-b}v^{2-b}}{(0.8165(d_o - d_i))^{1+b}} \right] \left[ \mu^{eb} \left[ \frac{2n+1}{3n} \right]^b \right]$

## CAPITULO 6

### DESARROLLO DE PROGRAMAS DE COMPUTO

En este capítulo se presentará la elaboración y manejo de dos programas de cómputo, los cuales sirven para calcular las caídas de presión por fricción ocasionadas por el flujo de un fluido a través de un conducto, lo cual es de gran importancia para el cálculo de la potencia mínima requerida en la superficie para el diseño de un fracturamiento hidráulico.

Estos programas de cómputo están diseñados con la finalidad de que cualquier usuario sin conocimientos de computación lo pueda emplear sin ninguna dificultad.

El primer programa está basado en las ecuaciones generalizadas obtenidas en los subtemas 4.5 y 4.6 para flujo a través de tuberías y espacio anular respectivamente.

Este programa presenta para los datos de entrada, una serie de candados cuya finalidad es la de colocar cada variable de entrada en un rango de valores fijos, tales que en caso de que el usuario se equivoque o bien mande un valor fuera de rango, entonces, la computadora detiene su proceso, manda un mensaje que indica que el valor asignado está fuera de rango, y vuelve a preguntar el valor correspondiente.

El programa también cuenta con las siguientes opciones:

- Salida y/o impresión de datos y resultados
- Volver a ejecutar la misma opción del programa elegida en el menú principal.
- Recurrir a un archivo de datos contenido en el programa principal, modificar uno o más datos según las necesidades del usuario y volver a ejecutar el programa en la opción en que se encuentre.
- Volver al menú principal, elegir otra alternativa de cálculo y ejecutarla
- Salida del programa.

El segundo programa es similar al primero, pero a diferencia de éste, el segundo presenta el método desarrollado en el capítulo 5 y se enfoca exclusivamente al cálculo de caídas de presión por fricción.

Como se recalcó en el capítulo 5 el desarrollo de estas ecuaciones está en el sistema métrico, por lo tanto este programa cuenta también con una subrutina de conversión de unidades de campo con el propósito de que el usuario introduzca sus datos en unidades de campo, sin necesidad de tener que efectuar ninguna conversión.

Los programas están codificados en lenguaje BASIC y pueden ser ejecutados en una microcomputadora IBM-PC o cualquier

compatible a ésta.

A continuación se presentan los diagramas de flujo así como las codificaciones correspondientes a estos programas.

GALCULO DE CAIDAS D E

PRESION POR FRICCION

METODO

R. MONRICARD

LISTADO Y DIAGRAMA

DE FLUJO

```

10 ' ////////////////////////////////////////////////////////////////////
20 ' ]
30 ' ] Facultad de Ingenieria U. N. A. M.
40 ' ]
50 ' ] Divisi"n de Ingenieria en Ciencias de la Tierra
60 ' ]
70 ' ] Programa: C lculo de caidas de presi"n por fricci"n
80 ' ]
90 ' ] Mtodo: R. Monricard
100 ' ]
110 ' ] Elabor": Mercado Ortiz Manuel. LOSPP
120 ' ////////////////////////////////////////////////////////////////////
130 CLS:KEY OFF
140 LOCATE 9,28:PRINT "TIPO DE MONITOR"
150 LOCATE 14,20:PRINT "(1) COLOR (2) BLANCO Y NEGRO"
160 LOCATE 19,25:INPUT "INSETE SU ELECCION:";M
170 DIM A(10),B(10),C*(10),D*(10),E*(10),F*(10)
180 ' [///// INICIALIZACION DE LAS VARIABLES EMPLEADAS [/////
190 E*(1)="D1 metro interno de la tuber/a (pg)"
200 E*(2)="D1 metro interno de la TR (pg)"
210 E*(3)="D1 metro externo de la TP (pg)"
220 E*(4)="Longitud de la tuber/a (mts)"
230 E*(5)="Gasto de inyecci"n (bpm)"
240 E*(6)="Densidad del flu/do fracturante (gr/cc)"
250 E*(7)="Viscosidad absoluta (cp)"
260 E*(8)="Indice de consistencia (lb/seg//pies)"
270 E*(9)="Indice de comportamiento de flujo (adm-)"
280 F*(1)="CALCULO DE CAIDAS DE PRESION POR FRICCION"
290 F*(2)="METODO: R. MONRICARD"
300 F*(3)="ESTE PROGRAMA CUENTA CON LAS SIGUIENTES OPCIONES:"
310 F*(4)="Tratamiento por:"
320 F*(5)="Tipo de flu/do:"
330 F*(6)=".- Tuber/a de producci"n"
340 F*(7)=".- Tuber/a de revestimiento"
350 F*(8)=".- Espacio anular"
360 F*(9)="Newtoniano";F*(10)="No newtoniano"
370 A(1)=1:A(2)=2:A(3)=3:A(4)=4:A(5)=5:A(6)=6
380 COLOR 15,9,8:CLS
390 GOSUB 3110
400 ' [///// UBICACION DE VARIABLES EMPLEADAS EN LA [/////
410 ' [///// EN LA PRIMER PANTALLA [/////
420 LOCATE 3,15:PRINT F*(1)
430 LOCATE 5,30:PRINT F*(2)
440 LOCATE 7,15:PRINT F*(3)
450 LOCATE 10,15:PRINT F*(4)
460 LOCATE 10,50:PRINT F*(5)
470 LOCATE 12,13:PRINT A(1);F*(6):LOCATE 12,50:PRINT F*(9)
480 LOCATE 13,13:PRINT A(2);F*(7):LOCATE 13,50:PRINT F*(9)
490 LOCATE 14,13:PRINT A(3);F*(8):LOCATE 14,50:PRINT F*(9)
500 LOCATE 15,13:PRINT A(4);F*(6):LOCATE 15,50:PRINT F*(10)
510 LOCATE 16,13:PRINT A(5);F*(7):LOCATE 16,50:PRINT F*(10)
520 LOCATE 17,13:PRINT A(6);F*(8):LOCATE 17,50:PRINT F*(10)
530 IF M=2 GOTO 550
540 COLOR 14,8,8
550 LOCATE 20,25:INPUT "Inserte su elecci"n (1-6)";ELEC

```

```

560 IF M=2 GOTO 600
570 IF ELEC%<1 OR ELEC%>6 THEN GOTO 580 :ELSE 620
580 COLOR 30,9,8:BEEP
590 LOCATE 22,25:PRINT "Verifique su elecci"n":GOTO 540
600 IF ELEC%<1 OR ELEC%>6 THEN GOTO 580 :ELSE 620
610 LOCATE 22,25:PRINT "Verifique su elecci"n":GOTO 540
620 COLOR 15,9,8
630 CLS
640 GOSUB 3640
650 LOCATE 3,29:PRINT "DATOS DE ENTRADA".
660 GOSUB 3470
670 GOSUB 1040
680 GOSUB 1440
690 GOSUB 1550
700 ON ELEC% GOSUB 1700,1700,1830,1960,1960,2130
710 PRSL=PPSL/6894.757
720 IF ELEC%=1 OR ELEC%=2 OR ELEC%=3 THEN GOTO 740
730 VISE=VISE/.001
740 CLS
750 GOSUB 3650
760 GOSUB 3470
770 GOSUB 3250
780 ' [///// SALIDA DE RESULTADOS [/////
790 LOCATE 3,31:PRINT "RESULTADOS"
800 LOCATE 7,15:PRINT L$
810 IF ELEC%=1 OR ELEC%=2 OR ELEC%=3 THEN GOTO 830
820 LOCATE 17,15:PRINT "VISCOSIDAD EQUIVALENTE=";VISE;"(cp)"
830 LOCATE 9,15:PRINT "REYNOLDS CRITICO=";REYOC
840 LOCATE 11,15:PRINT "REYNOLDS CALCULADO=";REYQ
850 LOCATE 13,15:PRINT "FACTDP DE FRICION=";FACF
860 LOCATE 15,15:PRINT "CAIDA DE PRESION POR FRICION =";PRSL;"(lb/pg)"
870 LOCATE 22,18:INPUT "DESEA IMPRIMIR SUS RESULTADOS (SI/NO)";LI$
880 IF LI$="SI" OR LI$="S" OR LI$="s1" OR LI$="s" THEN GOSUB 2340:ELSE GOTO 900
890 GOSUB 3800
900 LOCATE 22,18:PRINT " "
910 LOCATE 22,20:INPUT "DESEA HACER OTRO CALCULO (SI/NO)";P$
920 IF P$="SI" OR P$="s1" OR P$="S" OR P$="s" GOTO 930:ELSE END
930 CLS
940 IF M=2 GOTO 960
950 COLOR 3,9,8
960 LOCATE 5,10:PRINT "1.-DESEA HACER EL MISMO CALCULO "
970 LOCATE 10,10:PRINT "2.-DESEA ELEGIR OTRO CALCULO EN EL MENU PRINCIPAL"
980 COLOR 15,9,8
990 GOSUB 3250
1000 LOCATE 22,20:INPUT "ELIJA SU OPCION E INSERTALA";EL
1010 IF EL<1 OR EL>2 THEN:LOCATE 14,2:PRINT "VERIFIQUE SU ELECCION":GOTO 1000
1020 IF EL=2 GOTO 380:ELSE GOSUB 2470
1030 GOTO 630
1040 ' [///// SUBROUTINA PAPA PREGUNTAR DATOS DE ENTADA [/////
1050 GOSUB 3360
1060 IF ELEC%=3 OR ELEC%=6 THEN GOTO 1110
1070 LOCATE 7,10:PRINT E$(1);:INPUT B(1)
1080 GOSUB 3780
1090 IF B(1)<1 OR B(1)>10 THEN GOSUB 3720:GOTO 1070
1100 GOTO 1170
1110 LOCATE 7,10:PRINT E$(2);:INPUT B(2)

```

```

1120 GOSUB 3780
1130 IF B(2)>1 OR B(2)>10 THEN GOSUB 3720:GOTO 1110
1140 LOCATE 9,10:PRINT E$(3);:INPUT B(3)
1150 GOSUB 3780
1160 IF B(3)<1 OR B(3)>10 THEN GOSUB 3720:GOTO 1140
1170 IF ELEC%#3 OR ELEC%#6 THEN LOCATE 11,10:ELSE LOCATE 9,10
1180 PRINT E$(4);:INPUT B(4)
1190 GOSUB 3780
1200 IF B(4)>10000 THEN GOSUB 3720:GOTO 1170
1210 IF ELEC%#3 OR ELEC%#6 THEN LOCATE 13,10:ELSE LOCATE 11,10
1220 PRINT E$(5);:INPUT B(5)
1230 GOSUB 3780
1240 IF B(5)>100 THEN GOSUB 3720:GOTO 1210
1250 IF ELEC%#3 OR ELEC%#6 THEN LOCATE 15,10:ELSE LOCATE 13,10
1260 PRINT E$(6);:INPUT B(6)
1270 GOSUB 3780
1280 IF B(6) < 2 THEN GOSUB 3720:GOTO 1250
1290 IF ELEC%#3 THEN LOCATE 17,10:ELSE LOCATE 15,10
1300 IF ELEC%#4 OR ELEC%#5 OR ELEC%#6 GOTO 1350
1310 PRINT E$(7);:INPUT B(7)
1320 GOSUB 3780
1330 IF B(7)>500 THEN GOSUB 3720:GOTO 1290
1340 IF ELEC%#1 OR ELEC%#2 OR ELEC%#3 GOTO 1430
1350 IF ELEC%#4 OR ELEC%#5 THEN LOCATE 15,10:ELSE LOCATE 17,10
1360 PRINT E$(8);:INPUT B(8)
1370 GOSUB 3780
1380 IF B(8) < 1 THEN GOSUB 3720:GOTO 1350
1390 IF ELEC%#4 OR ELEC%#5 THEN LOCATE 17,10:ELSE LOCATE 19,10
1400 PRINT E$(9);:INPUT B(9)
1410 GOSUB 3780
1420 IF B(9)>1 THEN GOSUB 3720:GOTO 1390
1430 RETURN
1440 * *** ASIGNACION DE VARIABLES A CADA ELEMENTO DEL VECTOR DE DATOS ***
1450 DIAIT=B(1)
1460 DIAITP=B(2)
1470 DIAETP=B(3)
1480 DPH=B(4)
1490 INJ=B(5)
1500 DENFF=B(6)
1510 VISFF=B(7)
1520 LX=B(8)
1530 CFX=B(9)
1540 RETURN
1550 * **** SUBROUTINA PARA TRANSFORMACION DE UNIDADES DE CAMPO ****
1560 * **** A UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL ****
1570 IF ELEC%#3 OR ELEC%#6 THEN 1610
1580 DIAIT=DIAIT*.00254
1590 INJ=INJ*.00254*9780*VEL*INJ*(.7853981*(DIAIT^2)
1600 GOTO 1640
1610 DI=ITP*DIAITP*.00254
1620 DI=ETP*DIAETP*.00254
1630 INJ=INJ*.00254*9780*VEL*INJ*(.7853981*(DIAITP^2-DIAETP^2)
1640 DENFF=DENFF*1000
1650 ON ELEC% GOTO 1680,1680,1680,1680,1680,1680
1660 * ** ** ** **

```



```

1670 GOTO 1690
1680 VISFF=VISFF*.001
1690 RETURN
1700 ' *** SUBROUTINA PARA CALCULO DE CAIDA DE PRESION POR FRICCION DE UN ***
1710 ' *** FLUIDO NEWTONIANO POR TP O POR TR ***
1720 REYQ=VEL*DIAIT*DENFF/VISFF
1730 REYQC=2100
1740 IF REYQ=>REYQC GOTO 1790
1750 L$="FLUJO LAMINAR"
1760 FACF=16/REYQ
1770 PRSL=32*DPH*VISFF*VEL/DIAIT^2
1780 GOTO 1820
1790 L$="FLUJO TURBULENTO"
1800 FACF=-.05/REYQ^2
1810 PRSL=-1*DPH*DENFF*.8*VEL^1.8*VISFF^.2/DIAIT^1.2
1820 RETURN
1830 ' *** SUBROUTINA PARA CALCULO DE CAIDA DE PRESION POR FRICCION DE UN ***
1840 ' *** FLUIDO NEWTONIANO POR ESPACIO ANULAR ***
1850 REYQC=2100
1860 REYQ=-.8165*(DIAITR-DIAETP)*DENFF*VEL/VISFF
1870 IF REYQ=>REYQC GOTO 1920
1880 L$="FLUJO LAMINAR"
1890 FACF=16/REYQ
1900 PRSL=48*VISFF*DPH*VEL/(DIAITR-DIAETP)^2
1910 GOTO 1950
1920 L$="FLUJO TURBULENTO"
1930 FACF=-.05/REYQ^2
1940 PRSL=.127*DPH*DENFF*.8*VISFF^.2*VEL^1.8/(DIAITR-DIAETP)^1.2
1950 RETURN
1960 ' *** SUBROUTINA PARA CALCULO DE CAIDA DE PRESION POR FRICCION DE UN ***
1970 ' *** FLUIDO NO NEWTONIANO POR TP O POR TR ***
1980 VISE=KX*((8*VEL/DIAIT)*((3*CFX+1)/(4*CFX)))^(CFX-1)
1990 REYQC=3470-1370*CFX
2000 REYQ=(VEL*DIAIT*DENFF/VISE)*((4*CFX)/(3*CFX+1))
2010 IF REYQ=>REYQC GOTO 2060
2020 L$="FLUJO LAMINAR"
2030 FACF=16/REYQ
2040 PRSL=(32*DPH*VISE*VEL/DIAIT^2)*((3*CFX+1)/(4*CFX))
2050 GOTO 2120
2060 L$="FLUJO TURBULENTO"
2070 C=((LOG(CFX)/2.303)+2.5)/50
2080 B=(1.4-(LOG(CFX)/2.303))/7
2090 FACF=C/REYQ^B
2100 A2=(VISE^B)*((3*CFX+1)/(4*CFX))^B
2110 PRSL=(2*C*DPH*DENFF^(1-B)*VEL^(2-B)/DIAIT^(1+B))*A2
2120 RETURN
2130 ' *** SUBROUTINA PARA CALCULO DE CAIDA DE PRESION POR FRICCION DE UN ***
2140 ' *** FLUIDO NO NEWTONIANO POR ESPACIO ANULAR ***
2150 V1=12*VEL/(DIAITR-DIAETP);V2=(2*CFX+1)/(3*CFX)
2160 VISE=KX*(V1*V2)^(CFX-1)
2170 REYQC=3470-1370*CFX
2180 REYQ=(.8165*(DIAITR-DIAETP)*DENFF*VEL/VISE)*((3*CFX)/(2*CFX+1))
2190 IF REYQ=>REYQC THEN GOTO 2240
2200 L$="FLUJO LAMINAR"
2210 FACF=16/REYQ

```

```

2220 PRSL=((48*VISE*DPH*VEL)/(DIAITR-DIAETP)^2)*((2*CFX+1)/(3*CFX))
2230 GOTO 2310
2240 L*="FLUJO TURBULENTO"
2250 C=((LOG(CFX)/2.303)+2.5)/50
2260 B=(1.4-(LOG(CFX)/2.303))/7
2270 FACF=C/REYO*B
2280 A3=VISE*B*((2*CFX+1)/(3*CFX))^B
2290 PRSL=((2*C*DPH*DENFF*(1-B)*VEL*(2-B))/(.8165*(DIAITR-DIAETP))^(1+B))*A3
2300 PRSL=PRSL/A3
2310 RETURN
2320 ' **** SUBROUTINA PARA REGRESAR DE UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL ****
2330 ' **** A UNIDADES DE CAMPO ****
2340 IF ELEC%3 OR ELEC%6 THEN 2380
2350 DIAIT=DIAIT/.0254
2360 INJ=INJ/.0026497883#
2370 GOTO 2410
2380 DIAITR=DIAITR/.0254
2390 DIAITP=DIAITP/.0254
2400 INJ=INJ/.0026497883#
2410 DENFF=DENFF/1000
2420 IF ELEC%1 OR ELEC%2 THEN 2450:IF ELEC%3 THEN 2450
2430 KX=KX/47.88026
2440 GOTO 2460
2450 VISFF=VISFF/.001
2460 RETURN
2470 ' [#####.SUBROUTINA PARA GENERAR UN ARCHIVO DE DATOS [#####
2480 CLS
2490 GOSUB 3650
2500 LOCATE 3,25:PRINT "ARCHIVO DE DATOS"
2510 GOSUB 3470
2520 GOSUB 3250
2530 IF ELEC%3 OR ELEC%6 THEN GOTO 2560
2540 LOCATE 7,8:PRINT "1":LOCATE 7,13:PRINT E*(1):LOCATE 7,59:PRINT B(1)
2550 GOTO 2580
2560 LOCATE 7,8:PRINT "2":LOCATE 7,13:PRINT E*(2):LOCATE 7,59:PRINT B(2)
2570 LOCATE 9,8:PRINT "3":LOCATE 9,13:PRINT E*(3):LOCATE 9,59:PRINT B(3)
2580 IF ELEC%3 OR ELEC%6 GOTO 2610
2590 LOCATE 9,8:PRINT "4":LOCATE 9,13:PRINT E*(4):LOCATE 9,59:PRINT B(4)
2600 GOTO 2620
2610 LOCATE 11,8:PRINT "4":LOCATE 11,13:PRINT E*(4):LOCATE 11,59:PRINT B(4)
2620 IF ELEC%3 OR ELEC%6 GOTO 2650
2630 LOCATE 11,8:PRINT "5":LOCATE 11,13:PRINT E*(5):LOCATE 11,59:PRINT B(5)
2640 GOTO 2660
2650 LOCATE 13,8:PRINT "5":LOCATE 13,13:PRINT E*(5):LOCATE 13,59:PRINT B(5)
2660 IF ELEC%3 OR ELEC%6 GOTO 2690
2670 LOCATE 13,8:PRINT "6":LOCATE 13,13:PRINT E*(6):LOCATE 13,59:PRINT B(6)
2680 GOTO 2700
2690 LOCATE 15,8:PRINT "6":LOCATE 15,13:PRINT E*(6):LOCATE 15,59:PRINT B(6)
2700 IF ELEC%4 OR ELEC%5 OR ELEC%6 GOTO 2760
2710 IF ELEC%3 GOTO 2740
2720 LOCATE 15,8:PRINT "7":LOCATE 15,13:PRINT E*(7):LOCATE 15,59:PRINT B(7)
2730 GOTO 2750
2740 LOCATE 17,8:PRINT "7":LOCATE 17,13:PRINT E*(7):LOCATE 17,59:PRINT B(7)
2750 IF ELEC%1 OR ELEC%2 OR ELEC%3 THEN GOTO 2840
2760 IF ELEC%4 OR ELEC%5 GOTO 2790
2770 LOCATE 17,8:PRINT "8":LOCATE 17,13:PRINT E*(8):LOCATE 17,59:PRINT B(8)
2780 GOTO 2800

```

```

2790 LOCATE 15,8:PRINT "8":LOCATE 15,13:PRINT E*(8):LOCATE 15,59:PRINT B(8)
2800 IF ELECZ=4 OR ELECZ=5 GOTO 2830
2810 LOCATE 19,8:PRINT "9":LOCATE 19,13:PRINT E*(9):LOCATE 19,59:PRINT B(9)
2820 GOTO 2840
2830 LOCATE 17,8:PRINT "9":LOCATE 17,13:PRINT E*(9):LOCATE 17,59:PRINT B(9)
2840 LOCATE 22,16:INPUT "INSERTA EL NUMERO DE VARIABLE A MODIFICAR";VAR
2850 LOCATE 22,16:PRINT " "
2860 LOCATE 22,20:BEEP:PRINT "INSERTA EL NUEVO VALOR Y PULSE RETURN"
2870 IF VAR=1 THEN LOCATE 7,59:INPUT B(1):GOTO 3060
2880 IF VAR=2 THEN LOCATE 7,59:INPUT B(2):GOTO 3060
2890 IF VAR=3 THEN LOCATE 9,59:INPUT B(3):GOTO 3060
2900 IF ELECZ=3 OR ELECZ=6 THEN LOCATE 11,59:ELSE LOCATE 9,59
2910 IF VAR=4 THEN INPUT B(4):GOTO 3060
2920 IF ELECZ=3 OR ELECZ=6 THEN LOCATE 13,59:ELSE LOCATE 11,59
2930 IF VAR=5 THEN INPUT B(5):GOTO 3060
2940 IF ELECZ=3 OR ELECZ=6 THEN LOCATE 15,59:ELSE LOCATE 13,59
2950 IF VAR=6 THEN INPUT B(6):GOTO 3060
2960 IF ELECZ=3 THEN LOCATE 17,59:ELSE LOCATE 15,59
2970 IF ELECZ=4 OR ELECZ=5 OR ELECZ=6 GOTO 3000
2980 IF VAR=7 THEN INPUT B(7):GOTO 3060
2990 IF ELECZ=1 OR ELECZ=2 OR ELECZ=3 THEN RETURN
3000 IF ELECZ=6 THEN LOCATE 17,59:ELSE LOCATE 15,59
3010 IF VAR=8 THEN INPUT B(8):GOTO 3060
3020 IF ELECZ=6 THEN LOCATE 19,59:ELSE LOCATE 17,59
3030 IF VAR=9 THEN INPUT B(9):GOTO 3060
3040 IF ELECZ=4 OR ELECZ=5 THEN LOCATE 15,59:ELSE LOCATE 17,59
3050 IF ELECZ=4 OR ELECZ=5 THEN LOCATE 17,59:ELSE LOCATE 19,59
3060 LOCATE 22,16:PRINT " "
3070 LOCATE 22,20:BEEP:INPUT "DESEA CAMBIAR OTRA VARIABLE (S/N);CAM$
3080 IF CAM$="SI" OR CAM$="S" OR CAM$="s" OR CAM$="S" GOTO 2840
3090 RETURN
3100 ' [##### SUBROUTINA PARA GENERAR VENTANA # 1 [#####
3110 IF M=2 GOTO 3130
3120 COLOR 3,9,8
3130 FOR I=14 TO 65
3140 LOCATE 2,1:PRINT "N"
3150 LOCATE 8,1:PRINT "M"
3160 NEXT I
3170 LOCATE 2,13:PRINT "I":LOCATE 2,66:PRINT "J"
3180 LOCATE 8,13:PRINT "H":LOCATE 8,66:PRINT "L"
3190 FOR I=3 TO 7
3200 LOCATE 1,13:PRINT "J":LOCATE 1,66:PRINT "L"
3210 NEXT I
3220 COLOR 15,9,8
3230 RETURN
3240 ' [##### SUBROUTINA PARA GENERAR VENTANA # 3 [#####
3250 IF M=2 GOTO 3270
3260 COLOR 2,9,8
3270 LOCATE 21,15:PRINT "I":LOCATE 22,60:PRINT "J"
3280 LOCATE 21,15:PRINT "H":LOCATE 21,60:PRINT "L"
3290 LOCATE 23,15:PRINT "H":LOCATE 23,60:PRINT "L"
3300 FOR I=16 TO 59
3310 LOCATE 21,1:PRINT "N"
3320 LOCATE 23,1:PRINT "M"
3330 NEXT I
3340 COLOR 15,9,8

```

```

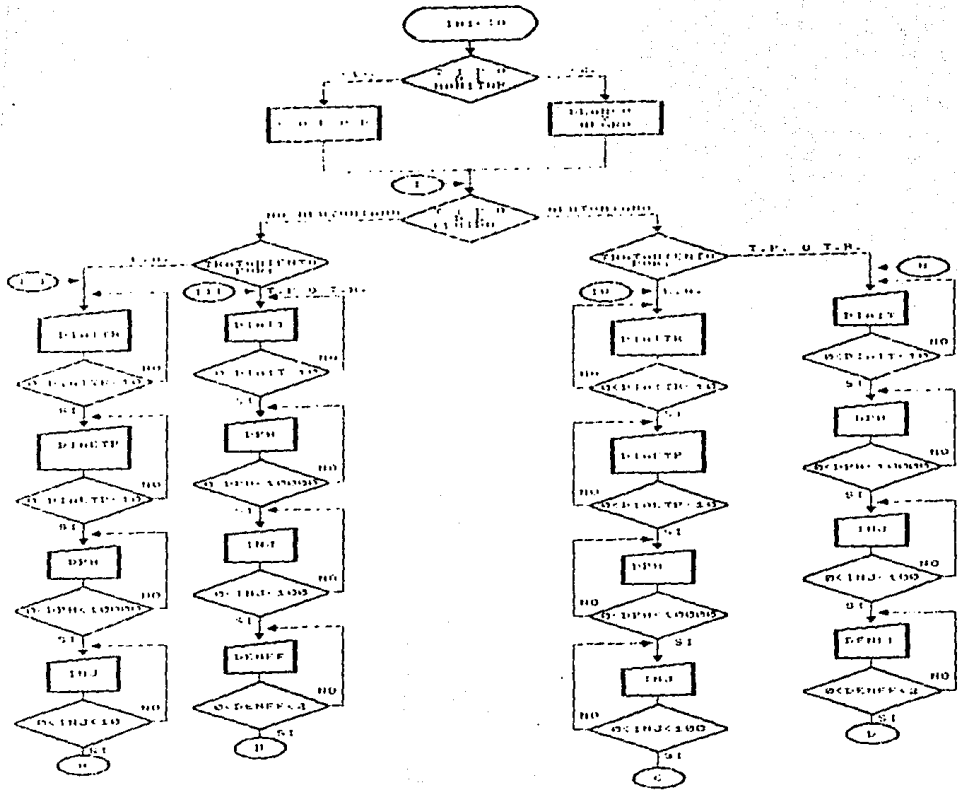
3350 RETURN
3360 ' [##### SUBROUTINA PARA GENERAR VENTANA # 5 [#####
3370 IF M=2 GOTO 3270
3380 COLOR 6,9,8
3390 LOCATE 23,15:PRINT " ":LOCATE 23,60:PRINT " : "
3400 LOCATE 22,15:PRINT " I ":LOCATE 22,60:PRINT " ; "
3410 FOR I=16 TO 59
3420 LOCATE 22,I:PRINT " N "
3430 NEXT I
3440 COLOR 15,9,8
3450 RETURN
3460 ' [##### SUBROUTINA PARA GENERAR VENTANA # 2 [#####
3470 LOCATE 6,6:PRINT " I#####
#####"
3480 LOCATE 7,6:PRINT " :
      "
3490 LOCATE 8,6:PRINT " L#####
#####"
3500 LOCATE 9,6:PRINT " :
      "
3510 LOCATE 10,6:PRINT " L#####
#####"
3520 LOCATE 11,6:PRINT " :
      "
3530 LOCATE 12,6:PRINT " L#####
#####"
3540 LOCATE 13,6:PRINT " :
      "
3550 LOCATE 14,6:PRINT " L#####
#####"
3560 LOCATE 15,6:PRINT " :
      "
3570 LOCATE 16,6:PRINT " L#####
#####"
3580 LOCATE 17,6:PRINT " :
      "
3590 LOCATE 18,6:PRINT " L#####
#####"
3600 LOCATE 19,6:PRINT " :
      "
3610 LOCATE 20,6:PRINT " H#####
#####"
3620 COLOR 15,9,8
3630 RETURN
3640 ' [##### SUBROUTINA PARA GENERAR VENTANA # 4 [#####
3650 FOR I=20 TO 52
3660 LOCATE 2,I:PRINT " 0 "
3670 LOCATE 4,I:PRINT " 0 "
3680 NEXT I
3690 LOCATE 3,20:PRINT " 0 " :LOCATE 3,52:PRINT " 0 "
3700 RETURN
3710 ' [##### SUBROUTINA PARA MANDAR MENSAJE DE ERROR [#####
3720 COLOR 31,9,8
3730 BEEP
3740 LOCATE 23,25:PRINT " Verifique su dato de entrada "
3750 COLOR 15,9,8
3760 RETURN
3770 ' [##### SUBROUTINA PARA BORRAR MENSAJE DE ERROR [#####

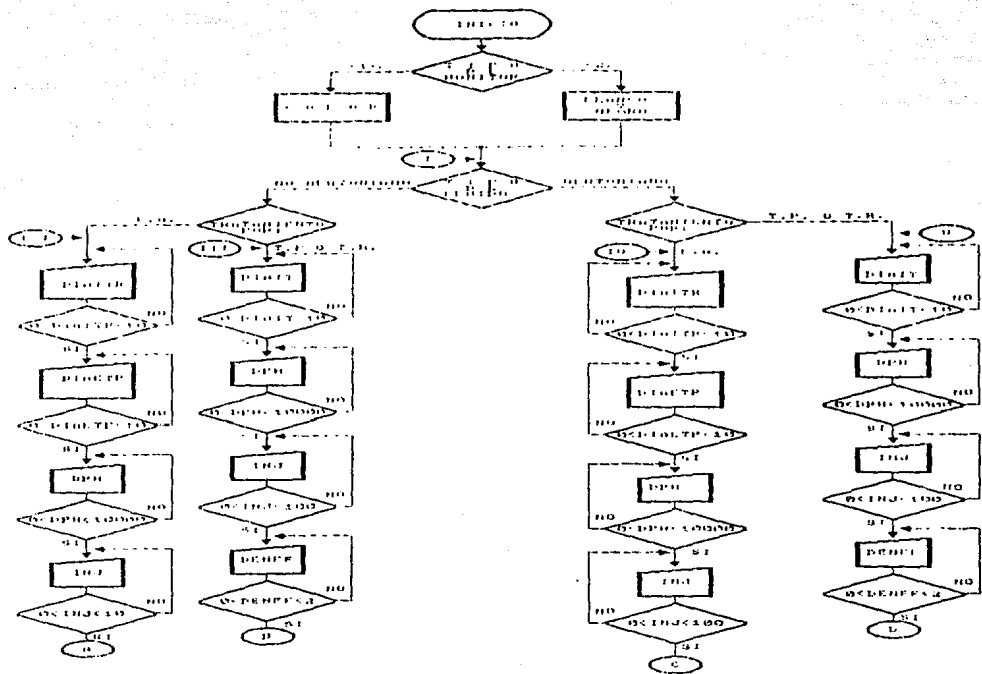
```

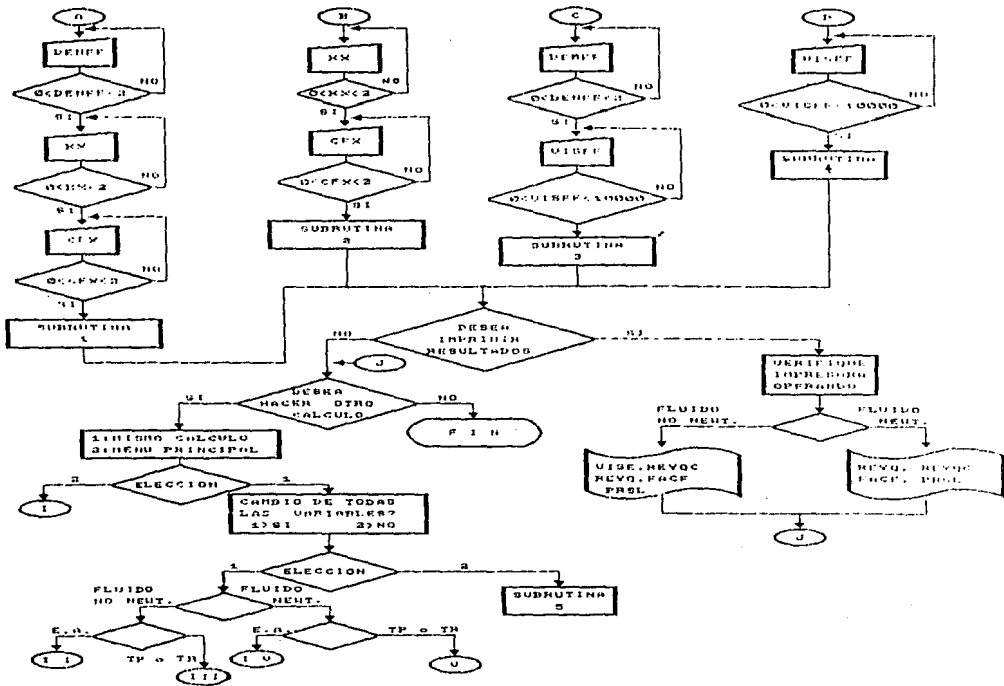
```

3780 LOCATE 23,25:PRINT "
3790 RETURN
3800 ' [##### SUBROUTINA PARA IMPRESION DE RESULTADOS [#####
3810 LOCATE 22,17:PRINT "
3820 LOCATE 22,17:PRINT "VERIFIQUE IMPRESORA Y PULSE RETURN"
3830 IF INKEY#="" THEN 3830
3840 LPRINT "          DATOS"
3850 LPRINT
3860 LPRINT
3870 ON ELEC% GOTO 3880,3880,3880,3900,3900,3900
3880 LPRINT T$(5);T$(9)
3890 GOTO 3910
3900 LPRINT T$(5);T$(10)
3910 ON ELEC% GOTO 3920,3950,3980,3920,3950,3980
3920 LPRINT T$(4);T$(6)
3930 LPRINT E$(1);B(1)
3940 GOTO 4010
3950 LPRINT T$(4);T$(7)
3960 LPRINT E$(1);B(1)
3970 GOTO 4010
3980 LPRINT T$(4);T$(8)
3990 LPRINT E$(2);B(2)
4000 LPRINT E$(3);B(3)
4010 LPRINT E$(4);B(4)
4020 LPRINT E$(5);B(5)
4030 LPRINT E$(6);B(6)
4040 ON ELEC% GOTO 4050,4050,4070,4070,4070
4050 LPRINT E$(7);B(7)
4060 GOTO 4090
4070 LPRINT E$(9);B(8)
4080 LPRINT E$(9);B(8)
4090 LPRINT
4100 LPRINT
4110 LPRINT
4120 LPRINT "          RESULTADOS"
4130 LPRINT
4140 LPRINT
4150 LPRINT L$
4160 IF ELEC#1 OR ELEC#2 OR ELEC#3 THEN GOTO 4180
4170 LPRINT "VISCOSIDAD EQUIVALENTE=";VISE;"(cp)"
4180 LPRINT "REYNOLDS CRITICO=";REYOC
4190 LPRINT "REYNOLDS CALCULADO=";REYD
4200 LPRINT "FACTOR DE FRICCION=";FACF
4210 LPRINT "CAIDA DE PRESION POR FRICCION =" ;PPSL;"(lb/pg)"
4220 RETURN

```











SUBROUTINA 4  
 FLUIDO:  
 NO NEWTONIANO  
 TRAY. POR TUB. TL.

DEBEREMOS CUBEL/DIAT=<<COCEN-1>>/<<CCFN>>+<<CCFN-1>>  
 REVO<DIT>=1.2700CFM  
 REVO<UEL>DIT=DEFF/DIAT=<<CCFN-1>>

SI  
 NO  
 REVO > REVO<

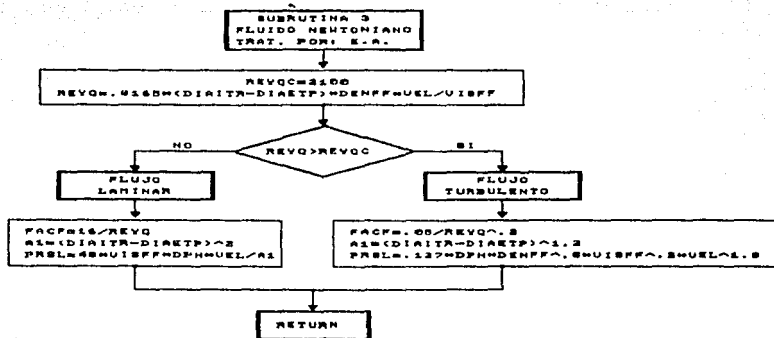
FLUJO  
 TURBULENTO

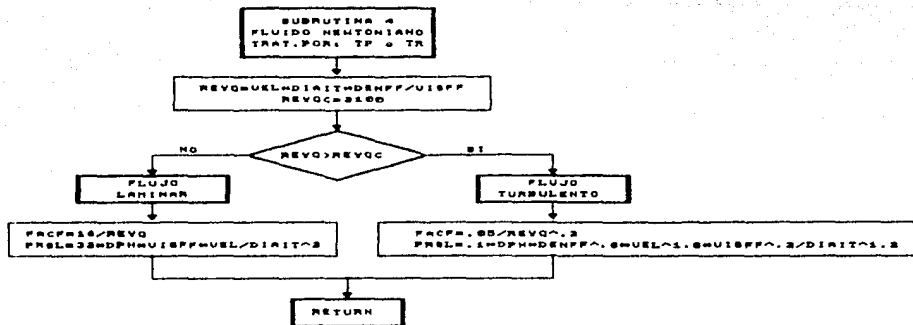
FLUJO  
 LAMINAR

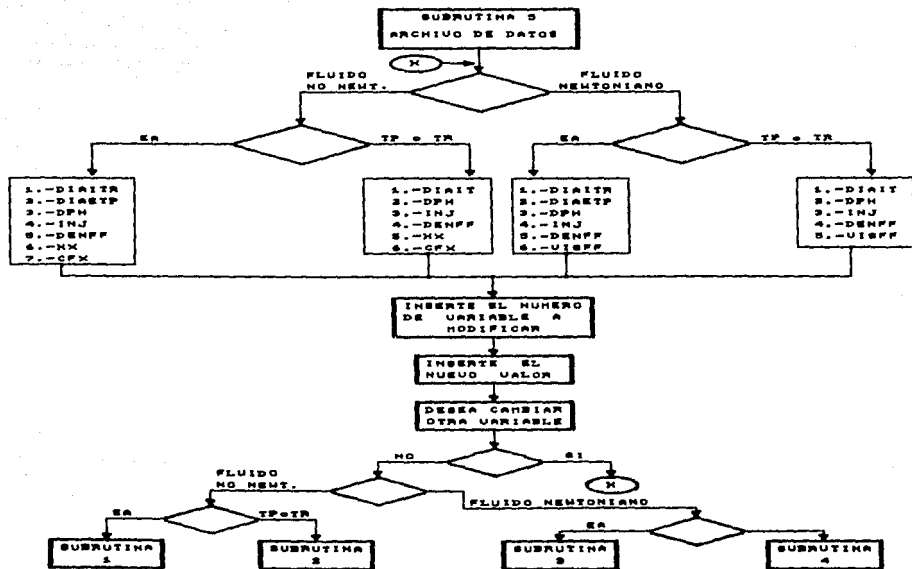
CC<<COCEN>>=2.0000+2.5/50  
 DCC<1-CC<<COCEN>>/2.0000>>/7  
 FACFC<REVO>=H  
 RE<<UIE>>=<<COCFN-1>>/<<CCFN>>+D  
 PHIL<DCC>PH<DEFF><1-D>UEL<<D>>DIT<<1-D>>+H2

FACFC<REVO  
 RE<<DCC><PH<UIE>>UEL/DIT<D  
 RE<<DCCFN-1>>/<<CCFN>>  
 PH<EL>/D

RETURN







CALCULO DE CAIDAS D E

PRESION POR FRICCION

METODO

D.W.DODGE & A.B.METZNER

LISTADO Y DIAGRAMA

DE FLUJO

```

10 [-----]
20 [ Facultad de Ingenieria U.N.A.M. ]
30 [ ]
40 [ Division de Ingenieria en Ciencias de la Tierra ]
50 [ ]
60 [ Programa: Calculo de potencia requerida en la ]
70 [ superficie para efectuar un fractu- ]
80 [ ramiento hidraulico. ]
90 [ ]
100 [ Metodo: D.W. Dodge and A.B. Metzner ]
110 [ ]
120 [ Elaboro: Mercado Ortiz Manuel. PROYECTO ]
130 [-----]
140
150
160 ** PRUEBA PARA SABER SI EL MONITOR ES Color/Graphics Monitor **
170 *****
180 DEF SEG=4H40
190 MONO=SS=(PEEK(&H10) AND &H30)=&H30
200 IF MONO=SS THEN SCRNSSEG.SS=&HB000 ELSE SCRNSSEG.SS=&HB800
210 CLS:KEY OFF
220 DEF SEG = SCRNSSEG.SS:BLOAD"PDPI.SCR",0:DEF SEG
230 D$=INKEY$:IF D$="" THEN 230
240 IF D$="C" OR D$="c" THEN 260:ELSE 250
250 BEEP:GOTO 230
260 DEF SEG = SCRNSSEG.SS:BLOAD"MONITOR.SCR",0:DEF SEG
270 LOCATE 14,46:INPUT M
280 IF M=1 OR M=2 GOTO 300
290 BEEP:GOTO 270
300 CLS
310 DEF SEG = SCRNSSEG.SS:BLOAD"PDPII.SCR",0:DEF SEG
320 IF M=2 GOTO 340
330 COLOR 15,0,0
340 LOCATE 20,48:INPUT ELEC%
350 ON ELEC% GOSUB 520,3390,1870,4850
360 IF PRSP<PRSS GOTO 420
370 LOCATE 20,22:PRINT "DESEA IMPRIMIR SUS RESULTADOS (S/N)"
380 LOCATE 20,59:INPUT E$
390 IF E$="SI" OR E$="si" OR E$="S" OR E$="s" THEN GOSUB 6480
400 LOCATE 20,10:PRINT "
410 LOCATE 20,10:PRINT "
420 LOCATE 20,20:PRINT "DESEA REALIZAR OTRO CALCULO (S/N)"
430 LOCATE 20,60:INPUT E2$
440 IF E2$="SI" OR E2$="si" OR E2$="S" OR E2$="s" THEN GOTO 450:ELSE CLS:END
450 LOCATE 20,12:PRINT "[1] men# principal [2] archivo de datos"
460 LOCATE 21,30:INPUT "Inserte su elecci#n":E1
470 IF E1=1 GOTO 300
480 CLS
490 ON ELEC% GOSUB 7300,8270,9360,10430
500 ON ELEC% GOSUB 1580,4560,3030,6120
510 GOTO 360
520 CLS
530 IF M=2 GOTO 550
540 COLOR 14,0,0
550 DEF SEG = SCRNSSEG.SS:BLOAD"CHTPN.SCR",0:DEF SEG

```

```

560 LOCATE 8,56:PRINT " "
570 LOCATE 8,56:INPUT DPH
580 LOCATE 22,14:PRINT " "
590 IF DPH<10000 AND DPH>0 GOTO 600
600 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 620
610 COLOR 28,0,0:BEEP
620 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
630 IF M=1 GOTO 560
640 COLOR 14,0,0
650 GOTO 560
660 LOCATE 10,56:PRINT " "
670 LOCATE 10,56:INPUT INJ
680 LOCATE 22,14:PRINT " "
690 IF INJ<200 AND INJ>0 GOTO 700
700 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 720
710 COLOR 28,0,0:BEEP
720 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
730 IF M=2 GOTO 660
740 COLOR 14,0,0
750 GOTO 660
760 LOCATE 12,56:PRINT " "
770 LOCATE 12,56:INPUT DIAIT
780 LOCATE 22,14:PRINT " "
790 IF DIAIT =7.5 AND DIAIT>1 GOTO 800
800 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 820
810 COLOR 28,0,0:BEEP
820 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
830 IF M=2 GOTO 760
840 COLOR 14,0,0
850 GOTO 760
860 LOCATE 14,56:PRINT " "
870 LOCATE 14,56:INPUT VISFF
880 LOCATE 22,14:PRINT " "
890 IF VISFF<10000 AND VISFF>0 GOTO 900
900 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 920
910 COLOR 28,0,0:BEEP
920 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
930 IF M=2 GOTO 860
940 COLOR 14,0,0
950 GOTO 860
960 LOCATE 16,56:PRINT " "
970 LOCATE 16,56:INPUT DENFF
980 LOCATE 22,14:PRINT " "
990 IF DENFF <2 AND DENFF>0 GOTO 1000
1000 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 1020
1010 COLOR 28,0,0:BEEP
1020 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
1030 IF M=2 GOTO 960
1040 COLOR 14,0,0
1050 GOTO 960
1060 LOCATE 18,56:PRINT " "
1070 LOCATE 18,56:INPUT GF
1080 LOCATE 22,14:PRINT " "
1090 IF GF =1.2 AND GF<1.4 GOTO 1100
1100 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 1120
1110 COLOR 28,0,0:BEEP

```



```

1120 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO.FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
1130 IF M=2 GOTO 1150
1140 COLOR 14,0,0
1150 GOTO 1060
1160 LOCATE 20,56:PRINT " "
1170 LOCATE 20,56:INPUT NMBD
1180 LOCATE 22,14:PRINT " "
1190 IF NMBD<10000 AND NMBD>0 GOTO 1260
1200 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 1220
1210 COLOR 28,0,0:BEEP
1220 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO.FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
1230 IF M=2 GOTO 1160
1240 COLOR 14,0,0
1250 GOTO 1150
1260 CLS
1270 DEF SEG = SCRASEG-SS%:BLOAD"CHTPNI.SCR",0:DEF SEG
1280 LOCATE 12,56:PRINT " "
1290 LOCATE 12,56:INPUT COED
1300 LOCATE 22,14:PRINT " "
1310 IF COED =1 AND COED<=>.5 GOTO 1380
1320 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 1340
1330 COLOR 28,0,0:BEEP
1340 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO.FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
1350 IF M=2 GOTO 1280
1360 COLOR 14,0,0
1370 GOTO 1280
1380 LOCATE 14,56:PRINT " "
1390 LOCATE 14,56:INPUT DIAD
1400 LOCATE 22,14:PRINT " "
1410 IF DIAD=1 AND DIAD<=>.25 GOTO 1480
1420 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 1440
1430 COLOR 28,0,0:BEEP
1440 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO.FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
1450 IF M=2 GOTO 1380
1460 COLOR 14,0,0
1470 GOTO 1380
1480 LOCATE 16,56:PRINT " "
1490 LOCATE 16,56:INPUT PRSP
1500 LOCATE 22,14:PRINT " "
1510 IF PRSP =15000 AND PRSP=1500 GOTO 1580
1520 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 1540
1530 COLOR 28,0,0:BEEP
1540 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO.FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
1550 IF M=2 GOTO 1480
1560 COLOR 14,0,0
1570 GOTO 1480
1580 DPH=7.28*DPH
1590 DENFF=8.225*DENFF
1600 PRSF=GF*DPH
1610 PRSH=652*DENFF*DPH
1620 PRSD=1.2775*DENFF*INJ12/(COED12*NMBD12*DIAD12)
1630 RE10=(15420*INJ1*DENFF*(DIAIT*VISFF)
1640 IF RE10 = 2000 GOTO 1670
1650 FACF=.68*REY0*(.4243*LOG(.2013*REY0*.054))
1660 GOTO 1630
1670 FACF=16 RE10

```

```

1680 PPRST=11.41*DPH*DENFF*INJ^2*FACF/(DIAIT^5)
1690 PRSS=PRSF-PRSH+PPRST+PPRSD
1700 DPH=DPH/3.28
1710 DENFF=DENFF/8.3259
1720 IF PRSS<PRSP GOTO 1760
1730 CLS
1740 DEF SEG = SCRNSEG.SS%:BLOAD"EXEDE.SCR",0:DEF SEG
1750 RETURN
1760 HP=.0245*PRSS*INJ
1770 CLS
1780 DEF SEG = SCRNSEG.SS%:BLOAD"ANSWER.SCR",0:DEF SEG
1790 IF M=2 GOTO 1810
1800 COLOR 3,0,0
1810 LOCATE 8,53:PRINT PRSH
1820 LOCATE 10,53:PRINT PPRSD
1830 LOCATE 12,53:PRINT PPRST
1840 LOCATE 14,53:PRINT PRSS
1850 LOCATE 16,53:PRINT HP
1860 RETURN
1870 CLS
1880 IF M=2 GOTO 1900
1890 COLOR 14,0,0
1900 DEF SEG = SCRNSEG.SS%:BLOAD"CHTPNN.SCR",0:DEF SEG
1910 LOCATE 8,56:PRINT " "
1920 LOCATE 8,56:INPUT DPH
1930 LOCATE 22,14:PRINT " "
1940 IF DPH<10000 AND DPH>0 GOTO 2010
1950 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 1970
1960 COLOR 28,0,0:BEEP
1970 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
1980 IF M=2 GOTO 1910
1990 COLOR 14,0,0
2000 GOTO 1910
2010 LOCATE 10,56:PRINT " "
2020 LOCATE 10,56:INPUT INJ
2030 LOCATE 22,14:PRINT " "
2040 IF INJ<200 AND INJ>0 GOTO 2110
2050 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2070
2060 COLOR 28,0,0:BEEP
2070 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
2080 IF M=2 GOTO 2010
2090 COLOR 14,0,0
2100 GOTO 2010
2110 LOCATE 12,56:PRINT " "
2120 LOCATE 12,56:INPUT DIAIT
2130 LOCATE 22,14:PRINT " "
2140 IF DIAIT<=7.5 AND DIAIT=>1 GOTO 2210
2150 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2170
2160 COLOR 28,0,0:BEEP
2170 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
2180 IF M=2 GOTO 2110
2190 COLOR 14,0,0
2200 GOTO 2110
2210 LOCATE 14,56:PRINT " "
2220 LOCATE 14,56:INPUT CFX
2230 LOCATE 22,14:PRINT " "

```

```

2240 IF CFX<2 AND CFX>0 GOTO 2310
2250 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2270
2260 COLOR 28,0,0:BEEP
2270 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
2280 IF M=2 GOTO 2210
2290 COLOR 14,0,0
2300 GOTO 2210
2310 LOCATE 16,56:PRINT " "
2320 LOCATE 16,56:INPUT KX
2330 LOCATE 22,14:PRINT " "
2340 IF KX<2 AND KX>0 GOTO 2410
2350 IF M=2 GOTO 2370
2360 COLOR 28,0,0:BEEP
2370 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
2380 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2310
2390 COLOR 14,0,0
2400 GOTO 2310
2410 LOCATE 18,56:PRINT " "
2420 LOCATE 18,56:INPUT DENFF
2430 LOCATE 22,14:PRINT " "
2440 IF DENFF<=2 AND DENFF>0 GOTO 2510
2450 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2470
2460 COLOR 28,0,0:BEEP
2470 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
2480 IF M=2 GOTO 2410
2490 COLOR 14,0,0
2500 GOTO 2410
2510 LOCATE 20,56:PRINT " "
2520 LOCATE 20,56:INPUT GF
2530 LOCATE 22,14:PRINT " "
2540 IF GF<1.3 AND GF>.4 GOTO 2610
2550 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2570
2560 COLOR 28,0,0:BEEP
2570 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
2580 IF M=2 GOTO 2510
2590 COLOR 14,0,0
2600 GOTO 2510
2610 CLS
2620 DEF SEG = SCRNSeg.SS%:BLOAD"CHTPNNI.SCR",0:DEF SEG
2630 LOCATE 12,56:PRINT " "
2640 LOCATE 12,56:INPUT NMBD
2650 LOCATE 22,14:PRINT " "
2660 IF NMBD<10000 AND NMBD>0 GOTO 2730
2670 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2690
2680 COLOR 28,0,0:BEEP
2690 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
2700 IF M=2 GOTO 2630
2710 COLOR 14,0,0
2720 GOTO 2630
2730 LOCATE 14,56:PRINT " "
2740 LOCATE 14,56:INPUT COED
2750 LOCATE 22,14:PRINT " "
2760 IF COED<=1 AND COED>=.5 GOTO 2830
2770 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2790
2780 COLOR 28,0,0:BEEP
2790 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"

```

```

2800 IF M=2 GOTO 2730
2810 COLOR 14,0,0
2820 GOTO 2730
2830 LOCATE 18,56:PRINT " "
2840 LOCATE 18,56:INPUT DIAD
2850 LOCATE 22,14:PRINT " "
2860 IF DIAD=1 AND DIAD<=.25 GOTO 2930
2870 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 2890
2880 COLOR 28,0,0:BEEP
2890 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
2900 IF M=2 GOTO 2830
2910 COLOR 14,0,0
2920 GOTO 2830
2930 LOCATE 18,56:PRINT " "
2940 LOCATE 18,56:INPUT PRSP
2950 LOCATE 22,14:PRINT " "
2960 IF PRSP<=15000 AND FRSP<=1500 GOTO 3030
2970 IF M=1 THEN BEEP:GOTO 2990
2980 COLOR 28,0,0:BEEP
2990 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
3000 IF M=1 GOTO 3020
3010 COLOR 14,0,0
3020 GOTO 2930
3030 DPH=DPH*3.28
3040 DENFF=DENFF*6.3254
3050 PRST=DPH*G1
3060 PRSH=.052*DENFF*DPH
3070 PPRSD=.25*5*DENFF*INJ*(2*(COED*2*NMRD*2*DIAD*4)
3080 NP*(1+.4*CFX)-(2*CFX+1)*CFX
3090 V=17.16*INJ*(DIAD*2)
3100 REYD=1.86*(DIAD/12)*CFX*V*(2-CFX)*DENFF/(8*CFX*NP)
3110 IF REYD<= 2000 GOTO 3190
3120 F=.004
3130 FC=(1+.4*CFX*.75)*.4342*LOG(REYD*F*(1-CFX/2)-.4/CFX*(1.2))**2
3140 IF ABS(FC-F)*.001 THEN 3170
3150 F=FC
3160 GOTO 3130
3170 FACE=FC
3180 GOTO 3200
3190 FACE=1e-4*REYD
3200 PPRST=FACE*DPH+DENFF*V*(.25*3*DIAD)
3210 PRSS=PRST+PRSH+PPRST+PPRSD
3220 DPH=DPH*3.28
3230 DENFF=DENFF*6.3254
3240 IF PRSS-PRSP GOTO 2880
3250 CLS
3260 DEF SEG = SCRNSED-ESS:LOAD"BIIDE.BCP",0:DEF SEG
3270 RETURN
3280 HP=(1245+PRSS+INJ)
3290 CLS
3300 DEF SEG = SCRNSED-ESS:LOAD"ANSWER.BCP",0:DEF SEG
3310 IF M=2 GOTO 3330
3320 COLOR 14,0,0
3330 LOCATE 9,57:PRINT PRSH
3340 LOCATE 10,57:PRINT PPRSD
3350 LOCATE 12,57:PRINT PPRST

```

```

3360 LOCATE 14,53:PRINT PRSS
3370 LOCATE 16,53:PRINT HP
3380 RETURN
3390 CLS
3400 DEF SEG = SCRNSG.SS%:BLOAD"CHEAN-SCR",0:DEF SEG
3410 IF M=2 GOTO 3430
3420 COLOR 14,0,0
3430 LOCATE 8,56:PRINT " "
3440 LOCATE 8,56:INPUT DPH
3450 LOCATE 22,14:PRINT " "
3460 IF DPH<10000 AND DPH>0 GOTO 3530
3470 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 3490
3480 COLOR 28,0,0:BEEP
3490 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
3500 IF M=2 GOTO 3430
3510 COLOR 14,0,0
3520 GOTO 3430
3530 LOCATE 10,56:PRINT " "
3540 LOCATE 10,56:INPUT INJ
3550 LOCATE 22,14:PRINT " "
3560 IF INJ<200 AND INJ>0 GOTO 3630
3570 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 3590
3580 COLOR 28,0,0:BEEP
3590 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
3600 IF M=2 GOTO 3530
3610 COLOR 14,0,0
3620 GOTO 3530
3630 LOCATE 12,56:PRINT " "
3640 LOCATE 12,56:INPUT DIAITR
3650 LOCATE 22,14:PRINT " "
3660 IF DIAITR <=7.5 AND DIAITR=>1 GOTO 3730
3670 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 3690
3680 COLOR 28,0,0:BEEP
3690 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
3700 IF M=2 GOTO 3630
3710 COLOR 14,0,0
3720 GOTO 3630
3730 LOCATE 14,56:PRINT " "
3740 LOCATE 14,56:INPUT DIAETP
3750 LOCATE 22,14:PRINT " "
3760 IF DIAETP=>DIAITR GOTO 3780
3770 IF DIAETP <=7.5 AND DIAETP=>1 GOTO 3840
3780 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 3800
3790 COLOR 28,0,0:BEEP
3800 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
3810 IF M=2 GOTO 3730
3820 COLOR 14,0,0
3830 GOTO 3730
3840 LOCATE 16,56:PRINT " "
3850 LOCATE 16,56:INPUT VISFF
3860 LOCATE 22,14:PRINT " "
3870 IF VISFF<10000 AND VISFF>0 GOTO 3940
3880 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 3900
3890 COLOR 28,0,0:BEEP
3900 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
3910 IF M=2 GOTO 3840

```

```

3920 COLOR 14,0,0
3930 GOTO 3840
3940 LOCATE 18,56:PRINT " "
3950 LOCATE 18,56:INPUT DENFF
3960 LOCATE 22,14:PRINT "
3970 IF DENFF<=2 AND DENFF>0 GOTO 4040
3980 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 4000
3990 COLOR 28,0,0:BEEP
4000 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
4010 IF M=2 GOTO 3940
4020 COLOR 14,0,0
4030 GOTO 3940
4040 LOCATE 20,56:PRINT " "
4050 LOCATE 20,56:INPUT GF
4060 LOCATE 22,14:PRINT "
4070 IF GF<1.3 AND GF>.4 GOTO 4140
4080 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 4100
4090 COLOR 28,0,0:BEEP
4100 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
4110 IF M=2 GOTO 4040
4120 COLOR 14,0,0
4130 GOTO 4040
4140 CLS
4150 DEF SEG = SCREEN$+BLOAD"CHEANI.SCR",0:DEF SEG
4160 LOCATE 12,56:PRINT " "
4170 LOCATE 12,56:INPUT NMBD
4180 LOCATE 22,14:PRINT "
4190 IF NMBD<10000 AND NMBD>0 GOTO 4260
4200 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 4220
4210 COLOR 28,0,0:BEEP
4220 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
4230 IF M=2 GOTO 4160
4240 COLOR 14,0,0
4250 GOTO 4160
4260 LOCATE 14,56:PRINT " "
4270 LOCATE 14,56:INPUT COED
4280 LOCATE 22,14:PRINT "
4290 IF COED=41 AND COED=>.5 GOTO 4360
4300 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 4320
4310 COLOR 28,0,0:BEEP
4320 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
4330 IF M=2 GOTO 4260
4340 COLOR 14,0,0
4350 GOTO 4160
4360 LOCATE 16,56:PRINT " "
4370 LOCATE 16,56:INPUT DIAD
4380 LOCATE 22,14:PRINT "
4390 IF DIAD=1 AND DIAD<=.25 GOTO 4460
4400 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 4420
4410 COLOR 28,0,0:BEEP
4420 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
4430 IF M=2 GOTO 4360
4440 COLOR 14,0,0
4450 GOTO 4360
4460 LOCATE 18,56:PRINT " "
4470 LOCATE 18,56:INPUT PPSP

```

```

4480 LOCATE 22,14:PRINT "
4490 IF PRSP<=15000 AND PPSP=>1500 GOTO 4560
4500 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 4520
4510 COLOR 28,0,0:BEEP
4520 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
4530 IF M=2 GOTO 4460
4540 COLOR 14,0,0
4550 GOTO 4460
4560 DPH=DPH*3.28
4570 DENFF=DENFF*8.3259
4580 PRSF=DPH*GF
4590 PRSH=.052*DENFF*DPH
4600 PPPSD=-.2375*DENFF*INJ^2/(COED^2*NMBD^2*DIAD^4)
4610 REYQ=15920*INJ*DENFF/(VISFF*(DIAITR+DIAETP))
4620 IF REYQ<= 2000 GOTO 4650
4630 FACF=-.68*REYQ*(-.4343*LOG(-.2013*REYQ+.054))
4640 GOTO 4660
4650 FACF=16/REYQ
4660 PPRST=11.41*DPH*DENFF*INJ^2*FACF/((DIAITR-DIAETP)^3*(DIAITR+DIAETP)^2)
4670 PRSS=PRSF-PPSH+PPRST+PPPSD
4680 DPH=DPH/3.28
4690 DENFF=DENFF/8.3259
4700 IF PRSS<PRSP GOTO 4740
4710 CLS
4720 DEF SEG = SCRNSEG-55%:BLOAD"EXEDE.SCF",0:DEF SEG
4730 RETURN
4740 HP=.0245*PRSS*INJ
4750 CLS
4760 DEF SEG = SCRNSEG-55%:BLOAD"ANSWER.SCF",0:DEF SEG
4770 IF M=2 GOTO 4790
4780 COLOR 3,0,0
4790 LOCATE 8,53:PRINT PRSH
4800 LOCATE 10,53:PRINT PPRSD
4810 LOCATE 12,53:PRINT PPPST
4820 LOCATE 14,53:PRINT PRSS
4830 LOCATE 16,53:PRINT HP
4840 RETURN
4850 CLS
4860 IF M=2 GOTO 4880
4870 COLOR 14,0,0
4880 DEF SEG = SCRNSEG-55%:BLOAD"CHEANN.SCF",0:DEF SEG
4890 LOCATE 8,56:PRINT "
4900 LOCATE 8,56:INPUT DPH
4910 LOCATE 22,14:PRINT "
4920 IF DPH<10000 AND DPH>0 GOTO 4990
4930 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 4950
4940 COLOR 28,0,0:BEEP
4950 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
4960 IF M=2 GOTO 4890
4970 COLOR 14,0,0
4980 GOTO 4890
4990 LOCATE 10,56:PRINT "
5000 LOCATE 10,56:INPUT INJ
5010 LOCATE 22,14:PRINT "
5020 IF INJ<20 AND INJ>0 GOTO 5090
5030 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5050

```

```

5040 COLOR 28,0,0:BEEP
5050 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5060 IF M=2 GOTO 4990
5070 COLOR 14,0,0
5080 GOTO 4990
5090 LOCATE 12,56:PRINT " "
5100 LOCATE 12,56:INPUT DIAITR
5110 LOCATE 22,14:PRINT " "
5120 IF DIAITR<=7.5 AND DIAITR>=1 GOTO 5190
5130 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5150
5140 COLOR 28,0,0:BEEP
5150 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5160 IF M=2 GOTO 5090
5170 COLOR 14,0,0
5180 GOTO 5090
5190 LOCATE 14,56:PRINT " "
5200 LOCATE 14,56:INPUT DIAETP
5210 LOCATE 22,14:PRINT " "
5220 IF DIAETP=>DIAITR GOTO 5240
5230 IF DIAETP<=7.5 AND DIAETP>=1 GOTO 5300
5240 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5260
5250 COLOR 28,0,0:BEEP
5260 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5270 IF M=2 GOTO 5190
5280 COLOR 14,0,0
5290 GOTO 5190
5300 LOCATE 16,56:PRINT " "
5310 LOCATE 16,56:INPUT CFX
5320 LOCATE 22,14:PRINT " "
5330 IF CFX<2 AND CFX>0 GOTO 5400
5340 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5360
5350 COLOR 28,0,0:BEEP
5360 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5370 IF M=2 GOTO 5300
5380 COLOR 14,0,0
5390 GOTO 5300
5400 LOCATE 18,56:PRINT " "
5410 LOCATE 18,56:INPUT KX
5420 LOCATE 22,14:PRINT " "
5430 IF KX<2 AND KX>0 GOTO 5500
5440 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5460
5450 COLOR 28,0,0:BEEP
5460 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5470 IF M=2 GOTO 5400
5480 COLOR 14,0,0
5490 GOTO 5400
5500 LOCATE 20,56:PRINT " "
5510 LOCATE 20,56:INPUT DENFF
5520 LOCATE 22,14:PRINT " "
5530 IF DENFF<=2 AND DENFF>0 GOTO 5600
5540 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5560
5550 COLOR 28,0,0:BEEP
5560 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5570 IF M=2 GOTO 5500
5580 COLOR 14,0,0
5590 GOTO 5500

```



```

5600 CLS
5610 DEF SEG = SCPNSEG.SSXI:BLOAD"CHEANNI.SCR",0:DEF SEG
5620 LOCATE 12,56:PRINT " "
5630 LOCATE 12,56:INPUT GF
5640 LOCATE 22,14:PRINT "
5650 IF GF<1.3 AND GF>.4 GOTO 5720
5660 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5680
5670 COLOR 28,0,0:BEEP
5680 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5690 IF M=2 GOTO 5620
5700 COLOR 14,0,0
5710 GOTO 5620
5720 LOCATE 14,56:PRINT " "
5730 LOCATE 14,56:INPUT NMBD
5740 LOCATE 22,14:PRINT " "
5750 IF NMBD<10000 AND NMBD>0 GOTO 5820
5760 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5780
5770 COLOR 28,0,0:BEEP
5780 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5790 IF M=2 GOTO 5720
5800 COLOR 14,0,0
5810 GOTO 5720
5820 LOCATE 16,56:PRINT " "
5830 LOCATE 16,56:INPUT COED
5840 LOCATE 22,14:PRINT " "
5850 IF COED<=1 AND COED>=.5 GOTO 5920
5860 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5880
5870 COLOR 28,0,0:BEEP
5880 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5890 IF M=2 GOTO 5820
5900 COLOR 14,0,0
5910 GOTO 5820
5920 LOCATE 18,56:PRINT " "
5930 LOCATE 18,56:INPUT DIAD
5940 LOCATE 22,14:PRINT " "
5950 IF DIAD<=1 AND DIAD>=.25 GOTO 6020
5960 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 5980
5970 COLOR 28,0,0:BEEP
5980 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
5990 IF M=2 GOTO 5920
6000 COLOR 14,0,0
6010 GOTO 5920
6020 LOCATE 20,56:PRINT " "
6030 LOCATE 20,56:INPUT PRSP
6040 LOCATE 22,14:PRINT " "
6050 IF PRSP<=15000 AND PRSP>=1500 GOTO 6120
6060 IF M=2 THEN BEEP:GOTO 6080
6070 COLOR 28,0,0:BEEP
6080 LOCATE 22,14:PRINT "VALOR DADO INCORRECTO,FAVOR INTRODUCIR VALOR CORRECTO"
6090 IF M=2 GOTO 6020
6100 COLOR 14,0,0
6110 GOTO 6020
6120 DPH=DPH*3.28
6130 DENFF=DENFF*8.3259
6140 PRSF=DPH*GF
6150 PRSH=.052*DENFF*DPH

```

```

6160 PPRSD=.2375*DENFF*INJ^2/(COED^2*NMBD^2*DIAD^4)
6170 KA=KX/(3*CFX/(2*CFX+1))^CFX
6180 V=17.16*INJ/(DIAITR^2-DIAETP^2)
6190 REYQ=2.79*(DIAITR-DIAETP)/12)^CFX*V^(2-CFX)*DENFF/(12^CFX*KA)
6200 IF REYQ<= 2000 GOTO 6280
6210 F=.004
6220 FC=(1/((4/CFX+.75)*.4343*LOG(REYQ*F^(1-CFX/2))-4/CFX^1.2))^2
6230 IF ABS(FC-F)<.001 THEN 6260
6240 F=FC
6250 GOTO 6220
6260 FACF=FC
6270 GOTO 6290
6280 FACF=16/REYQ
6290 PPRST=FACF*DPH*DENFF*V^2/(25.8*(DIAITR-DIAETP))
6300 PRSS=PRSF-PRSH+PPRST+PPRSD
6310 DPH=DPH/3.28
6320 DENFF=DENFF/8.3259
6330 IF PRSS<PRSP GOTO 6370
6340 CLS
6350 DEF SEG = SCFNSEG.SS%:BLOAD"EXEDE.SCR",0:DEF SEG
6360 RETURN
6370 HP=.0245*PRSS*INJ
6380 CLS
6390 DEF SEG = SCFNSEG.SS%:BLOAD"ANSWER.SCR",0:DEF SEG
6400 IF M=2 GOTO 6420
6410 COLOR 3,0,0
6420 LOCATE 9,53:PRINT PRSH
6430 LOCATE 10,53:PRINT PPRSD
6440 LOCATE 12,53:PRINT PPRST
6450 LOCATE 14,53:PRINT PRSS
6460 LOCATE 16,53:PRINT HP
6470 RETURN
6480 LOCATE 20,22:PRINT "Verifique impresora funcionando"
6490 LOCATE 21,22:PRINT "para continuar pulse cualquier tecla"
6500 IF INKEY="" THEN 6500
6510 LPRINT " "
6520 LPRINT " "
6530 LPRINT " "
6540 LPRINT " "
6550 LPRINT " "
6560 LPRINT " "
6570 LPRINT " "
6580 LPRINT " "
6590 LPRINT " "
6600 LPRINT " "
6610 LPRINT " "
6620 LPRINT " "
6630 LPRINT " "
6640 ON FLEC% GOSUB 6670,6680,7020,7160
6650 GOSUB 6780
6660 RETURN
6670 LPRINT " Profundidad del intervalo a fracturar.....":DPH:"(M)"
6680 LPRINT " Gasto de inyeccion.....":INJ:"(BPM)"
6690 LPRINT " Diametro interior de la Toberia.....":DIAIT:"(CG)"
6700 LPRINT " Viscosidad del fluido fracturante.....":VISFF:"(CP)"
6710 LPRINT " Densidad del fluido fracturante.....":DENFF:"(GR/CC)"

```

6720 LPRINT " Gradiente de fractura.....;GF;"(lb/pg)/pie)"  
 6730 LPRINT " Numero de disparos.....;NMBD  
 6740 LPRINT " Coeficiente de descarga.....;COED  
 6750 LPRINT " Diametro del disparo.....;DIAD;"(PG)"  
 6760 LPRINT " Maxima presion permisible en sup.....;PRSP;"(lb/pg))"  
 6770 RETURN  
 6780 LPRINT  
 6790 LPRINT

R E S U L T A D O S

6800 LPRINT " Carga hidrostatica.....;PRSH;"(lb/pg))"  
 6810 LPRINT " Perdida de presion en los disparos.....;PPRSD;"(lb/pg))"  
 6820 LPRINT " Perdida de presion en la tuberia.....;PPRST;"(lb/pg))"  
 6830 LPRINT " Presion en la superficie.....;PRSS;"(lb/pg))"  
 6840 LPRINT " Potencia hidraulica requerida.....;HP;"(HP)"  
 6850 RETURN

6860 LPRINT " Profundidad del intervalo a fracturar....;DPH;"(M)"  
 6870 LPRINT " Gasto de inyeccion.....;INJ;"(BPM)"  
 6880 LPRINT " Diametro interior de la T.R.....;DIAITR;"(PG)"  
 6890 LPRINT " Diametro interior de la T.P.....;DIAETP;"(PG)"  
 6900 LPRINT " Viscosidad del fluido fracturante.....;VISFF;"(CP)"  
 6910 LPRINT " Densidad del fluido fracturante.....;DENFF;"(GR/CC)"  
 6920 LPRINT " Gradiente de fractura.....;GF;"(lb/pg)/pie)"  
 6930 LPRINT " Numero de disparos.....;NMBD  
 6940 LPRINT " Coeficiente de descarga.....;COED  
 6950 LPRINT " Diametro del disparo.....;DIAD;"(PG)"  
 6960 LPRINT " Maxima presion permisible en sup.....;PRSP;"(lb/pg))"  
 6970 RETURN  
 7000 LPRINT  
 7010 LPRINT

7020 LPRINT " Profundidad del intervalo a fracturar...;DPH;"(M)"  
 7030 LPRINT " Gasto de inyeccion.....;INJ;"(BPM)"  
 7040 LPRINT " Diametro interior de la T.P.....;DIAITP;"(PG)"  
 7050 LPRINT " Indice de consistencia.....;IX  
 7060 LPRINT " Indice de comportamiento de flujo.....;CFX;"(lb-f./pie))"  
 7070 LPRINT " Densidad del fluido fracturante.....;DENFF;"(GR/CC)"  
 7080 LPRINT " Gradiente de fractura.....;GF;"(lb/pg)/pie)"  
 7090 LPRINT " Numero de disparos.....;NMBD  
 7100 LPRINT " Coeficiente de descarga.....;COED  
 7110 LPRINT " Diametro del disparo.....;DIAD;"(PG)"  
 7120 LPRINT " Maxima presion permisible en sup.....;PRSP;"(lb/pg))"  
 7130 RETURN  
 7140 LPRINT  
 7150 LPRINT

7160 LPRINT " Profundidad del intervalo a fracturar...;DPH;"(M)"  
 7170 LPRINT " Gasto de inyeccion.....;INJ;"(BPM)"  
 7180 LPRINT " Diametro interior de la T.P.....;DIAITR;"(PG)"  
 7190 LPRINT " Diametro exterior de la T.P.....;DIAETP;"(PG)"  
 7200 LPRINT " Indice de comportamiento de flujo...;CFX;"(lb-f./pie))"  
 7210 LPRINT " Indice de consistencia.....;IX  
 7220 LPRINT " Densidad del fluido fracturante.....;DENFF;"(GR/CC)"  
 7230 LPRINT " Gradiente de fractura.....;GF;"(lb/pg)/pie)"  
 7240 LPRINT " Numero de disparos.....;NMBD  
 7250 LPRINT " Coeficiente de descarga.....;COED  
 7260 LPRINT " Diametro del disparo.....;DIAD;"(PG)"  
 7270 LPRINT " Maxima presion permisible en sup.....;PRSP;"(lb/pg))"  
 7280 LPRINT

```

7280 LPRINT
7290 RETURN
7300 DEF SEG = SCRNSEG-55:BLOAD"DATTPN.SCR",0:DEF SEG
7310 GOSUB 11600
7320 LOCATE 19,15:INPUT "Inserte el n#mero de variable a modificar";SEL%
7330 ON SEL% GOSUB 7370,7460,7550,7640,7730,7820,7910,8000,8090,8180
7340 LOCATE 19,15:INPUT "Desea cambiar otra variable (si/no)";SEL1%
7350 LOCATE 19,15:PRINT " "
7360 IF SEL1%="SI" OR SEL1%="si" OR SEL1%="s" OR SEL1%="S" GOTO 7320:ELSE RETURN "
7370 LOCATE 7,53:PRINT " "
7380 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
7390 LOCATE 7,53:INPUT DPH
7400 LOCATE 19,15:PRINT " "
7410 LOCATE 20,15:PRINT " "
7420 IF DPH<10000 AND DPH>0 THEN RETURN
7430 BEEP
7440 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
7450 GOTO 7370
7460 LOCATE 8,53:PRINT " "
7470 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
7480 LOCATE 8,53:INPUT INJ
7490 LOCATE 19,15:PRINT " "
7500 LOCATE 20,15:PRINT " "
7510 IF INJ<200 AND INJ>0 THEN RETURN
7520 BEEP
7530 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
7540 GOTO 7460
7550 LOCATE 9,53:PRINT " "
7560 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
7570 LOCATE 9,53:INPUT DIAIT
7580 LOCATE 19,15:PRINT " "
7590 LOCATE 20,15:PRINT " "
7600 IF DIAIT<=7.5 AND DIAIT=>1 THEN RETURN
7610 BEEP
7620 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
7630 GOTO 7550
7640 LOCATE 10,53:PRINT " "
7650 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
7660 LOCATE 10,53:INPUT VISFF
7670 LOCATE 19,15:PRINT " "
7680 LOCATE 20,15:PRINT " "
7690 IF VISFF<10000 AND VISFF>0 THEN RETURN
7700 BEEP
7710 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
7720 GOTO 7640
7730 LOCATE 11,53:PRINT " "
7740 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
7750 LOCATE 11,53:INPUT DENFF
7760 LOCATE 19,15:PRINT " "
7770 LOCATE 20,15:PRINT " "
7780 IF DENFF<2 AND DENFF>0 THEN RETURN
7790 BEEP
7800 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
7810 GOTO 7730
7820 LOCATE 12,53:PRINT " "
7830 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "

```

```

7840 LOCATE 12,53:INPUT GF
7850 LOCATE 19,15:PRINT "
7860 LOCATE 20,15:PRINT "
7870 IF GF<1-3 AND GF>.4 THEN RETURN
7880 BEEP
7890 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
7900 GOTO 7820
7910 LOCATE 13,53:PRINT "
7920 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
7930 LOCATE 13,53:INPUT NMBD
7940 LOCATE 19,15:PRINT "
7950 LOCATE 20,15:PRINT "
7960 IF NMBD<10000 AND NMBD>0 THEN RETURN
7970 BEEP
7980 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
7990 GOTO 7910
8000 LOCATE 14,53:PRINT "
8010 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
8020 LOCATE 14,53:INPUT COED
8030 LOCATE 19,15:PRINT "
8040 LOCATE 20,15:PRINT "
8050 IF COED<=1 AND COED=>.5 THEN RETURN
8060 BEEP
8070 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8080 GOTO 8000
8090 LOCATE 15,53:PRINT "
8100 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
8110 LOCATE 15,53:INPUT DIAD
8120 LOCATE 19,15:PRINT "
8130 LOCATE 20,15:PRINT "
8140 IF DIAD<=1 AND DIAD=>.25 THEN RETURN
8150 BEEP
8160 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8170 GOTO 8090
8180 LOCATE 16,53:PRINT "
8190 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
8200 LOCATE 16,53:INPUT PRSP
8210 LOCATE 19,15:PRINT "
8220 LOCATE 20,15:PRINT "
8230 IF PRSP<=15000 AND PRSP=>1500 THEN RETURN
8240 BEEP
8250 LOCATE 19,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8260 GOTO 8180
8270 CLS
8280 DEF SEG = SCRNSEG.SS%:BLOAD"DATEAN.SCR",0:DEF SEG
8290 GOSUB 11710
8300 LOCATE 20,15:INPUT "Inserte el numero de variable a modificar";SEL%
8310 ON SEL% GOSUB 8350,8440,8530,8620,8720,8810,8900,8990,9080,9170,9260
8320 LOCATE 20,15:INPUT "Desea cambiar otra variable (si/no)";SEL1%
8330 LOCATE 20,15:PRINT "
8340 IF SEL1%="SI" OR SEL1%="s" OR SEL1%="S" OR SEL1%="s" OR SEL1%="S" GOTO 8300:ELSE RETURN
8350 LOCATE 7,53:PRINT "
8360 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
8370 LOCATE 7,53:INPUT DPH
8380 LOCATE 20,15:PRINT "
8390 LOCATE 21,15:PRINT "

```

```

8400 IF DPH<10000 AND DPH>0 THEN RETURN
8410 BEEP
8420 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8430 GOTO 8350
8440 LOCATE 8,53:PRINT " "
8450 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return"
8460 LOCATE 8,53:INPUT INJ
8470 LOCATE 20,15:PRINT " "
8480 LOCATE 21,15:PRINT " "
8490 IF INJ<200 AND INJ>0 THEN RETURN
8500 BEEP
8510 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8520 GOTO 8440
8530 LOCATE 9,53:PRINT " "
8540 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return"
8550 LOCATE 9,53:INPUT DIAITR
8560 LOCATE 20,15:PRINT " "
8570 LOCATE 21,15:PRINT " "
8580 IF DIAITR <=7.5 AND DIAITR>=1 THEN RETURN
8590 BEEP
8600 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8610 GOTO 8530
8620 LOCATE 10,53:PRINT " "
8630 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return"
8640 LOCATE 10,53:INPUT DIAETP
8650 LOCATE 20,15:PRINT " "
8660 LOCATE 21,15:PRINT " "
8670 IF DIAETP< DIAITR THEN GOTO 8690:ELSE GOTO 8680
8680 IF DIAETP <=7.5 AND DIAETP>=1 THEN RETURN
8690 BEEP
8700 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8710 GOTO 8620
8720 LOCATE 11,53:PRINT " "
8730 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return"
8740 LOCATE 11,53:INPUT VISFF
8750 LOCATE 20,15:PRINT " "
8760 LOCATE 21,15:PRINT " "
8770 IF VISFF<10000 AND VISFF>0 THEN RETURN
8780 BEEP
8790 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8800 GOTO 8720
8810 LOCATE 12,53:PRINT " "
8820 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return"
8830 LOCATE 12,53:INPUT DENFF
8840 LOCATE 20,15:PRINT " "
8850 LOCATE 21,15:PRINT " "
8860 IF DENFF =0 AND DENFF <=1 THEN RETURN
8870 BEEP
8880 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8890 GOTO 8810
8900 LOCATE 13,53:PRINT " "
8910 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return"
8920 LOCATE 13,53:INPUT GF
8930 LOCATE 20,15:PRINT " "
8940 LOCATE 21,15:PRINT " "
8950 IF GF<1.5 AND GF >=0 THEN RETURN

```

```

8960 BEEP
8970 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
8980 GOTO 8900
8990 LOCATE 14,53:PRINT " "
9000 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9010 LOCATE 14,53:INPUT NMBD
9020 LOCATE 20,15:PRINT " "
9030 LOCATE 21,15:PRINT " "
9040 IF NMBD<10000 AND NMBD>0 THEN RETURN
9050 BEEP
9060 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9070 GOTO 8990
9080 LOCATE 15,53:PRINT " "
9090 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9100 LOCATE 15,53:INPUT COED
9110 LOCATE 20,15:PRINT " "
9120 LOCATE 21,15:PRINT " "
9130 IF COED<=1 AND COED=>.5 THEN RETURN
9140 BEEP
9150 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9160 GOTO 9080
9170 LOCATE 16,53:PRINT " "
9180 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9190 LOCATE 16,53:INPUT DIAD
9200 LOCATE 20,15:PRINT " "
9210 LOCATE 21,15:PRINT " "
9220 IF DIAD<=1 AND DIAD=>.25 THEN RETURN
9230 BEEP
9240 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9250 GOTO 9170
9260 LOCATE 17,53:PRINT " "
9270 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9280 LOCATE 17,53:INPUT PRSP
9290 LOCATE 20,15:PRINT " "
9300 LOCATE 21,15:PRINT " "
9310 IF PRSP<=15000 AND PRSP=>1500 THEN RETURN
9320 BEEP
9330 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9340 GOTO 9260
9350 RETURN
9360 CLS
9370 DEF SEG = SCRNSEG-SSZ:BLOAD"DATTPNN.SCR",0:DEF SEG
9380 GOSUB 11830
9390 LOCATE 20,15:INPUT "Inserte el n#mero de variable a modificar";SEL%
9400 ON SEL% GOSUB 9440,9530,9620,9710,9800,9890,9980,10070,10160,10240,10330
9410 LOCATE 20,15:INPUT "Desea cambiar otra variable (si/no)";SEL1%
9420 LOCATE 20,15:PRINT " "
9430 IF SEL1%="SI" OR SEL1%="si" OR SEL1%="s" OR SEL1%="S" GOTO 9390:ELSE RETURN
9440 LOCATE 7,50:PRINT " "
9450 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9460 LOCATE 7,50:INPUT DPH
9470 LOCATE 20,15:PRINT " "
9480 LOCATE 21,15:PRINT " "
9490 IF DPH<10000 AND DPH>0 THEN RETURN
9500 BEEP
9510 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"

```

```

9520 GOTO 9440
9530 LOCATE 8,50:PRINT " " "
9540 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9550 LOCATE 8,50:INPUT INJ
9560 LOCATE 20,15:PRINT " " "
9570 LOCATE 21,15:PRINT " " "
9580 IF INJ<200 AND INJ>0 THEN RETURN
9590 BEEP
9600 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9610 GOTO 9530
9620 LOCATE 9,50:PRINT " " "
9630 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9640 LOCATE 9,50:INPUT DIAIT
9650 LOCATE 20,15:PRINT " " "
9660 LOCATE 21,15:PRINT " " "
9670 IF DIAIT<=7.5 AND DIAIT>0 THEN RETURN
9680 BEEP
9690 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9700 GOTO 9620
9710 LOCATE 10,50:PRINT " " "
9720 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9730 LOCATE 10,50:INPUT CFX
9740 LOCATE 20,15:PRINT " " "
9750 LOCATE 21,15:PRINT " " "
9760 IF CFX<2 AND CFX>0 THEN RETURN
9770 BEEP
9780 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9790 GOTO 9710
9800 LOCATE 11,50:PRINT " " "
9810 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9820 LOCATE 11,50:INPUT KX
9830 LOCATE 20,15:PRINT " " "
9840 LOCATE 21,15:PRINT " " "
9850 IF KX<2 AND KX>0 THEN RETURN
9860 BEEP
9870 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9880 GOTO 9800
9890 LOCATE 12,50:PRINT " " "
9900 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
9910 LOCATE 12,50:INPUT DENFF
9920 LOCATE 20,15:PRINT " " "
9930 LOCATE 21,15:PRINT " " "
9940 IF DENFF<=2 AND DENFF>0 THEN RETURN
9950 BEEP
9960 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
9970 GOTO 9890
9980 LOCATE 13,50:PRINT " " "
9990 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
10000 LOCATE 13,50:INPUT GF
10010 LOCATE 20,15:PRINT " " "
10020 LOCATE 21,15:PRINT " " "
10030 IF GF<1.3 AND GF>.3 THEN RETURN
10040 BEEP
10050 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10060 GOTO 9980
10070 LOCATE 14,50:PRINT " " "

```



```

10080 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return  "
10090 LOCATE 14,50:INPUT NMBD
10100 LOCATE 20,15:PRINT " "
10110 LOCATE 21,15:PRINT " "
10120 IF NMBD<10000 AND NMBD>0 THEN RETURN
10130 BEEP
10140 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10150 GOTO 10070
10160 LOCATE 15,50:PRINT " "
10170 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return  "
10180 LOCATE 15,50:INPUT COED
10190 LOCATE 20,15:PRINT " "
10200 LOCATE 21,15:PRINT " "
10210 IF COED<=1 AND COED>=.5 THEN RETURN
10220 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10230 GOTO 10160
10240 LOCATE 16,50:PRINT " "
10250 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return  "
10260 LOCATE 16,50:INPUT DIAD
10270 LOCATE 20,15:PRINT " "
10280 LOCATE 21,15:PRINT " "
10290 IF DIAD<=1 AND DIAD>=.25 THEN RETURN
10300 BEEP
10310 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10320 GOTO 10240
10330 LOCATE 17,50:PRINT " "
10340 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return  "
10350 LOCATE 17,50:INPUT PRSP
10360 LOCATE 20,15:PRINT " "
10370 LOCATE 21,15:PRINT " "
10380 IF PRSP<=15000 AND PRSP>1500 THEN RETURN
10390 BEEP
10400 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10410 GOTO 10330
10420 RETURN
10430 CLS
10440 DEF SEG = SCFNSEG-55%:BLOAD"DATEANN.SCR",0:DEF SEG
10450 GOSUB 11950
10460 LOCATE 20,15:INPUT "Inserte el numero de variable a modificar";SELZ
10470 ON SELZ GOSUB 10510,10600,10690,10780,10880,10970,11060,11150,11240,11330,
11420,10370
10480 LOCATE 20,15:INPUT "Desea cambiar otra variable (si/no)";SEL1$
10490 LOCATE 20,15:PRINT " "
10500 IF SEL1$="SI" OR SEL1$="s" OR SEL1$="S" OR SEL1$="S" GOTO 10460:ELSE RETU
RN
10510 LOCATE 6,50:PRINT " "
10520 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return  "
10530 LOCATE 6,50:INPUT DPH
10540 LOCATE 20,15:PRINT " "
10550 LOCATE 21,15:PRINT " "
10560 IF DPH<10000 AND DPH>0 THEN RETURN
10570 BEEP
10580 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10590 GOTO 10510
10600 LOCATE 7,50:PRINT " "
10610 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return  "
10620 LOCATE 7,50:INPUT INJ
10630 LOCATE 20,15:PRINT " "

```

```

10640 LOCATE 21,15:PRINT "
10650 IF INJ<200 AND INJ>0 THEN RETURN
10660 BEEP
10670 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10680 GOTO 10600
10690 LOCATE 8,50:PRINT " "
10700 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
10710 LOCATE 8,50:INPUT DIAITR
10720 LOCATE 20,15:PRINT "
10730 LOCATE 21,15:PRINT "
10740 IF DIAITR<=7.5 AND DIAITR=>1 THEN RETURN
10750 BEEP
10760 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10770 GOTO 10690
10780 LOCATE 9,50:PRINT " "
10790 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
10800 LOCATE 9,50:INPUT DIAETP
10810 LOCATE 20,15:PRINT "
10820 LOCATE 21,15:PRINT "
10830 IF DIAETP=>DIAITR GOTO 10850
10840 IF DIAETP<=7.5 AND DIAETP=>1 THEN RETURN
10850 BEEP
10860 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10870 GOTO 10780
10880 LOCATE 10,50:PRINT " "
10890 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
10900 LOCATE 10,50:INPUT CFX
10910 LOCATE 20,15:PRINT "
10920 LOCATE 21,15:PRINT "
10930 IF CFX<2 AND CFX>0 THEN RETURN
10940 BEEP
10950 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
10960 GOTO 10880
10970 LOCATE 11,50:PRINT " "
10980 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
10990 LOCATE 11,50:INPUT KX
11000 LOCATE 20,15:PRINT "
11010 LOCATE 21,15:PRINT "
11020 IF KX<2 AND KX>0 THEN RETURN
11030 BEEP
11040 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
11050 GOTO 10970
11060 LOCATE 12,50:PRINT " "
11070 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
11080 LOCATE 12,50:INPUT DENFF
11090 LOCATE 20,15:PRINT "
11100 LOCATE 21,15:PRINT "
11110 IF DENFF<=2 AND DENFF>0 THEN RETURN
11120 BEEP
11130 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
11140 GOTO 11060
11150 LOCATE 13,50:PRINT " "
11160 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
11170 LOCATE 13,50:INPUT GF
11180 LOCATE 20,15:PRINT "
11190 LOCATE 21,15:PRINT "

```

```

11200 IF GF<1.3 AND GF>.4 THEN RETURN
11210 BEEP
11220 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
11230 GOTO 11150
11240 LOCATE 14,50:PRINT " "
11250 LOCATE 20,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
11260 LOCATE 14,50:INPUT NMED
11270 LOCATE 20,15:PRINT "
11280 LOCATE 21,15:PRINT "
11290 IF NMED<10000 AND NMED>0 THEN RETURN
11300 BEEP
11310 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
11320 GOTO 11240
11330 LOCATE 15,50:PRINT " "
11340 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
11350 LOCATE 15,50:INPUT COED
11360 LOCATE 20,15:PRINT "
11370 LOCATE 21,15:PRINT "
11380 IF COED<=1 AND COED>=.5 THEN RETURN
11390 BEEP
11400 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
11410 GOTO 11330
11420 LOCATE 16,50:PRINT " "
11430 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
11440 LOCATE 16,50:INPUT DIAD
11450 LOCATE 20,15:PRINT "
11460 LOCATE 21,15:PRINT "
11470 IF DIAD/=1 AND DIAD<=.25 THEN RETURN
11480 BEEP
11490 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
11500 GOTO 11420
11510 LOCATE 17,50:PRINT " "
11520 LOCATE 21,15:PRINT "Inserte el nuevo valor y pulse return "
11530 LOCATE 17,50:INPUT PRSP
11540 LOCATE 20,15:PRINT "
11550 LOCATE 21,15:PRINT "
11560 IF PRSP<=15000 AND PRSP>=1500 THEN RETURN
11570 BEEP
11580 LOCATE 20,15:PRINT "Valor dado incorrecto"
11590 GOTO 11510
11600 LOCATE 7,53:PRINT DPH
11610 LOCATE 8,53:PRINT INJ
11620 LOCATE 9,53:PRINT DIAIT
11630 LOCATE 10,53:PRINT VISFF
11640 LOCATE 11,53:PRINT DENFF
11650 LOCATE 12,53:PRINT GF
11660 LOCATE 13,53:PRINT NMED
11670 LOCATE 14,53:PRINT COED
11680 LOCATE 15,53:PRINT DIAD
11690 LOCATE 16,53:PRINT PRSP
11700 RETURN
11710 LOCATE 7,53:PRINT DPH
11720 LOCATE 8,53:PRINT INJ
11730 LOCATE 9,53:PRINT DIAITP
11740 LOCATE 10,53:PRINT DIAETP
11750 LOCATE 11,53:PRINT VISFF

```

11760 LOCATE 12,53:PRINT DENFF  
11770 LOCATE 13,53:PRINT GF  
11780 LOCATE 14,53:PRINT NMBD  
11790 LOCATE 15,53:PRINT COED  
11800 LOCATE 16,53:PRINT DIAD  
11810 LOCATE 17,53:PRINT PRSP  
11820 RETURN  
11830 LOCATE 7,51:PRINT DPH  
11840 LOCATE 8,51:PRINT INJ  
11850 LOCATE 9,51:PRINT DIAIT  
11860 LOCATE 10,51:PRINT CFX  
11870 LOCATE 11,51:PRINT KX  
11880 LOCATE 12,51:PRINT DENFF  
11890 LOCATE 13,51:PRINT GF  
11900 LOCATE 14,51:PRINT NMBD  
11910 LOCATE 15,51:PRINT COED  
11920 LOCATE 16,51:PRINT DIAD  
11930 LOCATE 17,51:PRINT PRSP  
11940 RETURN  
11950 LOCATE 6,50:PRINT DPH  
11960 LOCATE 7,50:PRINT INJ  
11970 LOCATE 8,50:PRINT DIAITP  
11980 LOCATE 9,50:PRINT DIAETP  
11990 LOCATE 10,50:PRINT CFX  
12000 LOCATE 11,50:PRINT KX  
12010 LOCATE 12,50:PRINT DENFF  
12020 LOCATE 13,50:PRINT GF  
12030 LOCATE 14,50:PRINT NMBD  
12040 LOCATE 15,50:PRINT COED  
12050 LOCATE 16,50:PRINT DIAD  
12060 LOCATE 17,50:PRINT PRSP  
12070 RETURN

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE CAIDAS DE PRESION POR FRICCIÓN Y POTENCIA REQUERIDA EN LA SUP. METODO: D.M. DODGE & A.E. METZNER  
 ELABORO: MANUEL MERCADO ORTIZ

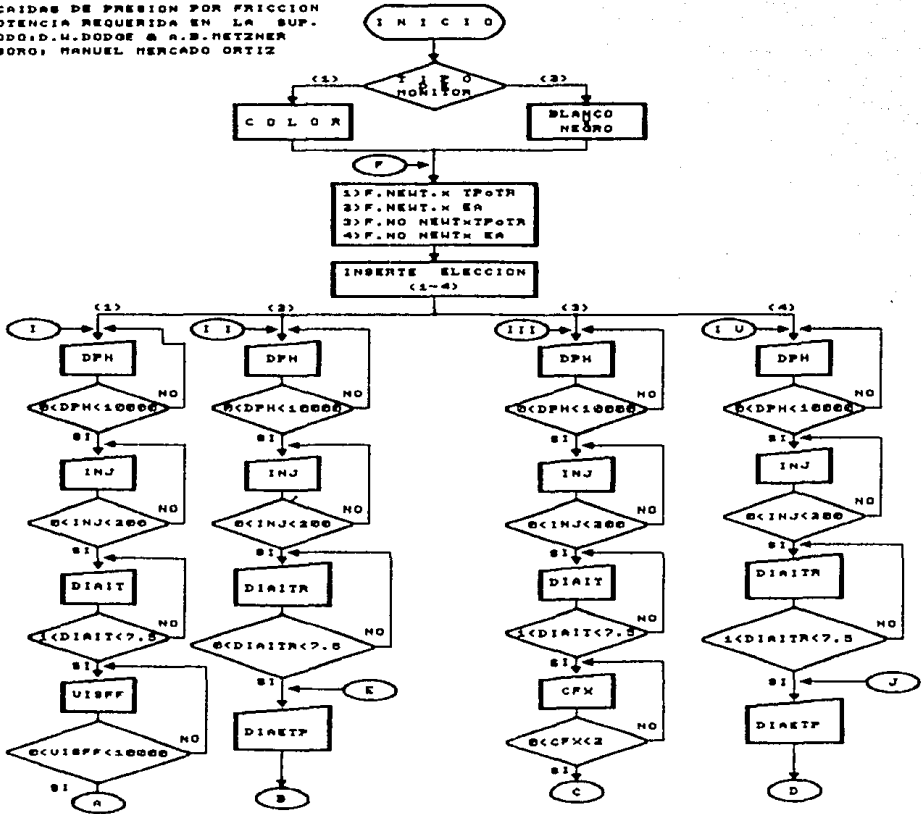
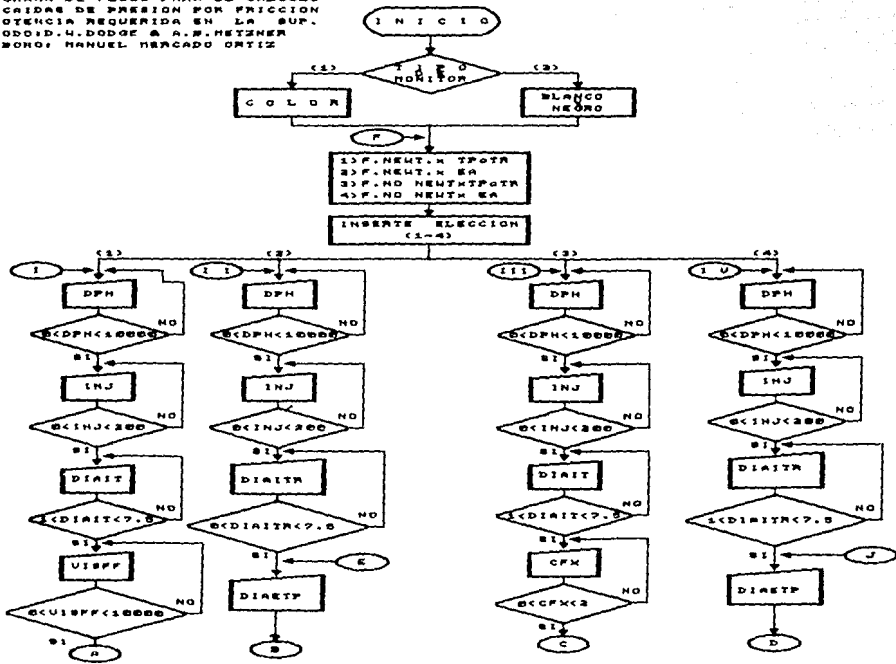
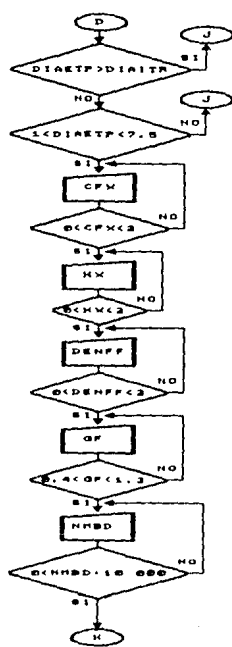
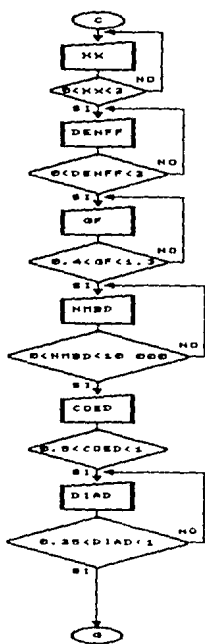
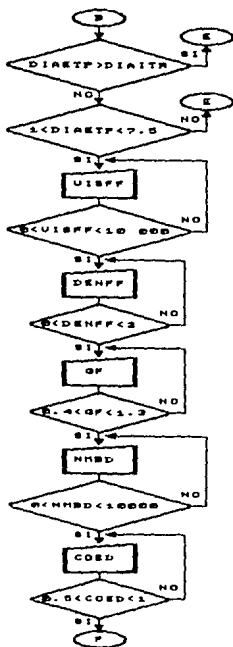
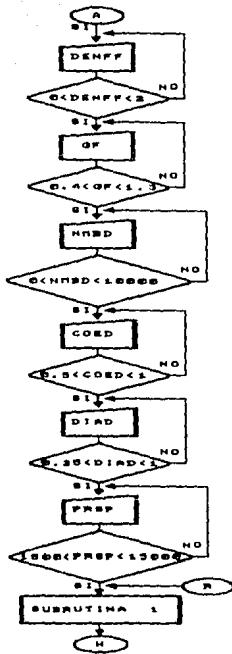
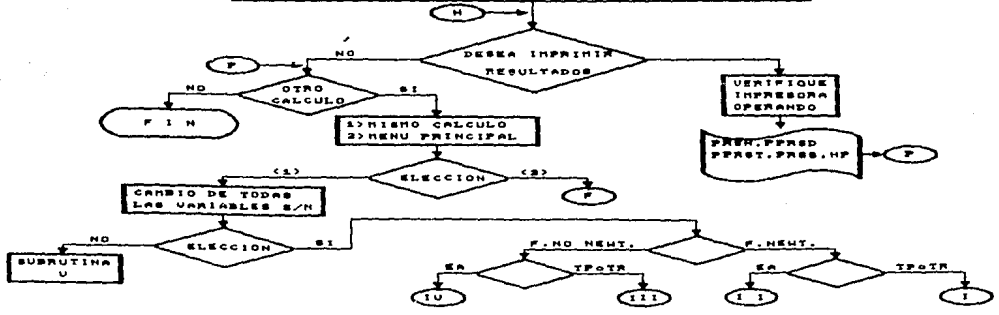
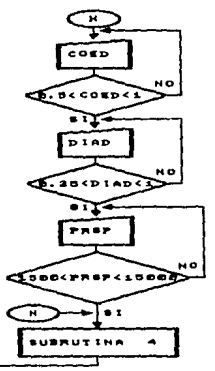
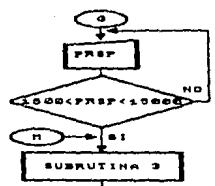
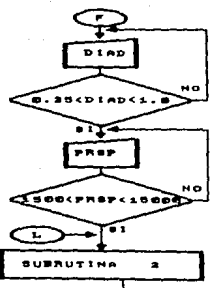


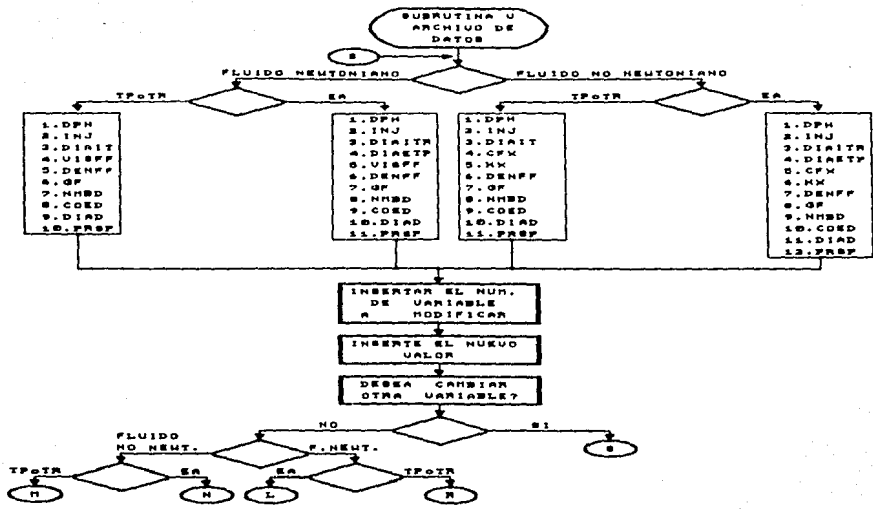
DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE CAIDAS DE PRESION POR FRICCION Y POTENCIA REQUERIDA EN LA SUP.  
 METODO: D. W. DODGE & A. F. HETZNER  
 ELABORO: MANUEL HERRERO ORTIZ











SUBROTINA 3  
F. HAITONIND - TP

```
DEBEREM 3, 20  
DEBEREM 1, 20  
DEBEREM 1, 20  
DEBEREM 1, 20  
DEBEREM 1, 20  
DEBEREM 1, 20  
DEBEREM 1, 20  
DEBEREM 1, 20  
DEBEREM 1, 20  
DEBEREM 1, 20
```

ALVO 1000 (NO)

FLUJO  
LADINHO  
PR. 110, 1000

FLUJO  
TURBULENTO  
PR. 110, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000

```
PR. 110, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000  
PR. 110, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000  
PR. 110, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000  
PR. 110, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000  
PR. 110, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000
```

RETURN



SUBROUTINE 3  
 F. NO NEUTRIANO  
 TRAT. N TP 0 TR

```

DPH=DPH*3.28
DENFF=DPH**R.3259
PRCF=DPH**OF
PRSH=.053*DENFF-DPH
PPRSD=.3725*DENFF*INJ**2/((OED**2+HHB**2+D*ID**4)
NPKK**2+CFX**2+D*CFX**3)**.5*CFX
U=17.16*INJ/((D*IT**2)
REVO=1.86*(D*IT/3.2)**.5*CFX**2/((3-CFX)*DENFF/((3*CFX**2)

```

REVO < 2000

SI  
 FLUJO  
 LAMINAR

NO  
 FLUJO  
 TURBULENTO

PRCF=16/REVO

PR=0.04

```

R=2/CFX**2.75
R3=1-CFX/3
FCR=1/((R3+.4343*LOG(REVO*F**2))-.4/CFX**1.23)**2

```

ABS(FC-F) < .001

SI  
 FACR=FC

NO  
 PRFC

```

PPRST=PRCF*DPH*DENFF**2/((D*.8*D*IT)
PRDE=PRSH-PRSH*PPRST+PPRSD
DPH=DPH/3.28
DENFF=DPH**R.3259
HFX=.0245*PRSH*INJ

```

RETURN

SUBRUTINA 4  
 P. NO DEFINIDO  
 TANTO EN.

```

DEFINIR 3, 20
DEFINIR DEF = 0, 2059
DEFINIR DEF
PRIN. 0245=PRUSHINJ
PRIN. 20=DEFINIR INJ 2, 10000=DEFINIR INJ
PRIN. 3001 = 10000=PRUSHINJ
PRIN. 10001 = 10000=DEFINIR INJ
PRIN. 10001 = 10000=DEFINIR INJ
PRIN. 10001 = 10000=DEFINIR INJ
  
```

SI REYU > 2000 NO

FLUJO  
 LAMINAR

FLUJO  
 TURBULENTO

PR = 156 REYU

PR = 004

```

PR = 004 REYU = PR * 156 = 63.36
PR = 004 REYU = PR * 156 = 63.36
  
```

SI  $100 < PR < 1000$  NO

PR = PR

PR = 0

```

PRIN. 10001 = 10000=DEFINIR INJ 2, 10000=DEFINIR INJ
PRIN. 10001 = 10000=DEFINIR INJ
PRIN. 10001 = 10000=DEFINIR INJ
PRIN. 10001 = 10000=DEFINIR INJ
PRIN. 10001 = 10000=DEFINIR INJ
  
```

RETURN

## CAPITULO 7

### ANALISIS DE RESULTADOS

Una forma de comprobar el buen funcionamiento de un programa y analizar como influyen cada uno de los parámetros que intervienen en la caída de presión por fricción al circular un fluido a través de un conducto es mediante la ejecución de varias corridas de los mismos.

El objetivo principal de este análisis consiste en variar los parámetros que conforman cada uno de los programas para poder determinar en que forma influyen en las pérdidas de presión por fricción.

#### CASO 1 FLUIDO NEWTONIANO TRATAMIENTO POR INTERIOR DE TUBERIA (I.P. e T.E.).

EJEMPLO: DATOS DEL POZO:

- 1) Profundidad al intervalo medio de disparos: 2000 m
- 2) Diámetro interno de la tubería: 2.875 pg
- 3) Número de disparos: 30
- 4) Diámetro del disparo: 0.4 pg
- 5) Gradiente de fractura: 0.6
- 6) Coeficiente de descarga: 0.5

7) Presión máxima en la superficie: 15000 lb/pg<sup>2</sup>

8) Gasto de inyección: 20 bl/min.

**DATOS DEL FLUIDO:**

1) Densidad del fluido fracturante: 0.96 gr/cc.

2) Viscosidad absoluta: 0.9 cp.

Determinar las pérdidas de presión por fricción y la máxima potencia hidráulica en la superficie bajo las siguientes condiciones:

a) Variando el diámetro interno de la tubería de 2.875 a 6 PG.

Los resultados son mostrados en la tabla (7-1), en esta tabla se observa que conforme aumenta el diámetro interno de la tubería, disminuyen las pérdidas de presión por fricción y por consiguiente disminuyen la presión y la potencia requerida en la superficie como se muestra en la gráfica (7.1).

b) Variando el gasto de inyección de 20 a 35 bl/min.

Los resultados son mostrados en la tabla (7-11), donde se observa que conforme aumenta el gasto, las caídas de presión por fricción también aumentan requiriendo así de una mayor presión en la superficie y por lo tanto de una mayor potencia como se aprecia en la gráfica (7.2).

TABLA (7-I)

Variación de la caída de presión por fricción  
con respecto al diámetro

Carga hidrost. (lb/pg <sup>2</sup> )	Fluido Newtoniano, tratamiento per T.P		P sup. (lb/pg <sup>2</sup> )	HP (HP)	Diam. int. (pg)
	Caída de presión				
	Monricard (lb/pg <sup>2</sup> )	Craft&Holden (lb/pg <sup>2</sup> )			
2726	3863	4849	6190	3033	2.875
2726	3150	3927	5269	2581	3.0
2726	1503	1832	3173	1555	3.5
2726	792	947	2289	1121	4.0
2726	450	530	1871	916	4.5
2726	271	315	1656	811	5.0
2726	172	197	1538	753	5.5
2726	113	128	1470	720	6.0

TABLA (7-II)

Variación de la caída de presión por fricción  
con respecto al gasto de inyección

Carga hidrost. (lb/pg <sup>2</sup> )	Fluido Newtoniano, tratamiento per T.P		P sup. (lb/pg <sup>2</sup> )	HP (HP)	Gasto iny. (bpm)
	Caída de presión				
	Monricard (lb/pg <sup>2</sup> )	Craft&Holden (lb/pg <sup>2</sup> )			
2726	3863	4849	6190	3033	20
2726	5773	7502	8918	5462	25
2726	8015	10737	12242	8999	30
2726	9002	12194	12741	10773	32
2726	9516	12957	14526	11744	33



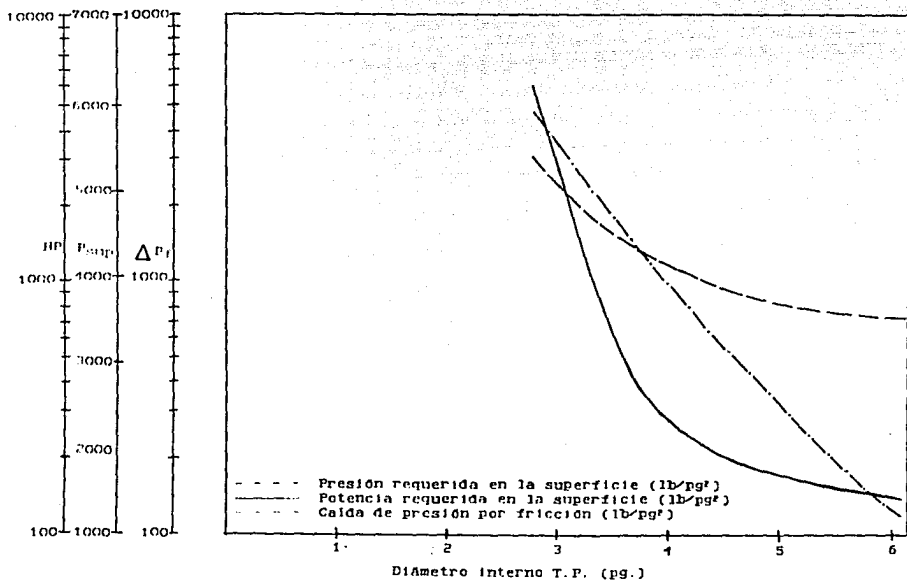


fig. 7.1 Variación de  $\Delta P_f$ ,  $P_{sup}$  y HP al fluir un fluido newtoniano a través de una tubería, variando el diámetro de la misma.

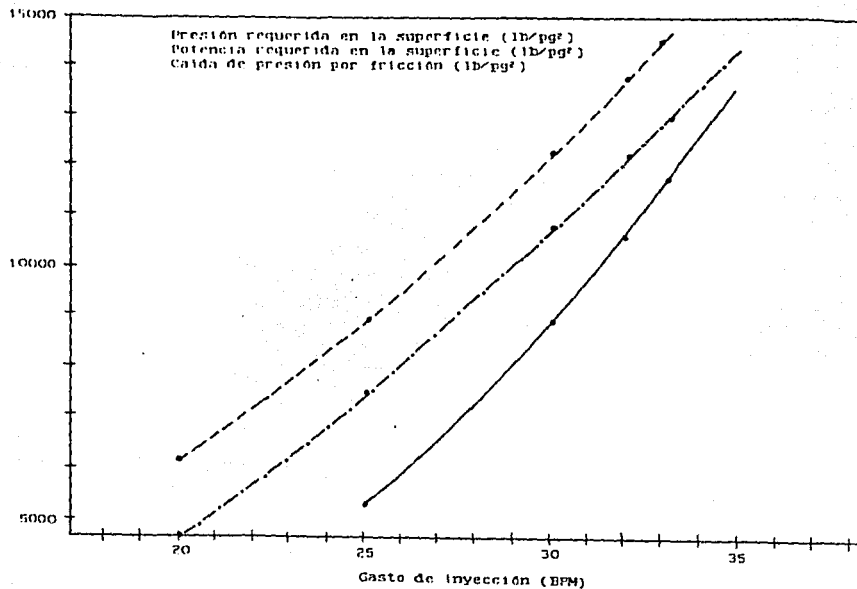


fig. 7.2 Variación de  $\Delta P_f$ ,  $P_{sup}$ , y  $HP$  al fluir un fluido newtoniano a través de una tubería, variando el gasto de inyección.

**CASO 2 FLUIDO NEWTONIANO. TRATAMIENTO POR ESPACIO ANULAR.****EJEMPLO.- DATOS DEL POZO:**

Los mismos del caso 1 pero adicionando:

- 1) Diámetro interno de la T.R: 6 pg
- 2) Diámetro externo de la T.P: 2.875 pg

**DATOS DEL FLUIDO:**

Los mismos del caso 1

Determinar las pérdidas de presión por fricción y la máxima potencia hidráulica en la superficie bajo las siguientes condiciones:

- a) Variando el diámetro externo de la T.P. de 2.875 a 5 pg.

Los resultados son mostrados en la tabla (7-III) donde se observa que al aumentar el diámetro externo de la tubería interna, se reduce el área neta de flujo, trayendo esto consigo un aumento en la caída de presión por fricción, que a su vez implica un aumento tanto en la presión necesaria en la superficie como en la potencia hidráulica requerida. Lo anterior se aprecia en la gráfica (7.3).

- b) Variando el gasto de inyección de 25 a 80 Dl/min.

Los resultados de este comportamiento son mostrados en la tabla (7-IV), donde al aumentar el gasto de inyección, aumenta la caída de presión por fricción, la presión en superficie y la potencia hidráulica requerida, ver grafica

TABLA (7-111)

Variación de la caída de presión por fricción  
con respecto al diámetro equivalente en E.A.

Fluido Newtoniano, tratamiento por E.A.

Carga hidrost. (lb/pg <sup>2</sup> )	Caída de presión		P sup. (lb/pg <sup>2</sup> )	HP (HP)	Diam. equiv. (pg)
	Monriscard (lb/pg <sup>2</sup> )	Craft&Holden (lb/pg <sup>2</sup> )			
2726	502	432	1773	869	2.55
2726	554	474	1816	890	2.45
2726	868	740	2082	1020	2.04
2726	1546	1312	2654	1300	1.63
2726	3356	2837	4177	2047	1.22
2766	10417	8768	10109	4953	0.82

TABLA (7-1V)

Variación de la caída de presión por fricción  
con respecto al gasto de inyección

Fluido Newtoniano, tratamiento por E.A.

Carga hidrost. (lb/pg <sup>2</sup> )	Caída de presión		P sup. (lb/pg <sup>2</sup> )	HP (HP)	Gasto iny. (bpm)
	Monriscard (lb/pg <sup>2</sup> )	Craft&Holden (lb/pg <sup>2</sup> )			
2726	751	659	2075	1271	25
2726	1042	935	2441	1794	30
2726	1375	1257	2870	2461	35
2726	1749	1626	3362	3295	40
2726	2162	2042	3918	4320	45
2726	2614	2504	4538	5559	50
2726	3629	3571	5967	8772	60
2726	4708	4825	7650	13120	70

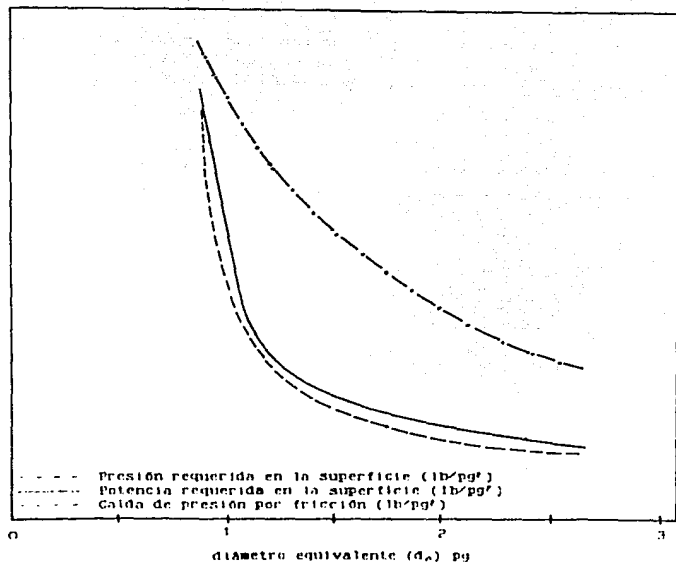
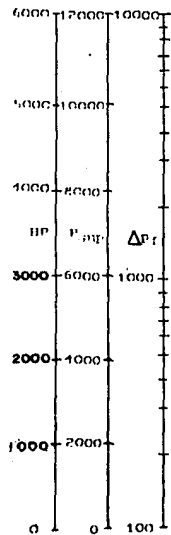


fig. 7.3 Variación de  $\Delta P_f$ ,  $P_{surf}$  y HP al fluir un fluido newtoniano a través del espacio anular variando el diámetro equivalente del mismo.



(7.4).

**CASO 3 FLUIDO NO NEWTONIANO, TRATAMIENTO POR EL INTERIOR DE LA TUBERIA.**

**DATOS DEL POZO:**

Los mismos de caso 1

**DATOS DEL FLUIDO:**

- 1) Densidad del fluido fracturante: 1.02 gr/cc.
- 2) Índice de consistencia: 0.2
- 3) Índice de comportamiento de flujo: 0.2 lbf.<sup>n</sup>/pie<sup>2</sup>

Determinar la caída de presión por fricción, la presión requerida en la superficie y la potencia hidráulica bajo las siguientes condiciones:

a) Variando el diámetro interno de la tubería de 2.875 a 3 PG.

Los resultados de este comportamiento vienen tabulados en la tabla (7-5) donde se observa un comportamiento semejante al presentado en el caso 1 inciso (a), pero a diferencia de este las caídas de presión se incrementarán conforme las características reológicas del fluido se alejen del comportamiento newtoniano, ver gráfica (7.5).

b) Variando el gasto de 10 a 30 bl/min.

En este caso también se observa un comportamiento similar

al caso 1 inciso (b), donde las características reológicas del fluido también tendrán una influencia directa en el incremento de las caídas de presión por fricción. Ver tabla (7-VI) y gráfica (7.6).



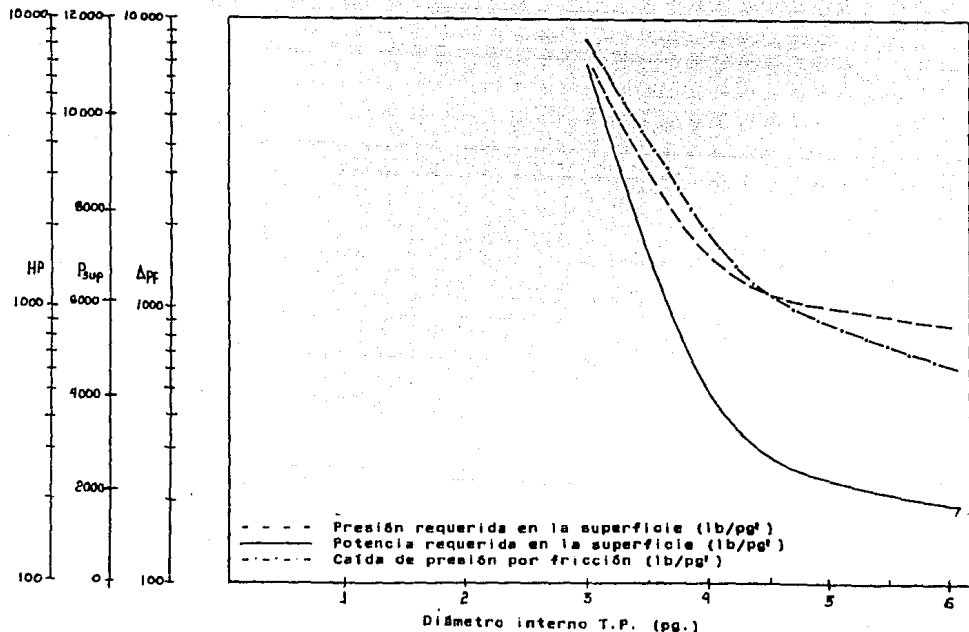


fig. 7.5 Variación de  $\Delta p_f$ ,  $P_{sup}$  y HP al fluir un fluido no newtoniano a través de una tubería, variando el diámetro de la misma.



## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del presente trabajo se puede concluir que el implementar el cálculo hidráulico de un fracturamiento a sistemas computarizados agiliza el análisis del mismo y además brinda la oportunidad de poder elegir varias alternativas de cálculo de acuerdo a los requerimientos y restricciones dadas por el usuario en un mínimo de tiempo.

Para que lo anteriormente dicho se lleve a cabo de una forma eficiente, el usuario debe tener bases teóricas sólidas sobre el problema a resolver, pero recalcando, como se dijo al principio de este trabajo que este no necesariamente debe tener conocimientos de computación para ejecutar estos programas, pues estos están diseñados para ser conversacionales, es decir que la computadora le indique al usuario:

- Alternativas de cálculo.
- Mensajes de error al mandar datos fuera de rango
- Mensaje de error al sobrepasar el cálculo la máxima presión
- Recurrir al manejo de bases de datos
- Cambio de menú
- Salida a impresión.

Por otra parte el usuario debe tener cuidado en recabar la mayor información precisa y confiable tanto de la reología de los posibles fluidos a emplear así como del estado mecánico del pozo para que los resultados sean confiables y estén dentro de rangos aceptables, lo cual implicará un una reducción de posibles errores, los cuales si son ignorados y el calculo es llevado a cabo en el campo puede llevar a una posible operación sin éxito, lo cual a su vez generará grandes pérdidas económicas para la empresa.

APENDICE (A) (10)  
ANALISIS DIMENSIONAL

Aunque diferentes sistemas de dimensiones son empleados, el sistema absoluto es el más común. Las dimensiones son definidas como los conceptos básicos empleados para la medición: longitud, tiempo, masa y temperatura. Algunas unidades en las cuales se expresan estas dimensiones son: lb o gr para la masa, pg o m para la longitud, hr o s para el tiempo y °C, °F, °K y °R para la temperatura.

En la solución para constantes de conversión que hacen una ecuación dimensionalmente correcta, se encontró que la constante tuvo unidades pero no dimensiones, por lo tanto, es posible tener un número adimensional el cual deba tener unidades para hacer una ecuación dimensionalmente correcta.

Ejemplo: La constante de conversión que hace que la ecuación de flujo lineal de Darcy sea correcta, es de 1.127, para las siguientes unidades:

$$\left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{pie}^3} \right] \left[ \frac{\text{atm}}{\text{lb/pg}^2} \right] \left[ \frac{\text{pie}}{\text{cm}} \right] \left[ \frac{\text{B/D}}{\text{cm}^3/\text{s}} \right]$$

Puede demostrarse que este número es adimensional de la

siguiente forma:

cm, pie = unidades de longitud = L  
 atm, lb/pg<sup>2</sup> = unidades de presión = F L<sup>-2</sup> = M L<sup>-1</sup> T<sup>-2</sup>  
 B/D, cm<sup>3</sup>/s = unidades de gasto = L<sup>3</sup> T<sup>-1</sup>

por lo tanto se tiene:

$$\left[ \frac{L^2}{L^2} \frac{M L^{-1} T^{-2}}{M L^{-1} T^{-2}} \frac{L}{L} \frac{L^3 T^{-1}}{L^3 T^{-1}} \right] = \frac{1}{1} = 1$$

Los dos sistemas más comúnmente empleados son el llamado absoluto (masa-longitud-tiempo) o (M L T), y el gravitacional (fuerza-longitud-tiempo) o (F L T), este último basado en la segunda ley de Newton.

La segunda ley de Newton establece que la fuerza es igual a la relación del cambio del momento con respecto al tiempo:

$$F = \left[ (K) \frac{d}{dt} (mv) \right] \dots \dots \dots (A-1)$$

$$F = K_v \frac{dm}{dt} + K_m \frac{dv}{dt} \dots \dots \dots (A-2)$$

para una masa constante:

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

$$F = Km \frac{dv}{dt}$$

ya que:  $\frac{dv}{dt} = \text{aceleración}$

entonces:

$$F = Km a$$

Actualmente esta es la forma más común de representar la segunda Ley de Newton. En el sistema absoluto, la fuerza se representa en Newtons, donde un Newton es la fuerza necesaria para dar a una masa de un kilogramo una aceleración de un metro por segundo por segundo. Las unidades de un Newton serán entonces:  $\text{kgm-m/s}^2$ .

Si  $K=1$  en unidades inglesas, entonces la fuerza tiene unidades de poundals ( $\text{lb pie/s}^2$ ).

Si se desea hacer  $F$  numéricamente igual a  $m$ , entonces se puede cambiar la constante  $K$  para que sea igual a  $1/g_c$ , donde

$$g_c = \frac{33.1740 \text{ lbm pie/s}^2}{\text{lbf}}$$

o bien: 
$$F = m \left[ \frac{g'}{g_c} \right]$$

o bien:

$$\text{lbm} \times g \frac{\text{pie}}{\text{s}} \times \frac{1}{g_c[(\text{pie})(\text{lbm})/(\text{s}^2)(\text{lbf})]} = 1 \text{ lbf}$$

La aceleración debida a la gravedad, es, en promedio de 32.2 pie/s<sup>2</sup>, y el máximo y el mínimo valor de g/g<sub>c</sub> es de 1.00006 y de 0.9982 respectivamente.

Desde un punto de vista práctico, la relación g/g<sub>c</sub> puede ser tomada como la unidad. Esto quiere decir que 1 lbf y 1 lbm tienen el mismo valor numérico al nivel del mar. Esto puede representar confusión cuando se piensa acerca del peso de un objeto, por ejemplo, un barril de 42 galones de agua fresca tiene un peso de 350 lbm al nivel del mar y ejerce una fuerza de 350 lbf. Si este barril de agua es llevado a una altitud donde g=15 pie/s<sup>2</sup>, entonces las lbm de agua aún serán de 350, pero esta masa ejercerá una fuerza de (350)/(15/32.2) = 163 lbf o bien el agua pesará 163 lb.

Puede mencionarse también como ejemplo el caso de un satélite el cual tiene un peso de 1000 lbf y una masa de 1000 lbm al nivel del mar. Si este satélite es puesto en órbita a



100 millas de la tierra, entonces su peso será menor a 1000 lbf pero su masa será aún de 1000 lbm.

En el sistema MKS o Sistema Internacional absoluto, los siguientes símbolos y unidades son aplicados:

SÍMBOLO	CANTIDAD	UNIDADES
L	LONGITUD	m
M	MASA	kg-m
F	FUERZA	N
T	TIEMPO	s
θ	TEMPERATURA	°C

El sistema ingles es el siguiente:

SÍMBOLO	CANTIDAD	UNIDADES
L	LONGITUD	pie
M	MASA	lbm
F	FUERZA	Poundals
T	TIEMPO	s
θ	TEMPERATURA	°F

Debido a que la selección de unidades fundamentales puede ser más o menos arbitraria, se discutirán los sistemas absoluto y gravitacional.

La relación entre el sistema absoluto y gravitacional es la segunda ley de Newton:

$$F = m a$$

O bien, empleando notación dimensional:

$$F = M L T^{-2} \quad \text{o bien:} \quad M = F T^2 L^{-1}$$

Entonces, a partir de  $F$   $M$   $L$  y  $T$  es fácil quitar y/o derivar otras unidades:

EJEMPLOS:

1- La velocidad es generalmente medida en unidades de pie/s o m/s:

$$\text{VELOCIDAD} = \frac{\text{LONGITUD}}{\text{TIEMPO}} = \frac{L}{T} = L T^{-1}$$

2- La aceleración es generalmente medida en pies/s<sup>2</sup> o en m/s<sup>2</sup>:

$$\text{ACELERACION} = \frac{\text{LONGITUD}}{\text{TIEMPO}^2} = \frac{L}{T^2} = L T^{-2}$$

3- La densidad es generalmente medida en lbf/gal o en kg/m<sup>3</sup>

$$\text{DENSIDAD} = \frac{\text{MASA}}{\text{LONGITUD}^3} = \frac{\text{M}}{\text{L}^3} = \text{M L}^{-3}$$

1- La viscosidad absoluta es expresada generalmente en centipoise o en Pa.s. La viscosidad es un esfuerzo dividido entre un ritmo de corte, o bien:

$$\mu = \frac{F/A}{(dv/dr)}$$

Trabajando en el sistema absoluto (M L T):

$$F = \text{M L T}^{-2}$$

$$A = \text{L}^2$$

$$v = \text{L T}^{-1}$$

$$r = \text{L}$$

$$\mu = \{ \text{M L T}^{-2} / [ \text{L}^2 / ( \text{L T}^{-1} / \text{L} ) ] \} = \text{M L}^{-1} \text{T}^{-1}$$

Cualquier otra unidad dimensional puede ser obtenida de esta forma. Una tabla completa de magnitudes dimensionales se muestra en la tabla (A-1).

TABLA (A-1) DIMENSIONES DE CANTIDADES

NOMERE	M L T	F L T
LONGITUD	L	L
TIEMPO	T	T
MASA	M	F L <sup>-1</sup> T <sup>2</sup>
FUERZA	M L T <sup>-2</sup>	F
TEMPERATURA	Q	Q
PESO ESPECIFICO	M L <sup>-2</sup> T <sup>-2</sup>	F L <sup>-3</sup>
DENSIDAD	M L <sup>-3</sup>	F L <sup>-4</sup> T <sup>2</sup>
ANGULO	-	-
PRESION Y ESFUERZO	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	F L <sup>-2</sup>
VELOCIDAD	L T <sup>-1</sup>	L T <sup>-1</sup>
ACELERACION	L T <sup>-2</sup>	L T <sup>-2</sup>
VELOCIDAD ANGULAR	T <sup>-1</sup>	T <sup>-1</sup>
ACELERACION ANGULAR	T <sup>-2</sup>	T <sup>-2</sup>
ENERGIA, TRABAJO	M L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>	F L
MOMENTUM	M L T <sup>-1</sup>	F T
POTENCIA	M L <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>	F L T <sup>-1</sup>
MOMENTO DE UNA FUERZA	M L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>	F L
COEF. DINAMICO DE VISCOSIDAD	M L <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>	F L <sup>-2</sup> T
COEF. CINEMATICO DE VISCOSIDAD	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>
MOMENTO DE INERCIA DE UNA AREA	L <sup>4</sup>	L <sup>4</sup>
MOMENTO DE INERCIA DE UNA MASA	M L <sup>2</sup>	F L T <sup>2</sup>
TENSION SUPERFICIAL	M T <sup>-2</sup>	F L <sup>-1</sup>
MODULO DE ELASTICIDAD	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	F L <sup>-2</sup>
RELACION DE POISSON	-	-

El análisis dimensional, es un método matemático empleado en:

- Cambio de unidades.
- Verificación de ecuaciones.
- Determinación de grupos dimensionales, es decir, determinación de un arreglo conveniente de variables tales como obtención de números dimensionales.
- Planeación sistemática de experimentos.

Una de las aplicaciones más importantes del análisis dimensional consiste en verificar si ciertos grupos numéricos son dimensionales.

Si una correlación es basada en números dimensionales, es, generalmente considerada más válida que otra que no se apoye en este método.

EJEMPLO: Demostrar que el número de Reynolds es dimensional.

$$N_r = \frac{d v \rho}{\mu}$$

donde:

- d : diámetro interno en cm o pg           = L
- v : velocidad en cm/s o pie/s           = L T<sup>-1</sup>
- ρ : densidad en gr/cm<sup>3</sup> o lb/gal       = M L<sup>-3</sup>
- μ : viscosidad en poise o lbm/pie.s = M L<sup>-1</sup> T<sup>-1</sup>

Sustituyendo:

$$Nr = \frac{(L)(L T^{-1})(M L^{-3})}{M L^{-1} T^{-1}} = 1$$

APENDICE (B) (2)LEYES BASICAS DEL FLUJO DE FLUIDOS

A partir de una selección restringida de notación simbólica y de expresiones matemáticas se pueden representar fórmulas 'básicas' que describen el flujo de fluidos.

Antes de incluir esta clasificación, se debe tener énfasis en la aplicación de las tres leyes físicas siguientes:

- 1- Conservación de masa o materia.
- 2- Conservación de la energía.
- 3- Conservación del momentum o segunda ley de Newton.

Estas tres leyes son básicas para solucionar todos los problemas de flujo en tuberías. La tercera ley es particularmente empleada en la estimación de la reacción de fuerzas en la estructura de la tubería y en el análisis de transferencia del momento en equipos tales como turbinas, ventiladores y bombas centrífugas.

BALANCE DE MATERIA - El flujo en tuberías es en general un proceso en estado estable en el cual la velocidad de flujo, la temperatura y la presión a cualquier punto a lo largo del flujo no cambia con respecto al tiempo. Bajo estas condiciones, la relación de masa de flujo que pasa en cualquier sección transversal de la tubería es constante. En

ausencia de acumulaciones o pérdidas, la ley de conservación de la masa requiere que la masa de fluido que entre en un extremo de la tubería por unidad de tiempo sea igual a la masa de fluido que sale por el otro extremo de la misma.

El gasto es generalmente dado en una de las tres formas equivalentes que a continuación se mencionan:

- Relación de masa de flujo, ( $w$ )
- Relación o ritmo de flujo de un volumen ( $q$ ), o bien:
- Velocidad promedio ( $v$ ) definida como ( $q/A$ ), donde ( $A$ ) es el área de sección transversal de la tubería.

Empleando los subíndices 1 y 2 para denotar condiciones de corriente arriba ( $A_1$ ) y de corriente abajo ( $A_2$ ) respectivamente, una ecuación de continuidad o de balance de materia puede ser escrita en unidades consistentes como sigue:

$$\begin{aligned} w_1 &= w_2 \\ \rho_1 q_1 &= \rho_2 q_2 \\ \rho_1 A_1 v_1 &= \rho_2 A_2 v_2 \quad \dots\dots(B-1) \end{aligned}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido a la presión y temperatura prevalecientes en cualquier punto de la sección



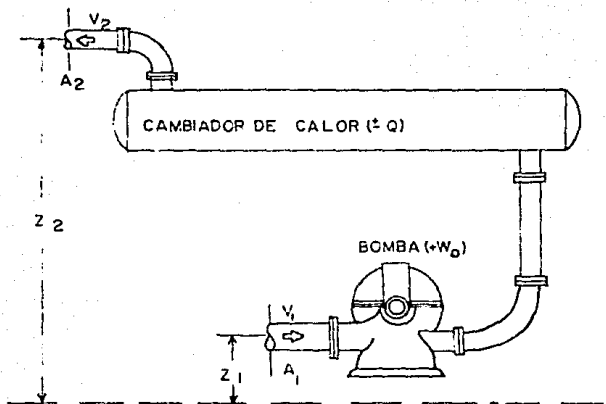
transversal por donde fluye el fluido. Mediante el empleo de la transformación  $(g/g_c)m=w$  o bien,  $(g/g_c)\rho=\rho'$  vista en el apéndice (A), las ecuaciones anteriores pueden ser reescritas en términos del peso constante del gasto.

BALANCE TOTAL DE ENERGIA - Para flujo estable a través de tuberías, la segunda ley de conservación define que, en ausencia de acumulación o pérdida de energía a lo largo de una tubería, la energía total que entra por unidad de tiempo es igual a la energía total que sale.

Una ecuación de balance de energía puede ser expresada para el flujo de un fluido en un sistema como el mostrado en la figura (B-1), después de hacer un recuento de toda la energía transferida de o al sistema. En el intervalo de tiempo  $(t)$  requerido para introducir una unidad de masa de fluido en la sección  $A_1$ , la siguiente energía es acarreada dentro del sistema por el fluido:

$u_1$                       Energía interna o intrínseca, función del estado termodinámico del fluido mientras éste pasa por la sección  $A_1$ .

$(g/g_c)Z_1$                 Energía de posición o energía potencial, donde  $Z_1$  es la elevación del flujo arriba de algún plano de referencia,  $g$  es la aceleración provocada por la gravedad y  $g_c$  es una constante



FIG(B-1) Sistema general de flujo

de conversión.

$(v_1^2/2g_c)$  Energía de movimiento o energía cinética de una unidad de masa de fluido que se mueve a una velocidad  $v_1$ .

En este mismo intervalo de tiempo ( $t$ ), una unidad de masa de fluido abandona el sistema en  $A_2$  y acarrea energía hacia fuera en la misma forma, pero quizá con diferente cantidad en comparación con la que entró en  $A_1$ .

Fuentes externas al sistema son las responsables de transferir energía adicional, y son:

$p_1V_1$  = Trabajo o energía mecánica proporcionada al fluido en fuerza por unidad de masa en el sistema a  $A_1$  contra la presión prevaeciente en el sistema  $p_1$ .

$p_2V_2$  = Trabajo o energía mecánica proporcionada por el sistema a  $A_2$  contra la presión prevaeciente en  $p_2$ .

$Q$  = Calor neto, energía absorbida por el sistema de fuentes externas durante el intervalo de tiempo ( $t$ ), para una pérdida neta de calor,  $Q$  es una cantidad negativa.

$W_0$  = Trabajo neto o energía impartida al sistema de fuentes mecánicas externas tales como bombas o compresoras en el intervalo de tiempo ( $t$ ).

Un balance de energía sobre el intervalo de tiempo ( $t$ ) esta

dado por la ecuación:

ENERGIA QUE ENTRA : ENERGIA QUE SALE

$$u_1 \cdot (g/g_c) Z_1 + (v_1^2 / 2g_c) \cdot P_1 V_1 + Q \cdot W_c = u_2 \cdot (g/g_c) Z_2 + (v_2^2 / 2g_c) \cdot P_2 V_2$$

O bien, en términos de diferencias finitas, donde  $\Delta$  se refiere a una cantidad a la salida de una sección menos la misma cantidad a la entrada de la sección:

$$\Delta u + (g/g_c) \Delta Z + (1/2g_c) \Delta v^2 + \Delta(PV) = Q + W_c \dots \dots (B-2)$$

Todos los términos cuando son expresados en unidades consistentes, tienen las dimensiones comunes de energía por unidad de masa

Nótese que el término de fricción no aparece en la ecuación (B-2). La fricción es la responsable sólo de la conversión de parte de la energía mecánica en energía calorífica y no cambia toda la energía contenida en un sistema de flujo.

Cuando la función de entalpia  $h = u + PV$  es sustituida dentro de la ecuación (B-2) resulta:

$$\Delta h + (g/g_c) \Delta Z + (1/2g_c) \Delta v^2 = Q + W_c \dots \dots (B-3)$$

La cual se reconocerá como la primera ley de la termodinámica aplicada a procesos de flujo estables, esta última ecuación es particularmente empleada para el análisis

de sistemas de flujo, los cuales involucran cualquier transferencia de calor o proceso adiabático ( $Q=0$ ) y fluidos cuyas propiedades termodinámicas hayan sido previamente tabuladas.

BALANCE DE ENERGIA MECANICA - Cuando una unidad de masa de fluido entra al sistema mostrado en la figura (B-1) la energía mecánica neta  $E_m$  impartida al sistema de fuentes externas es:

$$E_m = P_1 V_1 + W_0 - P_2 V_2$$

Inversamente, la energía mecánica  $E_m'$  empleada para incrementar el potencial y/o la energía cinética del fluido o posibilidad de comprimir el fluido mientras pasa a través de un sistema está dado por:

$$E_m = \frac{g}{g_c} (Z_2 - Z_1) + \frac{1}{2 g_c} (v_2^2 - v_1^2) - \int_1^2 p \, dV$$

Donde, la expresión bajo la integral representa el trabajo mecánico requerido para comprimir el volumen de una unidad de masa de un valor inicial  $V_1$  a un valor menor  $V_2$ .

Para que la energía mecánica se conserve, es necesario que las cantidades  $E_m$  y  $E_m'$  sean idénticas. Pero, debido a efectos de fricción en el flujo, una parte de la energía

mecánica que entra siempre será disipada en forma de energía calorífica, como consecuencia.  $E_m$  y  $E_m'$  nunca serán iguales. Sin embargo un balance de energía mecánica para un sistema puede ser escrito de la siguiente forma:

$$P_1 V_1 + W_o - P_2 V_2 = \frac{g}{g_c} \Delta Z + \frac{1}{2g_c} \Delta v^2 - \int_1^2 p dV + F \dots (B-4)$$

Donde el término  $F$  representa la "pérdida de trabajo" o energía mecánica disipada por procesos irreversibles durante el flujo del fluido.

El término de energía  $(P_2 V_2 - P_1 V_1)$  o  $\Delta pV$  es una diferencial completa equivalente a:

$$\int_1^2 d(pV) = \int_1^2 p dV + \int_1^2 v dp$$

La cual al sustituirse en la ecuación (B-4) genera una expresión más compacta:

$$\int_1^2 v dp + \frac{g}{g_c} \Delta Z + \frac{1}{2g_c} \Delta v^2 = W_o - F \dots \dots \dots (B-5)$$

En esta forma final, el balance de energía mecánica es reconocida como la ecuación de Bernoulli, la cual incluye pérdidas por fricción, la ecuación (B-5) es una expresión

completamente general y puede ser aplicada a cualquier sistema de flujo sin importar si hay o no transferencia de calor.

Asimismo la ecuación (E-5) aparece independiente de  $Q$  a diferencia de la ecuación (E-2), un balance total de energía, mostrará que la transferencia de calor influye en el término de pérdidas por fricción como sigue:

$$F = \Delta u + \int_1^2 p dv - Q$$

La cual muestra que este incremento en energía interna,  $u$ , no contribuye al trabajo reversible de compresión.

$$- \left[ - \int_1^2 p dv \right]$$

La cual no contribuye a la absorción de energía calorífica de una fuente externa.  $-Q$  viene a ser una porción de la energía mecánica que entra,  $F$ . Las dimensiones de cada uno de los términos de energía en las ecuaciones (E-4) y (E-5) están dados en energía por unidad de masa de fluido fluyendo.

Un balance de energía mecánica es empleado especialmente cuando el fluido es considerado como incompresible, como lo son la mayoría de los líquidos, el volumen específico es esencialmente constante y la ecuación (E-5) se reduce a:

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{g}{g_c} \Delta z + \frac{\Delta v^2}{2 g_c} = w_d - F \quad \dots \quad (B-6)$$

Para fluidos compresibles, tales como gases, la evaluación de la integral

$$\int_1^2 v \, dr$$

puede dificultarse, a menos que se conozca la fase exacta de compresión o de expansión.

BALANCE DE PRESION: Para el flujo de fluidos incompresibles, la ecuación (B-6) puede simplificarse para obtener la ecuación de balance de presión. Multiplicando todos los términos por  $\rho$ , los cuales se suponen constantes, se obtiene:

$$\Delta p + \frac{\rho}{g_c} p \Delta z + \frac{\rho \Delta v^2}{2 g_c} = \rho w_d - \rho F$$

Donde todos los términos tienen ahora las dimensiones de energía por unidad de volumen o bien,  $F/L^3$ , las cuales cuando son expresadas por ejemplo en unidades consistentes del sistema inglés, son  $lbf/ft^3$  o unidades de presión. Expandiendo y reorganizando términos, esta última expresión es:



$$P_1 + \frac{\rho}{g_c} (Z_1 - Z_2) + \frac{\rho}{2g_c} (v_1^2 - v_2^2) + \rho W_o - \rho F = P_2 \dots (B-7)$$

La cual identifica mejor las fuentes de cambio de presión a lo largo del flujo. Esta ecuación puede ser simplificada de la siguiente forma:

$$P_1 + \Delta P_s + \Delta P_v + \Delta P_p - \Delta P_f = P_2 \dots (B-8)$$

donde:

$\Delta P_s = (\rho/g_c) \rho (Z_1 - Z_2)$ , es el incremento en la presión hidrostática la cual es acompañada con una pérdida en la elevación.

$\Delta P_v = (\rho/2g_c) (v_1^2 - v_2^2)$ , es el incremento en la presión, la cual es acompañada con una pérdida en la velocidad.

$\Delta P_p = \rho W_o$ , es el incremento de presión a través de una bomba en la dirección del flujo.

$\Delta P_f = \rho F$ , es la pérdida de presión ocasionada por todos los procesos de fricción o irreversibles a lo largo del flujo.

APENDICE (C)FLUJO EN ESPACIO ANULAR

Las ecuaciones que describen el flujo en tuberías se generalizarán al aplicarse a otras formas de ductos tales como el espacio anular de dos tuberías concéntricas o bien de placas paralelas tal y como se muestra en la figura (C.1), en tales casos, el diámetro de la tubería ( $d$ ) se reemplaza por un diámetro equivalente ( $d_e$ ) definido como cuatro veces el radio hidráulico del conducto denotado por ( $R$ ), donde:

$$R = \frac{\text{Área de sección transversal de flujo}}{\text{perímetro mojado}}$$

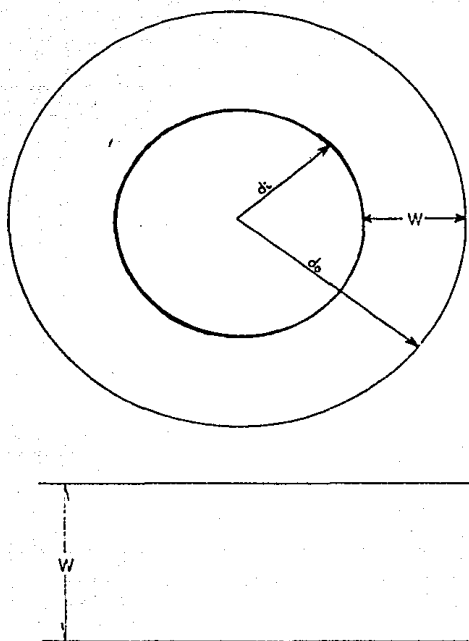
Por ejemplo, un conducto rectangular, con lados  $a$  y  $b$  tiene un diámetro equivalente:

$$d_e = 4R = 4 \left[ \frac{ab}{2(a+b)} \right] = \frac{2ab}{(a+b)}$$

Para el espacio anular de dos tuberías concéntricas:

$$d_e = 4 \left[ \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)/4}{\pi(d_o + d_i)} \right] = d_o - d_i$$

Y para el caso particular de una tubería circular:



FIG(C-1) Flujo a través del espacio anular de dos tuberías concéntricas y a través de dos placas paralelas

$$d_e = 4 \left[ \frac{\pi d^2 / 4}{\pi d} \right] = d_o - d_i$$

Por otra parte, Crittendon desarrolló una relación semiempírica que determina el diámetro equivalente el cual duplicará las características de flujo en espacio anular, cuyo empleo se restringe exclusivamente al régimen de flujo turbulento:

$$\frac{d_e}{d_o} = \frac{1}{2} \left[ C_L^{0.25} \cdot (1-\alpha^2)^{0.5} \right]$$

Donde  $C_L$  se conoce como coeficiente de Lamb y se define como:

$$C_L = \left\{ (1-\alpha^2) \left[ (1+\alpha^2) - \frac{(1-\alpha^2)}{\ln 1/\alpha} \right] \right\}$$

Y  $\alpha$  es el parámetro adimensional de geometría anular, definido como:

$$\alpha = d_i / d_o$$

Donde:

$d_o$  = Diámetro interno de la tubería externa.

$d_i$  = Diámetro externo de la tubería interna.

**APENDICE (D)**  
**DIFFERENCIA ENTRE VISCOSIDADES**

**VISCOSIDAD ABSOLUTA.** - Es propiedad exclusiva de los fluidos newtonianos y se caracteriza por tener una relación lineal entre el esfuerzo de corte aplicado y el ritmo de corte resultante, gobernado por la siguiente ecuación:

$$\tau = \mu/g_C (-dv_r/dr)$$

donde:

$\tau$  = esfuerzo de corte

$\mu$  = viscosidad absoluta

$g_C$  = constante de conversión

$(-dv_r/dr)$  = ritmo de corte

**VISCOSIDAD PLÁSTICA ( $\mu_p$ ).** - Se presenta en los fluidos plásticos de Bingham, su relación esfuerzo de corte-ritmo de corte varía en forma lineal, pero a diferencia de los fluidos newtonianos, su ordenada al origen presenta un valor conocido punto de cedencia, que es el esfuerzo mínimo aplicado para que este tipo de fluidos fluyan, la ecuación que determina este comportamiento es:

$$(\tau - \tau_y) = \mu_p/g_C (-dv_r/dr) \quad ; \quad \tau > \tau_y$$

**VISCOSIDAD APARENTE O EQUIVALENTE ( $\mu_e$ ).** - Se presenta cuando la relación esfuerzo de corte-ritmo de corte no es lineal, es decir, la viscosidad variará al esfuerzo de corte aplicado como sucede con los fluidos pseudoplásticos y dilatantes estabilizándose generalmente a altos ritmos de corte, o bien variará con el tiempo de corte tal y como ocurre con los fluidos tixotrópicos y reopécticos.

Una forma matemática de determinar el comportamiento de estos fluidos (pseudoplásticos y dilatantes) es mediante la ley de potencias:

$$\tau = \mu_e / g_c (-dv_r/d_r)^n$$

APENDICE (E) (3)ADELGAZAMIENTO AL CORTE

Se conoce como adelgazamiento al corte al efecto en el cual la viscosidad aparente de los fluidos no newtonianos (con comportamiento de plásticos de Bingham y de la ley de potencias) decrece al incrementar el ritmo de corte en flujo laminar.

Del apéndice (D) la viscosidad aparente se definió como:

$$\mu_a = \frac{g_c \tau}{(-dv_r/dr)}$$

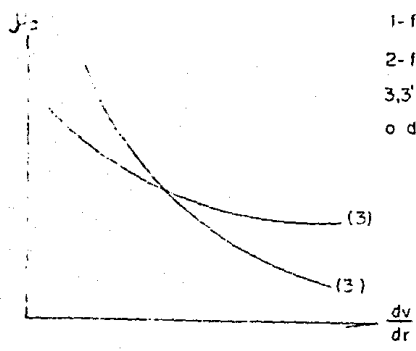
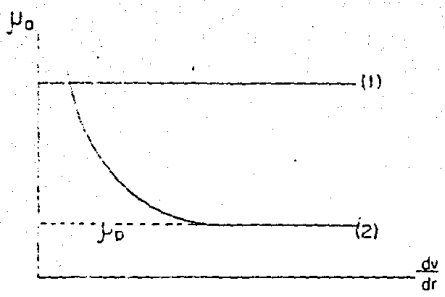
Para fluidos newtonianos,  $\mu_a = \mu = \text{constante}$

Para plásticos de Bingham,  $\mu_a = \frac{\tau_0}{dv/dr} + \mu_p$

es decir,  $\mu_a$  decrece al aumentar  $dv/dr$

Para fluidos de la ley de potencias,  $\mu_a = k \left[ \frac{dv}{dr} \right]^{n-1} = \frac{k}{\left[ \frac{dv}{dr} \right]^{1-n}}$

Es decir,  $\mu_a$  decrece al incrementarse  $dv/dr$ , para  $n < 1$



- 1- fluido newtoniano
- 2- fluido plástico de Bingham
- 3,3' - fluidos pseudoplásticos o de la ley de potencias;  $n < 1$

FIGURE 1. Adelgazamiento al corte



La gráfica presentada en la fig.(E.1) representa las variaciones de la viscosidad aparente con respecto a  $dv/dr$ .

En caso de fluidos pseudoplásticos ( $n < 1$ ), la variación de  $\mu_a$  con el ritmo de corte es mayor a menores valores de  $n$ .

## APENDICE (F)

### CALCULO DEL FACTOR DE FRICCION

El cálculo del factor de fricción Fanning es de vital importancia para estimar las caídas de presión en un sistema de flujo.

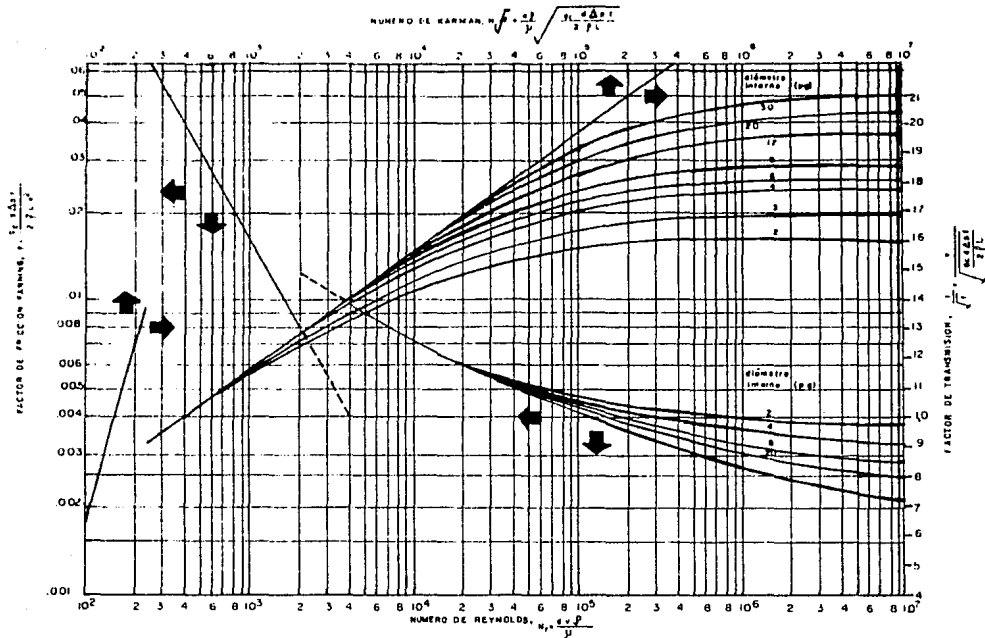
Este factor se puede determinar a partir de una gráfica como la mostrada en la figura (F-1), a partir de las ecuaciones presentadas en los capítulos 4 y 5 de esta tesis, o bien a partir de las ecuaciones explícitas presentadas en la tabla (F-2) de este apéndice.

Básicamente, la figura (F-1) es una gráfica doble logarítmica que presenta una familia de curvas, publicada por Moody<sup>(2)</sup> en 1944 para determinar el factor de fricción ( $f$ ) en función del número de Reynolds ( $Nr$ ) y de la rugosidad relativa de la tubería ( $e/d$ ).

Esta gráfica fue construida empleando la ecuación de Colebrook y White:

$$\frac{1}{f^2} = -4 \log \left[ \frac{e/d}{3.7065} + \frac{1.2613}{Nr f} \right]$$

Debido al trabajo de Moody<sup>(13)</sup> y a la demostración de aplicabilidad de la ecuación de Colebrook y White sobre un amplio rango de número de Reynolds y de valores de rugosidad



FIG(I)-1) DIAGRAMA DE MOODY PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE FRICCION FANNING

relativa, esta ecuación ha sido aceptada así como estandarizada para el cálculo preciso del factor de fricción.

La familia inferior de curvas relaciona tuberías lisas rectas (por ejemplo: cobre, vidrio, etc.) de diversos diámetros.

Empleando la familia superior de curvas de la figura (F-1), se puede calcular la velocidad promedio de flujo (gasto) para una  $\Delta p_f$  dada. Esta familia incorpora la dependencia funcional de  $f$  en  $Nr$  en una gráfica semilogarítmica de dos parámetros adimensionales, el factor de transmisión  $1/\sqrt{f}$  y el número de Karman  $Nr/\sqrt{f}$ . El procedimiento de cálculo, es el siguiente: con el valor obtenido de  $\Delta p_f$ , calcular  $1/\sqrt{f}$  de la figura (F-1), sustituir en la ecuación  $1/\sqrt{f}$  y despejar ( $v$ ) de ésta.

En la región laminar donde  $Nr < 2000$  el factor de fricción no es afectado por la rugosidad de la tubería como consecuencia, la correlación número de Reynolds-factor de fricción es una simple recta, cuya ecuación es  $16/Nr$

Para  $Nr$  en un rango de 2000 a 4000, las curvas (mostradas con línea discontinua) se traslapan. En esta región crítica el flujo es inestable y puede fluctuar entre laminar y

turbulento, dependiendo de los disturbios locales en el sistema de flujo. Sin embargo, es una práctica usual suponer flujo turbulento a valores de  $Nr > 2000$ .

En la región de turbulencia estable, es decir, a  $Nr > 4000$ ; la rugosidad relativa comienza a tener un efecto notable en el factor de fricción, especialmente a altos  $Nr$ .

Sin embargo, la solución de  $f$  requiere un procedimiento iterativo debido a que esta ecuación es presentada en forma implícita y no se puede reorganizar para obtener  $f$  en forma directa.

El número de iteraciones requeridas es en algunos casos muy alta. Con el método de Newton Raphson, por ejemplo, requiere menos de 7 iteraciones para llegar a una convergencia de 0.01%. Sin embargo esto puede llegar a ser significativo en el tiempo de ejecución requerido para el cálculo simulado de un sistema de flujo dado, en el cual será necesario evaluar el factor de fricción cientos o quizá miles de veces.

Lo anterior ha motivado el desarrollo de ecuaciones explícitas<sup>(12)</sup>, las cuales se aproximan en forma razonable a la de Colebrook y White.

En este apéndice se presentan una serie de resultados<sup>(12)</sup>

(tablas (F-3) y (F-4)) obtenidos al estudiar las ecuaciones de la tabla (F-2), los cuales son aplicados para establecer la máxima diferencia absoluta entre los factores de fricción predichos a partir de una ecuación dada y de la ecuación de Colebrook y White ( $f_{C-W}$ ).

Además de estos resultados, se presentan dos comparaciones basándose en la ecuación de Colebrook y White:

El primero de estos, designado como (c-w)<sup>+</sup>, presenta los resultados obtenidos a partir de la ecuación de Colebrook y White con los números de Reynolds indicados, pero con 1.2 veces la rugosidad relativa de la tubería. El segundo, designado como (c-w)<sup>-</sup>, es también para Colebrook y White con los  $N_r$  indicados pero para 0.8 veces la rugosidad relativa indicada.

Por lo tanto, estos valores son indicativos de los resultados que se pueden obtener empleando la ecuación de Colebrook y White cuando esta en un rango de  $\pm 20\%$  de rugosidad relativa.

En este estudio se empleó el método de Newton Raphson suponiendo que se ha llegado a la convergencia, cuando los factores de fricción calculados en iteraciones sucesivas, difieren en un valor menor a 0.01%. Además en todos los

casos, los factores de fricción fueron evaluados en un rango de Nr de  $4 \times 10^3$  a  $10^8$ , y rugosidades relativas en un rango de  $10^{-8}$  a  $5 \times 10^{-2}$

Debe destacarse que el factor de fricción en todas estas ecuaciones es consistente con la ecuación de Fanning:

$$\Delta P_f = \frac{2 f \rho v^2 L}{g_c d} \dots\dots\dots(4.2.2)$$

Se debe tener cuidado en el manejo del factor de fricción, pues curvas similares a las de la figura (F-1), son presentadas en la literatura técnica, en la cual, el símbolo  $f$  representa un factor, el cual es cuatro veces mayor que el factor de fricción Fanning definido en la ecuación (4.2.2).

Para evitar confusiones, el factor de fricción Fanning puede ser fácilmente identificado a partir de la verificación de dos puntos:

$$f = 0.016 \quad \text{a} \quad \text{Nr} = 1000$$

$$f = 0.012 \quad \text{a} \quad \text{Nr} = 3000$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, la ecuación que más se aproxima a la de Colebrook y White sobre un amplio rango de valores examinados es la ecuación de Chen (1979) (tabla F-2), pues su máxima desviación absoluta es menor al 0.4% además que es una de las ecuaciones más sencillas, lo cual

facilita su empleo.

Por lo tanto se sugiere que para obtener un cálculo rápido y exacto del factor de fricción, primero se obtenga  $f$  a partir de la ecuación de Chen, sustituir este resultado en la ecuación de Colebrook y White y mediante un proceso iterativo (por ejemplo el de Newton Raphson) obtener el  $f$  exacto sin necesidad de recurrir a la gráfica (F-1).



TABLA (F-2)  
 ECUACIONES EXPLICITAS PARA EL CALCULO  
 DEL FACTOR DE FRICCION  
 A TRAVES DE TUBERIAS RUGOSAS

Moody (1947)

$$f = 1.375 \times 10^{-3} \left[ 1 + \left[ 2 \times 10^4 \frac{e}{d} + \frac{10^6}{N_r} \right]^{1/3} \right] \dots \dots \dots (1)$$

Wood (1966)

$$f = 0.094 \left[ \frac{e}{d} \right]^{0.225} + 0.53 \left[ \frac{e}{d} \right] + 88 \left[ \frac{e}{d} \right]^{0.4} N_r^{-A_1} \dots \dots (2)$$

donde:

$$A_1 = 1.62 \left[ \frac{e}{d} \right]^{0.134}$$

Swamee and Jain (1976)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[ \left[ \frac{6.97}{N_r} \right]^{0.9} + \frac{e/d}{3.7} \right] \dots \dots \dots (3)$$

Jain (1976)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.28 - 4 \log \left[ \frac{c}{d} + \left[ \frac{29.843}{Nr} \right]^{0.9} \right] \dots \dots \dots (4)$$

Churchill (1977)

$$f = 2 \left[ \left[ \frac{8}{Nr} \right]^{12} + \frac{1}{(A_2 + A_3)^{3/2}} \right]^{1/12} \dots \dots \dots (5)$$

donde:

$$A_2 = \left[ 2.457 \ln \left[ \left[ \frac{7}{Nr} \right]^{0.9}, 0.27 \frac{c}{d} \right] \right]^{16}$$

$$A_3 = \left[ \frac{37580}{Nr} \right]^{16}$$

Chen (1979)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[ \frac{c/d}{3.7065} - \frac{5.0452}{Nr} \log A_4 \right] \dots \dots \dots (6)$$

donde:

$$A_4 = \frac{(c/d)^{1.1098}}{2.8257} \cdot \left[ \frac{7.149}{Nr} \right]^{0.8981}$$

Zigrang y Sylvester (1982) (ecuación 11)

$$\frac{1}{\sqrt{x}} = -4 \log \left[ \frac{C/d}{3.7} - \frac{5.02}{Nr} \log A_5 \right] \dots\dots\dots(7)$$

donde:

$$A_5 = \frac{C/d}{3.7} + \frac{13}{Nr}$$

Zigrang y Sylvester (1982) (ecuación 12)

$$\frac{1}{\sqrt{x}} = -4 \log \left[ \frac{C/d}{3.7} - 5.02 \log A_6 \right] \dots\dots\dots(8)$$

donde:

$$A_6 = \frac{C/d}{3.7} - \frac{5.02}{Nr} \log A_5$$

Haaland (1983)

$$\frac{1}{\sqrt{x}} = -3.6 \log \left[ \frac{6.9}{Nr} + \left[ \frac{C/d}{3.7} \right]^{1.11} \right] \dots\dots\dots(9)$$

Shergides (1984) (ecuación 2)

$$f = \left[ A_7 - \frac{(A_8 - A_7)^2}{A_9 - 2A_8 + A_7} \right]^{-2} \dots\dots\dots(10)$$

donde:

$$A_7 = -2 \log \left[ \frac{c/d}{3.7} + \frac{12}{Nr} \right]$$

$$A_8 = -2 \log \left[ \frac{c/d}{3.7} + \frac{2.51 A_7}{Nr} \right]$$

$$A_9 = -2 \log \left[ \frac{c/d}{3.7} + \frac{2.51 A_8}{Nr} \right]$$

Berghides (1984) (ecuación 3)

$$z = \left[ 4.781 - \frac{(A_7 - 4.781)^2}{A_8 - 2A_7 + 4.781} \right]^{-2} \dots \dots \dots (11)$$

T A B L A ( F - 3 )

 DESVIACION DEL FACTOR DE FRICCION (  $\epsilon$  )  
 CON RESPECTO A LA ECUACION DE COLEBROOK-SHILTE

$\epsilon_1$	$N_r$	$f_{t-w}$	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	( $\epsilon-w$ ) <sup>+</sup>	( $\epsilon-w$ ) <sup>-</sup>
10-3	4x102	.00998	0.52	-74.95	1.29	1.41	1.65	-0.39	-0.28	-0.28	1.21	-0.08	-0.09	0.0	0.0
	4x104	.00773	0.40	-70.89	0.0	0.11	0.71	-0.73	0.37	0.37	-0.05	-0.07	-0.13	0.0	0.0
	4x105	.00458	-3.41	-61.22	-0.92	-0.85	-0.69	0.03	0.92	0.92	-0.97	-0.06	-0.30	0.0	0.0
	4x106	.00291	-5.28	-52.94	-0.51	-0.44	-0.22	0.0	0.96	0.96	-0.55	-0.05	-0.41	0.0	0.0
	4x107	.00202	-0.65	-45.74	0.24	0.29	0.49	-0.04	0.87	0.87	0.20	0.04	-0.45	0.0	0.0
4x108	.00149	12.51	-19.31	1.21	1.32	1.45	-0.11	0.75	0.75	1.23	-0.03	-0.35	0.02	-0.32	
10-2	4x102	.00998	0.52	-54.83	1.29	1.41	1.65	-0.39	-0.28	-0.28	1.21	-0.08	-0.09	0.0	0.0
	4x104	.00773	0.40	-49.54	0.0	0.11	0.71	-0.13	0.37	0.37	-0.04	-0.07	-0.13	0.0	0.0
	4x105	.00458	-3.41	-38.80	-0.92	-0.84	-0.69	0.03	0.92	0.92	-0.97	-0.06	-0.30	0.0	0.0
	4x106	.00291	-5.27	-31.01	-0.51	-0.44	-0.22	0.0	0.95	0.95	-0.56	-0.05	-0.41	0.0	0.0
	4x107	.00202	-0.28	-24.82	0.25	0.40	0.50	-0.05	0.85	0.85	0.25	-0.04	-0.45	0.02	-0.02
4x108	.00159	12.41	-19.31	1.28	1.32	1.40	-0.05	0.83	0.83	0.95	-0.03	-0.25	0.19	-0.19	
10-4	4x102	.00998	0.52	-28.29	1.29	1.41	1.65	-0.39	-0.28	-0.28	1.21	-0.08	-0.09	0.0	0.0
	4x104	.00773	0.40	-23.77	0.0	0.11	0.32	-0.13	0.37	0.37	-0.06	-0.07	-0.13	0.0	0.0
	4x105	.00458	-3.40	-16.82	-0.92	-0.84	-0.69	0.03	0.92	0.92	-0.99	-0.06	-0.30	0.01	-0.01
	4x106	.00292	-5.46	-12.63	-0.48	-0.42	-0.20	0.01	0.93	0.93	-0.62	-0.05	-0.29	0.04	-0.04
	4x107	.00205	-0.04	-8.24	0.41	0.46	0.55	0.02	0.70	0.70	-0.02	-0.02	-0.22	0.26	-0.22
4x108	.00161	12.09	-5.81	1.09	1.09	1.15	0.15	0.20	0.20	0.20	0.0	-0.04	1.20	-1.20	
10-5	4x102	.00998	0.52	-5.74	1.29	1.41	1.65	-0.39	-0.28	-0.28	1.20	-0.09	-0.09	0.01	-0.01
	4x104	.00773	0.41	-5.25	0.01	0.12	0.72	-0.17	0.36	0.36	-0.08	-0.07	-0.12	0.01	-0.21
	4x105	.00451	-3.47	-3.69	-0.88	-0.89	-0.65	0.05	0.89	0.89	-1.07	-3.06	-0.29	0.06	-0.06
	4x106	.00297	-4.46	-1.52	-0.29	-0.24	-0.13	0.10	0.75	0.75	-0.40	-0.04	-0.27	0.26	-0.27
	4x107	.00225	2.03	1.46	0.45	0.45	0.71	0.25	0.26	0.20	0.41	-0.01	-0.02	1.24	1.65
4x108	.00205	7.16	-0.29	0.48	0.43	0.47	0.12	0.06	0.06	0.12	1.02	-0.05	2.45	2.74	
10-2	4x102	.00998	0.52	4.76	1.22	1.24	1.48	0.77	0.29	0.29	1.11	0.02	-0.09	1.05	1.25
	4x104	.00773	0.45	2.27	0.89	0.73	1.79	-0.09	0.72	0.74	-0.72	-0.07	-0.12	0.19	-0.17
	4x105	.00458	-2.22	0.42	-0.51	-0.46	-0.72	0.17	0.69	0.69	1.73	1.02	-0.19	0.54	-0.54
	4x106	.00297	-0.45	0.21	0.45	0.47	0.52	0.22	0.23	0.20	-0.74	0.0	0.06	0.06	-0.21
	4x107	.00204	1.27	2.06	0.24	0.23	0.45	0.17	0.07	0.07	0.07	-0.07	0.07	0.70	-0.70
4x108	.00159	7.76	1.30	0.17	0.69	0.12	0.05	0.09	0.09	0.05	1.06	0.02	2.52	-2.27	

T A B L A ( F - 3 )

DESVIACION DEL FACTOR DE EFICACIA ( S )  
CON RESPECTO A LA ECUACION DE COLEBROOK-WHITE

Eje	No	f <sub>rw</sub>	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(f <sub>rw</sub> ) <sub>0</sub>	(f <sub>rw</sub> ) <sub>1</sub>
10-5	44102	.02998	0.52	-74.95	1.29	1.41	1.63	-0.39	-0.28	-0.28	1.21	-0.08	-0.07	0.0	0.0
	44104	.00773	0.40	-70.89	0.0	0.11	0.31	-0.73	0.37	0.37	-0.06	-0.07	-0.13	0.0	0.0
	44105	.00450	-3.41	-67.22	-0.92	-0.85	-0.69	0.03	0.92	0.92	-0.97	-0.04	-0.20	0.0	0.0
	44106	.00291	-5.28	-52.94	-0.51	-0.44	-0.32	0.0	0.96	0.96	-0.55	-0.05	-0.41	0.0	0.0
	44107	.00202	-7.45	-45.74	0.24	0.29	0.49	-0.04	0.97	0.97	0.20	0.04	-0.45	0.0	0.0
44108	.00149	12.51	-39.21	1.21	1.25	1.25	-0.11	0.75	0.75	1.23	-0.03	-0.35	0.02	-0.02	
10-7	44102	.00998	0.52	-54.83	1.29	1.41	1.63	-0.39	-0.28	-0.28	1.21	-0.08	-0.09	0.0	0.0
	44104	.00773	0.40	-49.54	0.0	0.11	0.31	-0.13	0.37	0.37	-0.06	-0.07	-0.13	0.0	0.0
	44105	.00450	-3.41	-38.80	-0.92	-0.84	-0.69	0.03	0.92	0.92	-0.97	-0.04	-0.20	0.0	0.0
	44106	.00291	-5.27	-31.01	-0.51	-0.44	-0.32	0.0	0.95	0.95	-0.56	-0.05	-0.41	0.0	0.0
	44107	.00202	-9.58	-24.82	0.25	0.40	0.50	-0.05	0.85	0.85	0.25	-0.04	-0.45	0.02	-0.02
44108	.00150	12.41	-19.31	1.20	1.32	1.40	-0.05	0.63	0.63	0.95	-0.03	-0.25	0.19	-0.19	
10-6	44105	.00198	0.52	-20.29	1.29	1.41	1.63	-0.39	-0.28	-0.28	1.21	-0.08	-0.09	0.0	0.0
	44104	.00773	0.40	-23.77	0.0	0.11	0.32	-0.13	0.37	0.37	-0.06	-0.07	-0.13	0.0	0.0
	44105	.00450	-3.40	-16.82	-0.92	-0.84	-0.69	0.03	0.92	0.92	-0.99	-0.04	-0.20	0.01	-0.01
	44106	.00292	-5.46	-12.63	-0.48	-0.42	-0.30	0.01	0.93	0.93	-0.62	-0.05	-0.29	0.04	-0.04
	44107	.00205	-8.04	-9.24	0.41	0.46	0.55	0.02	0.70	0.70	-0.05	-0.02	-0.22	0.24	-0.24
44108	.00161	12.09	-5.81	1.09	1.09	1.15	0.15	0.20	0.20	0.20	0.0	-0.04	1.20	-1.20	
10-5	44102	.00998	0.52	-2.74	1.29	1.41	1.63	-0.39	-0.28	-0.28	1.20	-0.09	-0.09	0.01	-0.01
	44104	.00773	0.41	-3.25	0.01	0.12	0.32	-0.17	0.36	0.36	-0.08	-0.07	-0.17	0.01	-0.01
	44105	.00451	-3.47	-1.69	-0.88	-0.80	-0.65	0.05	0.89	0.89	-1.07	-0.04	-0.29	0.06	-0.06
	44106	.00297	-6.46	-1.52	-0.29	-0.24	-0.12	-0.10	0.75	0.75	-0.40	-0.04	-0.27	0.26	-0.27
	44107	.00225	2.03	1.06	0.65	0.65	0.71	0.25	0.24	0.24	0.41	-0.01	-0.32	1.22	-1.22
44108	.00205	7.16	-2.29	0.49	0.43	0.47	0.12	0.06	0.06	0.14	0.07	-0.05	2.49	-2.49	
10-2	44102	.01031	0.55	-4.75	1.22	1.44	1.68	-0.77	0.29	0.29	1.11	0.38	-0.04	3.05	-3.05
	44104	.00755	0.25	-2.27	0.49	0.19	0.79	-0.59	0.24	0.24	-0.22	-0.07	-0.12	0.10	-0.10
	44105	.00487	-2.22	0.42	-0.51	-0.46	-0.32	0.17	0.68	0.68	1.23	1.04	-0.19	0.54	-0.54
	44106	.00316	-0.95	0.21	0.45	0.47	0.52	0.22	0.23	0.23	-0.74	0.02	0.20	2.46	-2.46
	44107	.00273	0.77	2.06	0.44	0.39	0.47	0.17	0.07	0.07	0.27	-0.27	-0.27	1.20	-1.20
44108	.00203	7.76	1.30	0.17	0.09	0.17	0.05	0.08	0.08	0.27	1.08	0.09	0.52	-0.52	

T A B L A ( 7 - 3 )

DESVIACION DEL FACTOR DE FRICCION ( % )  
CON RESPECTO A LA ECUACION DE COLEBROOK-WHITE

Re	n	$f_{co}$	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
10 <sup>-2</sup>	4107	01922	0.27	-2.96	2.62	1.72	1.95	-0.27	-0.31	-0.31	0.68	-0.06	-0.07	0.48	-0.48
	4104	00910	0.72	-1.07	0.65	0.72	0.91	0.09	0.20	0.20	-0.68	-0.04	-0.07	0.89	-0.90
	4125	00554	1.91	3.74	0.72	0.69	0.80	0.33	0.15	0.15	-0.90	0.04	0.03	2.93	-3.13
	4124	00439	3.76	5.74	0.51	0.42	0.49	3.11	6.09	0.09	0.08	0.09	0.09	4.32	-4.06
	4101	06431	4.10	4.50	0.15	0.09	0.15	0.07	0.10	0.10	0.28	0.10	0.10	4.54	-5.18
	4109	00490	4.14	4.12	0.17	0.01	0.07	0.06	0.10	0.10	0.30	0.10	0.10	4.59	-5.21
10 <sup>-2</sup>	4103	01227	-1.59	-4.42	2.69	1.99	3.07	6.08	-0.25	-0.25	0.34	0.03	0.15	3.34	-7.16
	4104	01077	-1.81	-1.72	2.10	2.05	2.20	0.23	0.02	0.02	-0.12	0.07	0.17	4.59	-4.84
	4105	00961	-0.48	1.30	0.74	0.63	0.73	0.13	0.13	0.13	0.22	0.13	0.19	6.19	-6.78
	4106	00849	-0.51	2.13	0.26	0.12	0.21	0.09	0.14	0.14	0.33	0.14	0.19	6.43	-7.10
	4107	00696	-0.50	2.12	0.18	0.02	0.10	0.08	0.19	0.14	0.34	0.14	0.19	6.46	-7.15
	4109	00946	-0.49	2.12	0.14	0.0	0.09	0.09	0.14	0.14	0.34	0.14	0.19	6.46	-7.14
5-10 <sup>-2</sup>	4103	01922	-15.79	0.59	3.19	3.06	0.45	0.07	0.04	0.04	0.99	0.03	0.15	7.82	-9.14
	4104	01842	-15.47	2.46	1.83	1.66	1.81	0.12	0.15	0.15	0.60	0.07	0.17	8.49	-8.94
	4105	01791	-15.30	3.98	0.49	0.50	0.42	0.11	0.19	0.19	0.41	0.13	0.19	8.97	-9.53
	4106	01786	-15.28	4.17	0.24	0.04	0.17	0.11	0.19	0.19	0.39	0.14	0.19	9.03	-9.50
	4107	01795	-15.28	4.19	0.20	0.01	0.13	0.11	0.19	0.19	0.39	0.14	0.19	9.03	-9.61
	4108	01795	-15.28	4.19	0.19	0.0	0.12	0.11	0.19	0.19	0.39	0.14	0.19	9.03	-9.61

T A B L A ( F - 4 )

DESVIACION DEL FACTOR DE FRICCIÓN (%)  
 (CON RESPECTO A LA EC. DE COLEBROOK- WHITE)

$C/f_4$	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	( $\epsilon-w$ )	( $\epsilon-w$ )
10-3	7.86	57.53	0.73	0.76	0.81	0.12	0.67	0.69	0.72	0.66	0.29	0	0
10-7	7.89	36.79	0.73	0.75	0.81	0.11	0.67	0.67	0.67	0.64	0.29	0.04	0.02
10-1	7.68	15.95	0.75	0.72	0.77	0.12	0.57	0.57	0.52	0.65	0.21	0.25	0.27
10-5	7.02	2.73	0.60	0.61	0.65	0.17	0.42	0.42	0.63	0.05	0.14	6.77	0.86
10-4	1.71	3.25	0.50	0.50	0.59	0.19	0.28	0.28	0.65	0.06	0.09	1.60	1.79
10-1	2.76	7.27	0.64	0.61	0.72	0.15	0.16	0.16	0.49	0.07	0.09	2.56	7.29
10-2	1.15	2.39	1.27	0.97	1.07	0.12	0.12	0.14	0.23	0.11	0.18	5.58	6.62
5x10-2	15.40	3.26	1.02	0.85	0.52	0.11	0.16	0.16	0.53	0.11	0.18	8.72	9.24
TOTAL	4.42	15.49	7.75	0.72	0.74	0.12	0.79	0.79	0.56	0.07	0.19	2.49	2.76



### NOMENCLATURA

SÍMBOLO	CANTIDAD	NOMENCLATURA COMPUTACION	UNIDADES (de campo) (S. Inter)	
d	diámetro interior de la tubería	DIAIT	ps	"
di	diámetro exterior de la tubería int. espacio anular	DIAETP	ps	"
do	diámetro interno de la tubería ext. espacio anular.	DIAITR	ps	"
f	factor de fricción fanning	FACF	adim.	adim.
HP	potencia hidráulica	HP	HP	Watts
K'a	índice de consisten- cia en el espacio anular.	KX	$\frac{\text{lb.f.s}^{11}}{\text{pie}^2}$	Pa.s <sup>11</sup>
K'p	índice de consisten- cia equivalente en el interior de la tubería	KX	$\frac{\text{lb.f.s}^{11}}{\text{pie}^2}$	Pa.s <sup>11</sup>
K'v	índice de consisten- cia equivalente en el viscosímetro	KX	$\frac{\text{lb.f.s}^{11}}{\text{pie}^2}$	Pa.s <sup>11</sup>
L	longitud de la tube- ría	DPH	"	"
n'	índice de comporta- miento de flujo	CFX	adim.	adim.
Nr	número de Reynolds fluido newtoniano	REYQ	adim.	adim.
Np'	número de Reynolds generalizado, flujo en T.P.	REYQ	adim.	adim.
Np <sub>3</sub> '	número de Reynolds generalizado, flujo en L.A.	REYQ	adim.	adim.

$\Delta p_f$	caída de presión por fricción	FRSL	lb/pg <sup>2</sup>	Pa
q	gasto de flujo	INJ	bpm	m <sup>3</sup> /s
v	velocidad promedio de flujo	VEL	m/s	m/s
$\theta$	lectura del viscosímetro FANN V-G		grados	grados
$\mu$	viscosidad absoluta fluido newtoniano	VISFF	cp	Pa.s
$\rho$	densidad del fluido fracturante	DENFF	gr/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
$\tau_D$	esfuerzo de corte a la sup. del visc.		lb/pie <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>
w	esfuerzo de corte a la pared del conducto		lb/pie <sup>2</sup>	Pa
$\tau_y$	punto de cedencia		$\frac{\text{lb}}{100 \text{ pie}^2}$	Pa
$\tau_{300}$	esfuerzo de corte a $\theta_{300}$		$\frac{\text{lb}}{100 \text{ pie}^2}$	Pa
$\tau_{600}$	esfuerzo de corte a $\theta_{600}$		$\frac{\text{lb}}{100 \text{ pie}^2}$	Pa

## REFERENCIAS

1) Islas Silva Carlos, "Apuntes de la clase de Estimulación y Reparación de Pozos" Facultad de Ingeniería U.N.A.M.

2) B.C. Craft & W.R. Holden, "Well Design: Drilling and Production" Prentice Hall, Inc. 1962 pp. 9-79.

3) Monricard R., "Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual", Gulf Publishing Co. Paris, 1982. pp 3-28.

4) D.W. Dodge and A.B. Metzner, "Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems", AIChE Journal, June 1959, Vol. 5 No.2 pp. 189.

5) Peña Olmedo Eduardo "Tipos de fluidos de perforación y su control" conferencia presentada el 30 de agosto de 1975 en Agua Dulce Ver. PEMEX.

6) M.H. Cullender and R.V. Smith, "Practical Solution of Gas Flow Equations for Wells and Pipelines with Large Temperature Gradients", Trans. AIME, pp. 207,281 (1956).

7) A.B. Metzner and J.C. Reed, "Flow of Non-Newtonian Fluids- Correlation of the Laminar, Transition, and

Turbulent- Flow Regions", Journal of American Institute  
Chemical Engineers, 1, pp 434 (1955).

8) A.G. Fredrickson and R.B Bird, "Non-Newtonian Flow in  
Annuli", Industrial and Engineering Chemistry, 50, pp.347  
(1958).

9) J.G. Savins, "Generalized Newtonian Flow in Stationary  
Pipes and Annuli", Trans. AIME, pp.325 (1958).

10) Brown Kermit E., "Gas Lift Theory and Practice",  
Petroleum Publishing Co., pp.15

11) Katz D. "Handbook of Natural Gas Engineering", Mc Graw  
Hill Co.

12) Garry A. Gregory, Maria Fogarasi, "Alternate to  
Standard Friction Factor Equation", Oil and Gas Journal,  
April 1 1965, pp.125

13) Moody M.L. "An Aproximate Formula for Pipe Friction  
Factors", Trans ASME, pp.1005, (1947).