

01174

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

7
Lij

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA
DETERMINAR LA CAPACIDAD DE ACARREO A PARTIR DE LA
VELOCIDAD CRITICA EN POZOS ALTAMENTE DESVIADOS

Roger ^{Ortiz} Ortiz Polo

Asesor : Ing. Eusebio Capitanachi Gonzalez

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

Cuando se planea o perfora un pozo desviado, uno de los parámetros que debe determinarse es la velocidad mínima requerida del fluido de perforación para que los recortes perforados sean transportados a la superficie y mantener así el agujero limpio . La limpieza de agujeros ha sido estudiada por numerosos investigadores para evitar o disminuir problemas mecánicos en los pozos .

En este trabajo un nuevo modelo ha sido desarrollado para auxiliar en la limpieza en pozos altamente desviados , cubriendo los efectos de variables de perforación como son :

- Ángulo de desviación
- Geometría del espacio anular
- Tamaño y densidad del recorte
- Densidad y velocidad del fluido así como sus propiedades reológicas
- Excentricidad de la tubería
- Ritmo de penetración
- Selección del modelo reológico

El modelo es una extensión al trabajo desarrollado por Saeed¹ , el cual no consideró la selección del modelo reológico de acuerdo a las características del fluido, la excentricidad de la tubería, el ritmo de penetración de la barrera, el modelo de Ley de Potencia, el cálculo del espesor de la cama de recortes en función de la relación de suspensión y de la relación de áreas y además no desarrolló un programa de cómputo conversacional.

La aportación del presente trabajo fue incluir y adecuar en el modelo existente los parámetros antes mencionados, a partir de los trabajos desarrollados por otros investigadores. La selección del modelo reológico se basó en el trabajo de Monicard¹¹. El efecto de excentricidad para el modelo puntual y promedio se fundamentó en el trabajo de Iyoho²⁶. El modelo de Ley de Potencia para el flujo laminar en el modelo puntual, se basó en el trabajo de Burgoyne²³. El efecto del ritmo de penetración se llevó a cabo bajo las consideraciones de Larsen et al²⁹.

Se desarrolló un programa de cómputo interactivo en QBASIC, construido en módulos, el cual permite al usuario calcular la velocidad crítica requerida para una eficiente limpieza del agujero para cualquier condición de operación dada.

La validación del modelo se llevó a cabo comparando los resultados del mismo con correlaciones y otros modelos existentes, presentando buenos resultados.

**A las autoridades de Petroleos Mexicanos
por haberme dado la oportunidad de cursar
estudios de posgrado .**

**A los catedráticos de la División de Estudios
de Posgrado de la Facultad de Ingenieria**

**Al Ing. Eusebio Capitanachi Gonzalez
por el apoyo en la realización de este
trabajo**

**A mis padres Paulino y Andrea ,
a mi hermana Mirna Carolina**

**A mi esposa Alicia por todo
su cariño y comprensión .
a mis hijos
Karen Alicia y Roger Alejandro
los que me motivan a superarme**

**A mis compañeros de trabajo
y de estudios gracias por
el apoyo dado**

CONTENIDO

TITULO	
RESUMEN	iii
AGRADECIMIENTOS	v
CONTENIDO	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Transporte de recortes en pozos verticales	3
2.2. Transporte de recortes en pozos direccionales	4
3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO	8
3.1. Condiciones locales fluido-recorte	8
3.1.1. Desarrollo del balance de fuerzas	10
3.1.2. Considerando fluidos newtonianos	11
3.1.3. Considerando fluidos plásticos de Bingham	13
3.1.4. Considerando fluidos Ley de Potencia	17
3.1.5. Considerando la forma del recorte	19
3.1.6. Considerando la excentricidad de la tubería	20
3.2. Condiciones promedio fluido-recorte	21
3.2.1. Considerando el tamaño del espacio anular	22
3.2.2. Considerando el ángulo de inclinación	22
3.2.3. Considerando la densidad del fluido	22
3.2.4. Aplicación de las consideraciones anteriores	22

3.2.5. Considerando el coeficiente de arrastre de la partícula	23
3.2.6. Considerando el ritmo de penetración	26
3.3. Cálculo del espesor de la cama de recortes	27
3.4. Desarrollo del paquete computarizado	29
4. VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	31
4.1. Probar modelo a partir de un rango de datos	31
4.2. Comparación con correlaciones y otros modelos existentes	36
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
NOMENCLATURA	42
REFERENCIAS	44
FIGURAS	47
APÉNDICE A SELECCIÓN DEL MODELO REOLÓGICO	70
APÉNDICE B DIAGRAMA DE FLUJO Y PROGRAMA DE CÓMPUTO	73

LISTA DE FIGURAS

Número de Figura	Número de Página
1. Fuerzas que actúan en un recorte	8
2. Geometría de flujo para un fluido Newtoniano en una rendija	11
3. Geometría de flujo para un fluido Plástico de Bingham en una rendija	13
4. Regiones de flujo en el espacio anular para un fluido Plástico de Bingham	16
5. Geometría de flujo para un fluido Ley de Potencia	17
6. Rendija equivalente para espacios anulares excéntricos	20
7. Cama de recortes y distribución de áreas en el espacio anular	27
8. Espesor recorte/diámetro agujero y concentración total de recortes calculados contra medidos	47
9. Variación de la concentración de recortes con la desviación del pozo . Modelo puntual .	48
10. Variación de la concentración de recortes con la desviación del pozo . Modelo promedio .	49
11. Efecto de la viscosidad y desviación del pozo en la concentración de recortes . Modelo puntual .	50
12. Efecto de la viscosidad y desviación del pozo en la concentración de recortes . Modelo promedio .	51
13. Variación de la altura de la cama de recortes con la desviación del pozo . Modelo puntual .	52
14. Variación de la altura de la cama de recortes con la desviación del pozo . Modelo promedio .	53
15. Efecto del tamaño del recorte en la velocidad crítica	54
16. Efecto del punto de cedencia en la velocidad crítica	55
17. Efecto de la densidad del fluido en la velocidad crítica	56

18. Efecto de la densidad del recorte en la velocidad crítica	57
19. Efecto del ritmo de penetración y ángulo de desviación en la velocidad crítica	58
20. Efecto de la excentricidad y del ángulo de desviación en la velocidad crítica (modelo puntual)	59
21. Efecto de la excentricidad y del ángulo de desviación en la velocidad crítica (modelo promedio)	60
22. Efecto del régimen de flujo y del ángulo de desviación en la velocidad crítica	61
23. Efecto del modelo reológico y del ángulo de desviación en la velocidad crítica	62
24. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio , mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica (Agua, T.P.=60.325 mm y Agujero=152.4 mm)	63
25. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio , mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica (Agua, T.P.=88.9 mm y Agujero=215.9 mm)	64
26. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio , mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica (Lodo Polimérico, T.P.=76.2 mm y Agujero=127 mm)	65
27. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio , mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica (Lodo Polimérico, T.P.=76.2 mm y Agujero=127 mm)	66
28. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio , mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica (Lodo Bentonítico Baja Viscosidad, T.P.=48.2 mm y Agujero=127 mm)	67
29. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio , mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica (Lodo Bentonítico Alta Viscosidad, T.P.=48.2 mm y Agujero=127 mm)	68

1. INTRODUCCIÓN

La perforación es una de las etapas más costosas del desarrollo de los pozos petroleros , y es en esta etapa donde se presenta una operación importante conocida como limpieza del agujero , el estudio de los problemas de limpieza del agujero ha tenido un gran interés desde hace años en la industria de la perforación , la limpieza del agujero consiste en transportar los fragmentos de roca perforada desde el fondo del agujero hacia la superficie a través del espacio anular utilizando al fluido de perforación como medio de transporte . La habilidad del fluido de perforación de suspender y levantar los recortes a la superficie es llamada capacidad de acarreo del fluido.

Algunos parámetros , en diferentes grados , influyen en la eficiencia del fluido de perforación para levantar los recortes . Algunos de estas variables son :

- 1.-Reología del fluido de perforación .
- 2.-Ritmo de penetración de la barrena .
- 3.-Tamaño , forma y densidad de los recortes .
- 4.-Diámetro de T.P. y agujero , excentricidad de la T.P.

Como la tecnología actual tiende a la perforación de pozos desviados , y es al utilizar esta técnica donde se presenta un problema en la remoción de los recortes , el cual se agrava conforme se incrementa el ángulo de inclinación , debido al gran desplazamiento lateral y a la longitud del agujero. Este problema es originado principalmente por la formación de una cama de recortes en el lado inferior del agujero , ya que los recortes tienden a asentarse a una distancia corta del fondo del agujero , esta cama de recortes se forma hasta alcanzar condiciones de estado permanente , donde el perfil de flujo arriba de la cama de recortes puede ser laminar o turbulento .

INTRODUCCION

La cama de recortes en el fondo del agujero crea problemas de torque , arrastre y disminución del ritmo de perforación . Debido a la desviación del agujero la sarta de perforación puede estar excéntrica en el pozo aumentando la dificultad de remover los recortes e incrementando la posibilidad de atrapamiento de la sarta de perforación . Por otra parte si no se obtiene una limpieza adecuada del agujero pueden presentarse problemas durante la introducción y/o cementación de la tubería de revestimiento , incrementándose el tiempo de operación y por consiguiente el costo de la perforación .

Este trabajo pretende desarrollar un modelo matemático para predecir la velocidad crítica y de esta manera evaluar la capacidad de acarreo del fluido de perforación , considerando una gama de variables independientes tales como ángulo de inclinación , reología del fluido de perforación , tamaño de los recortes , excentricidad de la tubería de perforación , tamaño del anular , ritmo de penetración , etc .

Al lograr determinar la velocidad crítica se puede considerar que un agujero puede ser limpiado eficientemente de cualquier tipo de recorte , si la velocidad anular es igual o mayor que la velocidad crítica . Además se determinaran los valores de las variables dependientes como son espesor de la cama de recortes y concentración de recortes .

La importancia de alcanzar el objetivo de este trabajo son las siguientes :

- 1.- No utilizar velocidades excesivas que erosionen el agujero .
- 2.- Alcanzar un mayor ritmo de penetración .
- 3.- Mínimo tratamiento al fluido de perforación .
- 4.- Disminución de tiempos de operación .

Este modelo será comparado con correlaciones y métodos existentes .

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Durante muchos años el estudio de los problemas de limpieza del agujero ha tenido un gran interés en la industria petrolera , una gran cantidad de trabajos de investigación han sido desarrollados para obtener un mejor entendimiento de los procesos de remoción de recortes , el estudio del transporte de recortes se puede dividir en :

2.1 TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS VERTICALES

La importancia del transporte vertical de recortes fue investigado primero por Pigott² en 1941 , reconociendo la importancia de la velocidad en el espacio anular y la densidad del fluido . De los resultados de su investigación concluye que altas viscosidades no son favorables . Introdujo el concepto de que el flujo turbulento induce a velocidades de asentamiento turbulentas y sugiere que el flujo laminar en el espacio anular resulta en un transporte más eficiente . Para operaciones libres de problemas la concentración de recortes en el espacio anular debe ser menor del 5% en volumen . Los estudios de laboratorio y campo conducidos por Hall, Thompson y Nuss³ en 1950 bajo condiciones de estado no permanente mostraron que el flujo turbulento, rotación de la tubería , alta densidad del fluido, baja viscosidad y bajas propiedades de gel aumentan el transporte de las partículas . Observaciones similares se efectuaron en 1951 por Williams y Bruce⁴ . Hopkins⁵ en 1967 presentó relaciones entre la velocidad de asentamiento de la partícula , viscosidad y esfuerzo de cedencia para un espacio anular concéntrico vertical , algunos resultados tuvieron implicaciones inconsistentes con sus informes previos , pero sus observaciones fueron esencialmente similares con las de Pigott² y Hall³ . En 1974 Zeidler⁶ presentó relaciones semiempíricas bajo condiciones de estado permanentes para predecir la velocidad de levantamiento de la partícula y la concentración volumétrica

para un espacio anular concéntrico vertical , con la inclusión de funciones trigonométricas para incluir la inclinación del pozo. Los efectos de la geometría de pozos fueron investigadas por Boulet⁷ en 1974 , concluyendo que la concentración de recortes disminuye con el aumento del área de la sección transversal del espacio anular expuesto al flujo. Vaughn mostró en 1965 que la excentricidad de la tubería afecta el comportamiento de flujo. Los efectos de la rotación de tubería fueron investigados por Thomas , Azar y Becker⁸ en 1982 , concluyendo que la rotación tiene poco efecto , siendo ligeramente benéfica cuando el flujo es laminar .

2.2 TRANSPORTE DE RECORTES EN POZOS DIRECCIONALES

La iniciación de estudios de flujo inclinado fue conducido por Tomren⁹ en 1979 , observando la formación de una cama de recortes , donde la velocidad de levantamiento de la partícula no puede relacionarse directamente con la concentración de recortes en el espacio anular. En 1980 Iyoho¹⁰ desarrolló correlaciones aplicables de campo para predecir la eficiencia del transporte en agujeros inclinados , donde introdujo un factor de corrección para la presencia de una cama de recortes . En estudios conducido por Okranji¹¹ en 1981 , las propiedades reológicas, particularmente el punto de cedencia y la viscosidad plástica, mostraron tener efectos importantes sobre la dinámica de la partícula para el flujo laminar . En el flujo turbulento se observó poco efecto , notando que el transporte de recortes más adecuado se observó durante el flujo laminar en el caso vertical y el flujo turbulento en el caso horizontal . Becker¹² en 1982 observó que el aumento de la densidad del fluido, mejora el transporte de recortes, y reduce el torque , siendo éste mayor conforme se aumenta la inclinación del agujero hasta el punto donde la cama de recortes detiene el deslizamiento . En 1985, Hareland¹³ comparó el comportamiento del fluido base-agua con el base-aceite bajo condiciones similares . encontrando que, teniendo las mismas propiedades reológicas , ambos fluidos se comportaron similarmente en un pozo vertical . Para inclinaciones de 30 a 50 grados , el fluido base-agua tuvo un mejor comportamiento . Para flujo horizontal , el comportamiento fue similar en ambos fluidos para valores bajos de viscosidad plástica

(VP) y punto de cedencia (PC) ; mientras para valores altos de VP y PC , el fluido base-agua se comportó mejor . En 1987, Meano¹⁴ condujo el estudio de transporte de recortes usando fluido base-aceite mineral y recortes de arcilla , concluyendo que se presenta un valor óptimo de PC entre 18 y 25 . Sus resultados muestran poco efecto de la concentración de recortes (dentro de la gama estudiada) sobre la eficiencia de transporte. Ningún intento se efectuó para correlacionar los datos experimentales . En 1987, Becker¹⁵ correlacionó datos experimentales previos sobre el transporte de recortes en pozos inclinados. El resultado fue un conjunto de ecuaciones empíricas para predecir la concentración volumétrica de recortes como una función de otras variables de perforación que incluyen ángulo de agujero, velocidad y reología del fluido , geometría de la tubería, y geometría del agujero, Becker también desarrolló un estudio teórico sobre el mecanismo de suspensión de la partícula por el fluido de perforación , desarrolló un balance de fuerzas sobre el recorte perforado , no obtuvo un modelo teórico útil final principalmente a causa de la incapacidad para evaluar el coeficiente de fuerza de elevación necesitado en el balance de fuerzas . Parker¹⁶ en 1987 investigó experimentalmente los efectos del derrumbe del agujero y tamaño del recorte sobre la limpieza del agujero , encontrando que los derrumbes del agujero pueden ocasionar problemas severos de descarga . En 1988 Iyoho¹⁷ describió un modelo computarizado único para el análisis de la limpieza del agujero en el sistema de perforación. El Nuevo Balance de Materia (NMB) de dicho modelo utiliza datos de perforación como : ritmo de penetración (ROP) , gasto de bombeo, diámetro de la barrena, geometría del pozo, y propiedades del fluido . Para realizar esto, el modelo calcula concentraciones y velocidades específicas del pozo para resolver un conjunto de ecuaciones diferenciales que representan el transporte del material a lo largo del pozo . La versión actual del NMB del modelo es aplicado para pozos verticales con ángulos no mayores de 10 grados . Los resultados obtenidos de el modelo incluyen: (1) concentración de recortes y distribución del tamaño de los recortes en el espacio anular, (2) velocidad de asentamiento de los recortes , velocidad neta de transporte, y relación de transporte; (3) efectos de la densidad y reología del fluido en la limpieza del agujero, (4) efectos del ROP y del gasto de bombeo sobre la limpieza del agujero y, (5) la densidad equivalente

del lodo, considerando recortes de varios tamaños . El modelo se ha probado exitosamente contra una variedad de datos de campo y laboratorio. Una aplicación directa del modelo es considerar el estudio analítico de la limpieza del agujero así como la simulación del sistema de perforación para el ROP y el estudio del control de sólidos. En 1990 Ford¹⁸ describe cómo un simulador se ha usado para determinar los efectos de diversos parámetros de perforación en el gasto de circulación requerido que permita que los recortes en un pozo desviado sean transportados eficientemente a la superficie. Se identificaron dos mecanismos de transporte de recortes claramente diferentes . El primero ocurre cuando los recortes son transportados a la superficie por un movimiento rodante/deslizante a lo largo de la pared inferior del espacio anular y el segundo es cuando los recortes son transportados en suspensión en el fluido circulante , éste último requiere una velocidad más alta del fluido que el primero . Ambos mecanismos producen el mismo efecto (limpiar el agujero) pero sus respuestas a las variaciones en los parámetros de perforación son diferentes .Las conclusiones principales de las experimentaciones efectuadas hasta la fecha son que la velocidad anular del fluido requerida para iniciar el transporte de recortes con cualquiera de los dos mecanismos de transporte es sensible a las variaciones en el ángulo del agujero pero la relación entre la velocidad requerida del fluido y el ángulo del agujero son diferente para cada uno de estos mecanismos . La eficiencia de un fluido circulante en la remoción de recortes no sólo depende de la reología del fluido sino del tipo de flujo . Agua en flujo turbulento, puede ser un medio muy efectivo de transporte de recortes. La rotación de la tubería tuvo poco o ningún efecto sobre la velocidad del fluido requerida para transportar los recortes cuando se circula agua , pero se redujo la velocidad del fluido requerida para transportar los recortes cuando se circulan fluidos con viscosidad media o alta . Se debe considerar que estos experimentos se realizaron en espacios anulares relativamente pequeños . La velocidad del fluido requerida para transportar los recortes es una función del tamaño de los mismos . En 1990 , Peden¹⁹ investigó la influencia de variables tales como : ángulo del agujero, reología del fluido, tamaño de los recortes, excentricidad de la tubería de perforación, gasto de circulación, tamaño del espacio anular , y rotación de la tubería sobre la eficiencia del transporte de recortes utilizando el concepto de

Velocidad Mínima de Transporte (MTV). Este concepto considera que un agujero puede ser limpiado eficientemente de recortes mantenidos rodantes o en suspensión, si la velocidad anular es igual o mayor que la velocidad mínima de transporte. Al disminuir la velocidad mínima de transporte facilita la limpieza del agujero. Los resultados hasta ahora han mostrado que dependiendo del nivel de excentricidad y tamaño del espacio anular, la reología del fluido así como del régimen de flujo presente tienen alto impacto en la MTV, utilizando fluido de baja viscosidad, el régimen de flujo turbulento predomina en tuberías concéntricas a bajas MTV. El uso de fluidos de alta viscosidad mejora el transporte de recortes especialmente en ángulos altamente desviados. La eficiencia del transporte se mejora al rotar la tubería en diversos niveles de excentricidad. Los recortes más pequeños son más fáciles de remover que los más grandes. En 1992, Sifferman²⁰ probó experimentalmente que una gran acumulación de recortes se forma en el espacio anular, siendo difíciles de remover una vez que la cama de recortes se forma en la parte inferior del pozo. La velocidad y densidad del fluido tienen un gran efecto en la limpieza del agujero. En 1993, Hareland²¹ comparó el transporte de recortes en pozos direccionales utilizando fluidos de emulsión inversa de baja toxicidad y fluidos base agua, concluyendo, que incrementando el punto de cedencia y la viscosidad plástica en ambos tipos de fluido en todos los ángulos de inclinación resultó en la disminución del ritmo de transporte de los recortes, notándose más en los fluidos base-aceite. La disminución del punto de cedencia así como de la viscosidad plástica, junto con un incremento en el flujo, mejora la limpieza del agujero en ambos tipos de fluido. Para ángulos de inclinación de 40° a 50° el uso de fluidos base-agua proporciona mejor limpieza del espacio anular que los fluidos base-aceite con reología similar. Para agujeros altamente desviados con inclinaciones de 70° a 80° y para valores bajos de punto de cedencia y de viscosidad plástica el comportamiento de limpieza es el mismo en ambos fluidos. Para valores altos de punto de cedencia y de viscosidad plástica los fluidos base-agua proporcionan una mejor limpieza.

3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

3.1 CONDICIONES LOCALES FLUIDO-RECORTE

Para comprender el mecanismo del transporte de los recortes , primero se analizan las fuerzas que actúan en un recorte en la parte inferior de la pared del pozo , tal como se muestra en la Figura 1 .

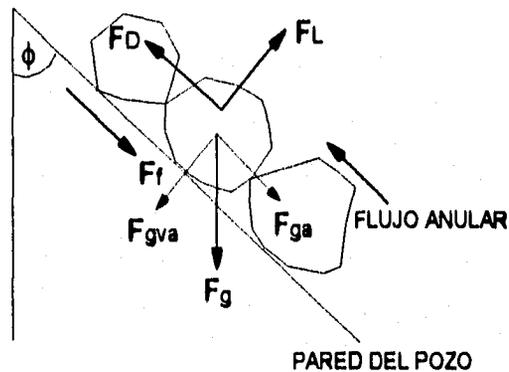


FIGURA 1. Fuerzas que actúan en un recorte

Las fuerzas que actúan sobre un recorte son de dos tipos :

- 1.- Las fuerzas que tienden a mantener el recorte en la cama , siendo principalmente la fuerza de gravedad (F_g) la cual causa que el recorte se asiente en el fondo para formar una cama y cuya magnitud es igual al peso sumergido del recorte en el fluido . También puede presentarse una fuerza de fricción (F_f) si el recorte tiende a deslizarse en la superficie de la pared del pozo

2.- Las fuerzas que tienden a mover el recorte fuera de la cama , son la de levantamiento (F_L) y la de arrastre (F_D) .La fuerza de levantamiento incorpora el recorte a la corriente principal del flujo, debido a la distribución asimétrica de la velocidad del fluido alrededor del recorte y/o a la turbulencia en el flujo anular . La fuerza de arrastre tiende a rodar/deslizar el recorte fuera de la cama y esto es causado por el arrastre del fluido viscoso el cual actúa en la superficie expuesta del recorte al fluido.

La fuerza de gravedad (F_g) ,siempre tiende a asentar el recorte .De acuerdo con la siguiente expresión :

$$F_g = \left(\frac{\pi D_s^3}{6} \right) (\rho_s - \rho_f) \cdot g \quad (3.1.1)$$

En un pozo desviado , la resultante F_g se descompone en F_{ga} y F_{gva} :

$$F_{ga} \text{ (paralela al eje del pozo)} = F_g \cdot \cos \phi$$

$$F_{ga} = \left[\left(\frac{\pi D_s^3}{6} \right) (\rho_s - \rho_f) \cdot g \right] \cos \phi \quad (3.1.2)$$

$$F_{gva} \text{ (perpendicular al eje del pozo)} = F_g \cdot \sin \phi$$

$$F_{gva} = \left[\left(\frac{\pi D_s^3}{6} \right) (\rho_s - \rho_f) \cdot g \right] \sin \phi \quad (3.1.3)$$

Por lo que bajo la acción de F_{gva} , el recorte tiende a asentarse en la pared del lado inferior del espacio anular y bajo la acción de F_{ga} , el recorte tiende a deslizarse hacia el fondo del pozo .

La fuerza de levantamiento (F_L), se expresa de acuerdo a :

$$F_L = C_L \cdot A_L \cdot \frac{\rho_f \cdot V_f^2}{2} \quad (3.1.4)$$

o utilizando el modelo desarrollado por Saffman²² para flujo laminar se puede escribir como :

$$F_L = 1.615 \mu^{0.5} D_s^2 \rho_f^{0.5} V_f \gamma^{0.5} \quad (3.1.5)$$

La fuerza de arrastre (F_D) actúa en la parte del recorte expuesta al fluido y se expresa como :

$$F_D = C_D \cdot \left(\frac{\pi}{4} D_s^2 \right) \left(\frac{\rho_f \cdot V_s^2}{2} \right) \quad (3.1.6)$$

La fuerza de fricción (F_f) se expresa de acuerdo a :

$$F_f = (F_g \cdot \sin \phi - F_L) f_s$$

a partir de ecuación (3.1.3)

$$F_f = (F_{gva} - F_L) \cdot f_s \quad (3.1.7)$$

3.1.1 DESARROLLO DEL BALANCE DE FUERZAS

Una vez analizadas las fuerzas que actúan sobre un recorte, se realiza el siguiente balance de fuerzas necesario para iniciar el movimiento :

$$F_t \geq F_{gva} \quad (3.1.1.1)$$

y

$$F_D \geq F_{ga} + F_f \quad (3.1.1.2)$$

pero si se considera que los recortes están en suspensión , es decir si F_t es mayor que F_{gva} , entonces no existe fricción con las paredes y F_f es cero . Para el análisis se utiliza la ecuación (3.1.1.1) , que es aplicable a pozos direccionales .

3.1.2 CONSIDERANDO FLUIDOS NEWTONIANOS

El balance de fuerza fue aplicado a la posición local del recorte , por lo que es necesario determinar la distribución de la velocidad a través del espacio anular, considerando el flujo de un fluido Newtoniano entre dos placas paralelas (Figura 2)²³ .

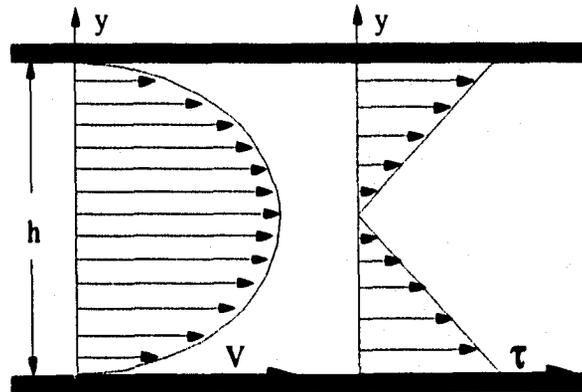


FIGURA 2. Geometría de flujo para un fluido Newtoniano en una rendija .

Para determinar los perfiles de velocidad del fluido y velocidad de corte local bajo estas condiciones se utilizan las ecuaciones propuestas por Bourgoyne²³ para flujo laminar :

$$V_f = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dL} (hy - y^2) \quad (3.1.2.1)$$

$$\gamma = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dL} (h - 2y) \quad (3.1.2.2)$$

la velocidad promedio del fluido por Bourgoyne²³ :

$$V_a = \frac{h^2}{12\mu} \frac{dP}{dL} \quad (3.1.2.3)$$

de (3.1.2.3)

$$\frac{dP}{dL} = \frac{12\mu V_a}{h^2} \quad (3.1.2.4)$$

sustituyendo (3.1.2.4) en (3.1.2.1)

$$V_f = 6 V_a \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (3.1.2.5)$$

y considerando que la velocidad de corte local del fluido $\gamma = \frac{dV_f}{dy}$

$$\gamma = \frac{6 V_a}{h} \left(1 - \frac{2y}{h}\right) \quad (3.1.2.6)$$

haciendo la relación $V_f \gamma^{0.5}$

$$V_f \gamma^{0.5} = 6 V_a \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \left[6 \frac{V_a}{h} \left(1 - \frac{2y}{h}\right)\right]^{0.5} \quad (3.1.2.7)$$

sustituyendo (3.1.5) y (3.1.3) en (3.1.1.1) y despejando $V_f \gamma^{0.5}$

$$V_f \gamma^{0.5} = \frac{0.6192 \pi D_s (\rho_s - \rho_f) g \text{sen} \phi}{6 \rho_f^{0.5} \mu^{0.5}} \quad (3.1.2.8)$$

en unidades del SI :

$$V_f \gamma^{0.5} = \frac{6.03456 D_s (\rho_s - \rho_f) \text{sen} \phi}{\rho_f^{0.5} \mu^{0.5}} \quad (3.1.2.9)$$

considerando que el balance de fuerzas se efectúa en el centro del recorte :

$$y = \frac{1}{2} D_s \quad (3.1.2.10)$$

igualando (3.1.2.7) y (3.1.2.8) , sustituyendo ec (3.1.2.10) y considerando que $V_s = V_c$.

$$V_c = \frac{0.0924 \left[\pi (\rho_s - \rho_f) g \text{sen} \phi \right]^{\frac{2}{3}} h^2}{\left[\rho_f \mu (2h - D_s)^2 (h - D_s) \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (3.1.2.11)$$

y en unidades del SI :

$$V_c = \frac{.1661480488 \left[(\rho_s - \rho_f) \text{sen} \phi \right]^{\frac{2}{3}} h^2}{\left[\rho_f \mu (2h - D_s)^2 (h - D_s) \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (3.1.2.12)$$

3.1.3 CONSIDERANDO FLUIDOS PLÁSTICOS DE BINGHAM

Para representar el flujo de un fluido Plástico de Bingham en el espacio anular, se utiliza la geometría formada por dos placas paralelas (Fig. 3).

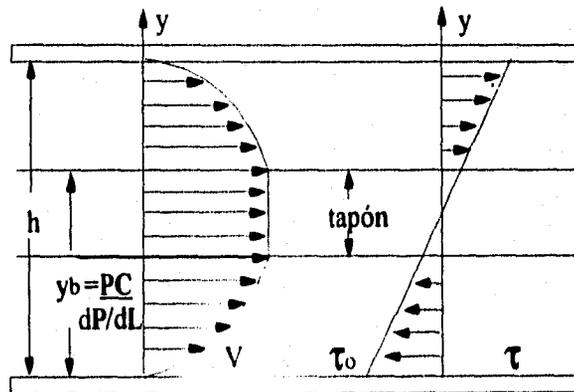


FIGURA 3. Geometría de flujo para un fluido Plástico de Bingham en una rendija .

Utilizando la geometría mostrada permite que las ecuaciones de flujo sean mucho más simples de usar, los perfiles de velocidad del fluido y velocidad de corte local en flujo laminar se determinan de acuerdo a Burgoyne²³ :

$$V_f = \frac{1}{2VP} \frac{dP}{dL} (h^2 - y^2 + 2y_b y - 2y_b h) \quad (3.1.3.1)$$

rearrreglando términos

$$V_f = \frac{h^2}{2VP} \frac{dP}{dL} \left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right) + \frac{y_b}{VP} \frac{dP}{dL} (y - h) \quad (3.1.3.2)$$

si

$$y_b = \frac{PC}{\frac{dP}{dL}} \quad (3.1.3.3)$$

sustituyendo (3.1.3.3) en (3.1.3.2)

$$V_f = \frac{h^2}{2VP} \frac{dP}{dL} \left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right) - h \frac{PC}{VP} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (3.1.3.4)$$

en unidades del SI

$$V_f = 0.03 \frac{h^2}{VP} \frac{dP}{dL} \left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right) - 60h \frac{PC}{VP} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (3.1.3.5)$$

si la velocidad de corte, $\gamma = \frac{dV_f}{dy}$

$$\gamma = \frac{PC}{VP} - \frac{y}{VP} \frac{dP}{dL} \quad (3.1.3.6)$$

en unidades del SI

$$\gamma = 1000 \frac{PC}{VP} - \frac{y}{VP} \frac{dP}{dL} \quad (3.1.3.7)$$

considerando la velocidad promedio del fluido de Bird²⁴

$$V_a = \frac{h\tau_0}{3VP} \left(1 - \frac{3PC}{2\tau_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{PC}{\tau_0}\right)^3\right) \quad (3.1.3.8)$$

en unidades del SI

$$V_a = 20 * \frac{h\tau_0}{VP} \left(1 - \frac{3PC}{2\tau_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{PC}{\tau_0}\right)^3\right) \quad (3.1.3.9)$$

donde en unidades del SI el esfuerzo de corte en la pared esta dado por :

$$\tau_0 = 0.001 * h \frac{dP}{dL} \quad (3.1.3.10)$$

considerando que el balance de fuerzas se efectua en el centro del recorte

$$y = h - \frac{1}{2} D_s \quad (3.1.3.11)$$

Para obtener el valor de la velocidad crítica , se requiere emplear un programa de computo para encontrarla por ensaye y error , el programa consiste de los siguientes pasos :

- 1.- Leer D_s , PC , VP , ángulo de desviación ϕ , D_h , D_{op} , ρ_f , ρ_s .
- 2.- Considerar una caída de presión inicial .
- 3.- Calcular la velocidad local del fluido en $y = h - 0.5 D_s$, ec.(3.1.3.5) .
- 4.- Calcular la velocidad de corte local en $y = h - 0.5 D_s$, ec. (3.1.3.7) .
- 5.- Calcular $V_f \gamma^{0.5}$ utilizando los valores obtenidos en paso 3 y 4 .
- 6.- Calcular $V_f \gamma^{0.5}$ utilizando la ecuación (3.1.2.9) .
- 7.- Comparar valor del paso 5 con 6 , si valor del paso 5 = paso 6 , ir al paso 10 .
- 8.- Si el valor del paso 5 \gg paso 6 , entonces disminuir la caída de presión y regresar al paso 3 .
- 9.- Si el valor del paso 5 \ll paso 6 , entonces incrementar la caída de presión y regresar al paso 3 .
- 10.- Utilizar la ecuación (3.1.3.10) para calcular el esfuerzo de corte en la pared .
- 11.- Utilizar la ecuación (3.1.3.9) para calcular la velocidad promedio , la cual será la velocidad crítica de depositación del fluido .

Con el procedimiento anterior se obtiene el perfil de velocidades en la Región I , cuando se encuentre en la región de flujo tapón (Región II) Figura 4 , el procedimiento anterior puede fallar . Por lo que al caer en la región de flujo tapón , donde la velocidad de corte es cero se partirá de la ecuación (3.1.3.7) y se calculara la velocidad como si se evaluara en el siguiente punto :

$$y = h - \frac{1}{2} D_s = 1000 \frac{PC}{dP/dL} \quad (3.1.3.10)$$

Además se debe de considerar que cuando la región de flujo tapón llene el espacio anular no habrá flujo , por lo cual se debe evaluar la velocidad con el valor de "y" dado por la ecuación (3.1.3.10) pero manteniendo constante la caída de presión .

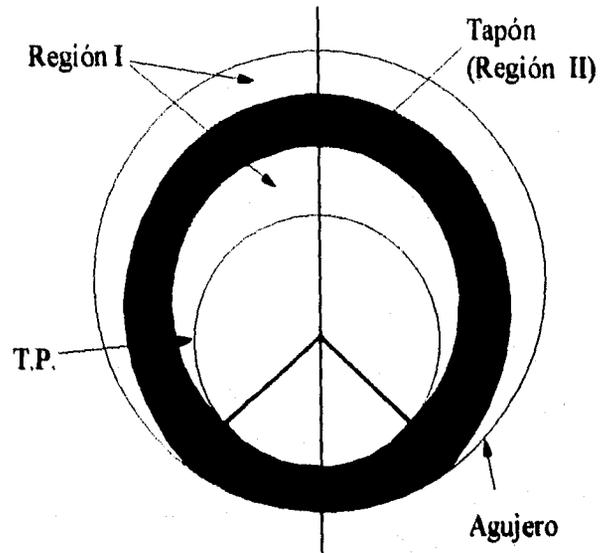


FIGURA 4. Regiones de flujo en el espacio anular para un fluido Plástico de Bingham

3.1.4 CONSIDERANDO FLUIDOS DE LEY DE POTENCIA

El flujo anular de un fluido de Ley de Potencia también se puede representar como flujo entre dos placas paralelas (Figura 5)²³.

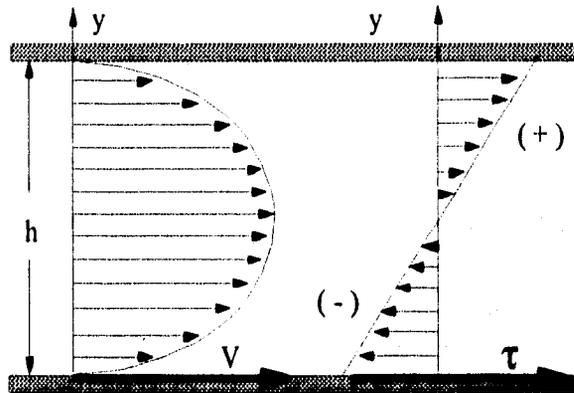


FIGURA 5. Geometría de flujo para un fluido Ley de Potencia en una rendija .

Los perfiles de velocidad del fluido y velocidad de corte en flujo laminar se determinan a partir de las siguientes ecuaciones dadas por Burgoyne²³ :

$$V_r = 60 \frac{\left(\frac{1}{K} \frac{dP}{dL} \right)^{1/n}}{\left(1 + \frac{1}{n} \right)} \left[\left(\frac{h}{2000} \right)^{1+1/n} - \left(\frac{h}{2000} - \frac{y}{1000} \right)^{1+1/n} \right] \quad (3.1.4.1)$$

Si la velocidad de corte, $\gamma = \frac{dV_r}{dy}$

$$\gamma = \left(\frac{h}{2000K} \frac{dP}{dL} \right)^{1/n} \quad (3.1.4.2)$$

considerando la velocidad promedio del fluido³³ :

$$V_a = 60 \frac{\left(\frac{1}{K} \frac{dP}{dL} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{h}{1000} \left(1 - \frac{1}{n} \right)}{2^{\frac{1}{n}} \left(4 + \frac{2}{n} \right)} \dots (3.1.4.3)$$

Para poder determinar la velocidad crítica se hace uso de un programa de cómputo para resolver por ensaye y error dicha incógnita .

- 1.- A partir de las diferentes lecturas de los esfuerzos de corte y velocidad de corte determinados en un viscosímetro rotacional se obtienen las constantes n y K .
- 2.- Leer D_s , ϕ , D_h , D_{op} , ρ_f , ρ_s .
- 3.- Considerar una caída de presión inicial .
- 4.- Calcular la velocidad local del fluido en $y = h - 0.5 D_s$, ec.(3.1.4.1) .
- 5.- Calcular la velocidad de corte local en $y = h - 0.5 D_s$, ec. (3.1.4.2) .
- 6.- Calcular $V_f \gamma^{0.5}$ utilizando los valores obtenidos en paso 4 y 5 .
- 7.- Calcular $V_f \gamma^{0.5}$ utilizando la ecuación (3.1.2.9) .
- 8.- Comparar valor del paso 6 con 7 , si valor del paso 6 = paso 7 , entonces caída de presión supuesta es correcta , ir al paso 11 .
- 9.- Si el valor del paso 6 \gg paso 7 , entonces disminuir la caída de presión y regresar al paso 4 .
- 10.- Si el valor del paso 6 \ll paso 7 , entonces incrementar la caída de presión y regresar al paso 4 .
- 11.- Utilizar la ecuación (3.1.4.3) para calcular la velocidad promedio , la cual será la velocidad crítica de depositación del fluido .

3.1.5 CONSIDERANDO LA FORMA DEL RECORTE

El diámetro equivalente de un recorte de forma no-esférica se considera igual al diámetro de una esfera cayendo a la misma velocidad del recorte en el mismo fluido. Donde la velocidad de asentamiento de Moore²⁵ :

$$V_s = \left[\frac{4D_s(\rho_s - \rho_f)g}{3C_d\rho_f} \right]^{1/2} \quad (3.1.5.1)$$

los parámetros comunes en la ecuación anterior entre el recorte y una esfera son V_s , ρ_s , ρ_f . Igualando la ecuación (3.1.5.1) para el recorte y la esfera, nos queda la siguiente relación:

$$\left(\frac{D_s}{C_d} \right)_{\text{recorte}} = \left(\frac{D_s}{C_d} \right)_{\text{esfera}} \quad (3.1.5.2)$$

donde

$$(C_d)_{\text{recorte}} = \frac{22}{R_e^{0.5}} \quad (3.1.5.3)$$

$$(C_d)_{\text{esfera}} = \frac{18.5}{R_e^{0.6}} \quad (3.1.5.4)$$

considerando

$$(R_e)_{\text{esfera}} = (R_e)_{\text{recorte}} \frac{(D_s)_{\text{esfera}}}{(D_s)_{\text{recorte}}} \quad (3.1.5.5)$$

combinando (3.1.5.3), (3.1.5.4) y (3.1.5.5)

$$\frac{(D_s)_{\text{esfera}}}{(D_s)_{\text{recorte}}} = \frac{0.8974}{(R_e)_{\text{recorte}}^{0.0625}} \quad (3.1.5.6)$$

3.1.6 CONSIDERANDO LA EXCENTRICIDAD DE LA TUBERÍA

El estudio del flujo de fluidos en espacios anulares excéntricos, indica que los valores de velocidad son disminuidos considerablemente en la región reducida del espacio anular excéntrico, por lo tanto es importante considerar este efecto para el análisis de la velocidad crítica. Considerando el flujo anular como flujo entre dos placas paralelas lo cual permite utilizar las ecuaciones de flujo presentadas anteriormente, la excentricidad del espacio anular queda representada por una rendija rectangular como se muestra en la Figura 6 de Iyoho²⁶.

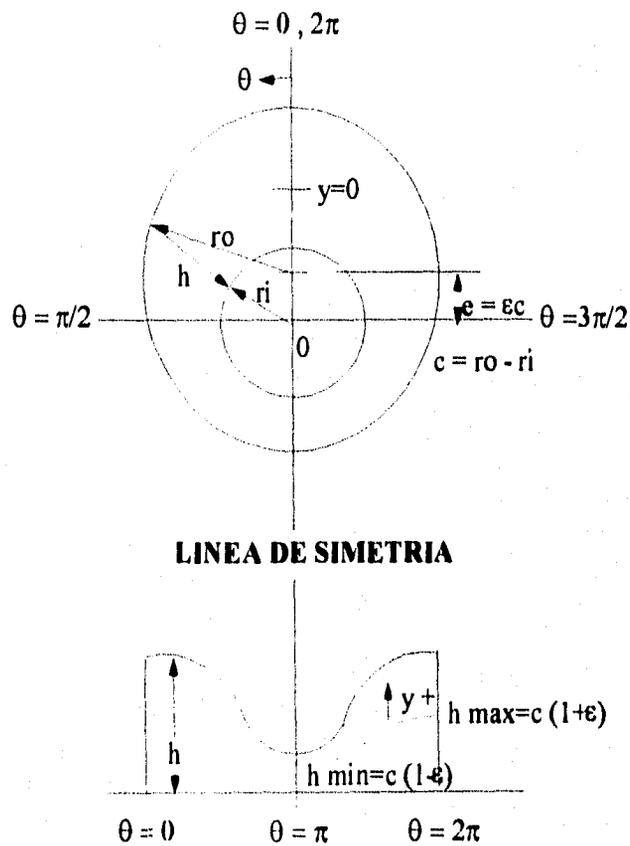


FIGURA 6 Rendija equivalente para espacios anulares excéntricos

La excentricidad , $\epsilon = 2e/dh$ es adimensional , donde e es la compensación entre los centros de la tubería interna y externa , dh es el diámetro hidráulico ($D_h - D_{op}$) y $c = (D_h - D_{op}) / 2$.

Para el análisis que aquí se presenta , se hará uso de la siguiente expresión dada por Iyoho²⁶ :

$$h = \left(\frac{D_h^2}{4} - \epsilon^2 c^2 \sin^2 \theta \right)^{1/2} - \frac{D_{op}}{2} + \epsilon c \cos \theta \quad \dots (2.1.6.1)$$

sustituyendo la ecuación anterior en cualquiera de las ecuaciones de flujo desarrolladas anteriormente , se obtiene la velocidad en cualquier punto en un espacio anular excéntrico definido por las coordenadas "y" y " θ ".

3.2 CONDICIONES PROMEDIO FLUIDO-RECORTE

En esta parte se determinará la velocidad crítica empleando las propiedades promedio de la dinámica fluido-recorte . Se considera que el transporte de recortes es similar al transporte de mezclas , por lo tanto se empleará el concepto de número de índice de flujo (NIF) dado por Zandi y Govatos²⁷ con el cual se identificará el régimen de flujo :

$$NIF = \frac{Va^2 \sqrt{C_D}}{C_v Dg(\gamma_s - 1)} \quad (3.2.1)$$

En unidades del SI:

$$NIF = \frac{Va^2 \sqrt{C_D}}{35.316 C_v Dg(\gamma_s - 1)} \quad (3.2.2)$$

En su trabajo Zandi y Govatos²⁷ encontraron que para valores de NIF mayores de 40 , ocurre una suspensión total de los recortes ,por lo tanto como el objetivo es predecir la velocidad crítica , entonces se considera NIF=40 .

3.2.1 CONSIDERANDO EL TAMAÑO DEL ESPACIO ANULAR

El término "D" que se presenta en la ecuación (3.2.2) se reemplaza por el diámetro hidráulico del espacio anular²³ que es igual a $0.816(D_h - D_{op})$.

3.2.2 CONSIDERANDO EL ÁNGULO DE INCLINACIÓN

Para considerar el ángulo de inclinación , se debe de considerar el efecto lateral del peso efectivo del recorte en el fluido , por lo cual el término "g" de la ecuación (3.2.2) , es afectado por $\text{sen}\phi$.

3.2.3 CONSIDERANDO LA DENSIDAD DEL FLUIDO

El modelo original utiliza la densidad relativa definida como la relación entre la densidad del recorte y la densidad del agua . Para corregir este problema , la densidad relativa será reemplazada por la relación entre la densidad del recorte y la densidad del fluido utilizado .

3.2.4 APLICACIÓN DE LAS CONSIDERACIONES ANTERIORES

Aplicando las consideraciones anteriores en la ecuación (3.2.2) , está queda expresada en unidades del SI como

$$NIF = \frac{Va^2 \rho_f \sqrt{C_D}}{.28817856 C_v (Dh - Dop) (\rho_s - \rho_f) \text{sen } \phi} \quad (3.2.4.1)$$

considerando $NIF = 40$ y $V_a = V_c$

$$V_c = \left[\frac{11.5271424 C_v (Dh - Dop) (\rho_s - \rho_f) \text{sen } \phi}{\rho_f \sqrt{C_D}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.4.2)$$

3.2.5 CONSIDERANDO EL COEFICIENTE DE ARRASTRE

En este punto se evaluará el coeficiente de arrastre del recorte, C_D , que aparece en la ecuación (3.2.4.2) para los regímenes de flujo laminar, transitorio y turbulento, empleando la correlación de Moore²⁵.

cálculo del Número de Reynolds :

$$NREP = \frac{\rho_f D_s V_s}{0.06 \mu_a} \quad (3.2.5.1)$$

donde

$$V_s = 6.8620 \left[\frac{D_s (\rho_s - \rho_f)}{C_D \rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.5.2)$$

cálculo de la viscosidad aparente empleando el método de Dodge y Metzner²⁸ :

$$\mu_a = \frac{k}{.144} \left(\frac{0.72 (D_h - D_{op})}{V_c} \right)^{1-n} \left(\frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208} \right)^n \quad (3.2.5.3)$$

$$n = 3.32 \log \left(\frac{2VP + PC}{VP + PC} \right) \quad (3.2.5.4)$$

$$k = \frac{510(PC + VP)}{511^n} \quad (3.2.5.5)$$

Análisis para los tres regímenes de flujo ,laminar , transitorio y turbulento :

RÉGIMEN LAMINAR :

Se considera laminar si $NREP < 3$

$$C_D = \frac{40}{NREP} \quad (3.2.5.6)$$

sustituyendo (3.2.5.1) en (3.2.5.6)

$$C_D = \frac{2.4\mu_a}{\rho_f D_s V_s} \quad (3.2.5.7)$$

sustituyendo (3.2.5.2) en (3.2.5.7)

$$C_D = \frac{0.34975\mu_a}{\rho_f D_s} \left[\frac{C_D \rho_f}{D_s (\rho_s - \rho_f)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

rearrreglando términos

$$\sqrt{C_D} = \frac{0.34975\mu_a}{\rho_f^{\frac{1}{2}} D_s^{\frac{3}{2}} (\rho_s - \rho_f)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.2.5.8)$$

sustituyendo (3.2.5.8) en (3.2.4.2)

$$V_s = \left[\frac{32.95822 C_v (D_h - D_{op}) (\rho_s - \rho_f)^{1.5} D_s^{1.5} \text{sen}\phi}{\rho_f^{0.5} \mu_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.5.9)$$

RÉGIMEN TRANSITORIO

Se considera transitorio si $3 < NREP < 300$

$$C_D = \frac{22}{\sqrt{NREP}} \quad (3.2.5.10)$$

sustituyendo (3.2.5.1) en (3.2.5.10)

$$C_D = \frac{89.815\mu_a^{0.5}}{(\rho_f D_s V_s)^{0.5}} \quad (3.2.5.11)$$

sustituyendo (3.2.5.2) en (3.2.5.11)

$$C_D = \frac{34.2865\mu_a^{0.5} C_D^{0.25} \rho_f^{0.25}}{\rho_f^{0.5} D_s^{0.5} D_s^{0.25} (\rho_s - \rho_f)^{0.25}}$$

rearrreglando términos

$$\sqrt{C_D} = \frac{10.554\mu_a^{0.3333}}{\rho_f^{0.1667} D_s^{0.5} (\rho_s - \rho_f)^{0.1667}} \quad (3.2.5.12)$$

sustituyendo (3.2.5.12) en (3.2.4.2)

$$V_c = \left[\frac{1.092205 C_v (D_h - D_{op}) (\rho_s - \rho_f)^{1.1667} D_s^{0.5} \text{sen}\phi}{\rho_f^{0.8333} \mu_a^{0.3333}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.5.13)$$

RÉGIMEN TURBULENTO

Se considera turbulento si $NREP > 300$

$$C_D = 1.5 \quad (3.2.5.14)$$

sustituyendo ec. (3.2.5.14) en (3.2.4.2)

$$V_c = \left[9.41187039 \frac{C_v (D_h - D_{op}) (\rho_s - \rho_f) \text{sen}\phi}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.5.15)$$

3.2.6 CONSIDERANDO EL RITMO DE PENETRACIÓN

Como se podrá observar las ecuaciones (3.2.5.9), (3.2.5.13) y (3.2.5.15) aún no se pueden resolver ya que están en función del término C_v , el cual corresponde a la concentración volumétrica es decir la relación del volumen de sólidos y el volumen de mezcla. Por lo tanto para determinar este término se hará uso del desarrollo presentado por Larsen *et al*²⁹ el cual utiliza el ritmo de penetración, ROP:

Considerando un balance másico en los recortes :

$$\text{Masa generada por la barrena} = \text{Masa transportada por el lodo} \quad (3.2.6.1)$$

$$\gamma_r Q_{inj} = V_r A_n C_v \gamma_r \quad (3.2.6.2)$$

$$V_r = Q_{inj} / A_n C_v \quad (3.2.6.3)$$

Convirtiendo Q_{inj} (gasto de inyección de recortes) a ROP :

$$ROP = \frac{Q_{inj}}{A_h} \quad (3.2.6.4)$$

despejando Q_{inj} de (3.2.6.4) y sustituyendo en (3.2.6.3)

$$V_r = \frac{ROP * A_h}{0.6 * A_n * C_v} \quad (3.2.6.5)$$

donde

$$A_h = \frac{\pi * D_h^2}{4} \quad \text{y} \quad A_n = \frac{\pi(D_h^2 - D_{op}^2)}{4}$$

sustituyendo en (3.2.6.5) y arreglando

$$V_r = \frac{ROP}{0.6 * \left(1 - \left(\frac{D_{op}}{D_h}\right)^2\right) C_v} \quad (3.2.6.6)$$

considerando la siguiente ecuación²⁹ :

$$V_r = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{D_{op}}{D_b}\right)^2\right) \left(0.035 + \frac{0.303}{ROP}\right)} \quad (3.2.6.7)$$

igualando (3.2.6.6) y (3.2.6.7) resolviendo para C_v

$$C_v = 0.0583333 ROP + 0.505 \quad (3.2.6.8)$$

3.3 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA CAMA DE RECORTES

Cuando el gasto de bombeo, Q_b , no es igual o mayor que el gasto crítico, Q_c , se forma una deposición de recortes en la parte inferior del agujero, lo cual se conoce generalmente como cama de recortes (Figura 7)²⁹, para conocer el espesor de la cama mencionada, se parte de las siguientes consideraciones :

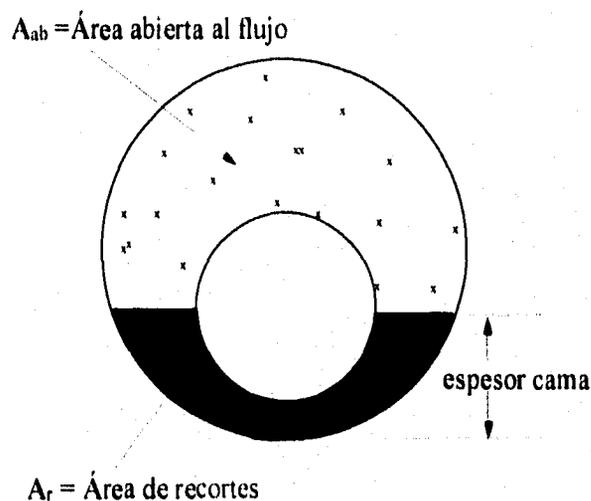


FIGURA 7. Cama de recortes y distribución de área en el espacio anular .

En términos del gasto de bombeo y de la correspondiente área abierta al flujo se tiene :

$$V_{ab} = V_c \quad (3.3.1)$$

$$\frac{Q_B}{A_{ab}} = \frac{Q_C}{A_{an}} \quad (3.3.2)$$

$$A_r = A_{an} - A_{ab} \quad (3.3.3)$$

despejando A_{ab} de ec (3.3.2) y sustituyendo en ec (3.3.3)

$$A_r = A_{an} \left(1 - \frac{Q_B}{Q_C} \right) \quad (3.3.4)$$

el área de recortes encontrada se transforma en altura , para más detalles revisar la subrutina "cálculo del gasto crítico, relación de suspensión y espesor de la cama" listada en el Apéndice B , basada en el trabajo desarrollado por la Missouri Water Well & Pump Contractors Assn., Inc.

RT , es la relación de suspensión dada por la siguiente ecuación²⁹ :

$$RT = \frac{Q_B}{Q_C} \quad (3.3.5)$$

$$RT = \frac{Q_B}{Q_C} = \frac{Q_B}{V_c (D_h^2 - D_{op}^2) \frac{\pi}{4}} \quad (3.3.6)$$

donde para cada régimen de flujo se obtiene una relación RT

Si $RT \geq 1$ no existe cama de recortes.

RÉGIMEN LAMINAR

sustituyendo ec (3.2.5.9) en (3.3.6)

$$RT = \left[\frac{40.4 C_v (D_h - D_{op}) (\rho_s - \rho_l)^{1/2} D_s^{1/2} \text{sen } \phi}{\rho_l^{0.5} \mu_a} \right]^2 \frac{4 Q_B}{\pi (D_h^2 - D_{op}^2)} \quad (3.3.7)$$

RÉGIMEN TRANSITORIO

sustituyendo ec (3.2.5.13) en (3.3.6)

$$RT = \left[\frac{133.861 C_v (D_h - D_{op}) (\rho_s - \rho_f)^{1.1667} D_s^{0.5} \text{sen} \phi}{\rho_f^{0.8333} \mu_a^{0.3333}} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{4Q_B}{\pi(D_h^2 - D_{op}^2)} \quad (3.38)$$

RÉGIMEN TURBULENTO

sustituyendo ec (3.2.5.15) en (3.3.6)

$$RT = \left[\frac{1153.415 C_v (D_h - D_{op}) (\rho_s - \rho_f) \text{sen} \phi}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{4Q_B}{\pi(D_h^2 - D_{op}^2)} \quad (3.39)$$

3.4 DESARROLLO DEL PAQUETE COMPUTARIZADO

Para poder hacer uso del modelo desarrollado , se elaboró un programa de cómputo conversacional , el cual es muy fácil de usar por lo cual cualquier persona relacionada con la industria petrolera podrá hacer uso del mismo .

El paquete está programado en QBASIC y está construido en módulos el cual permite al usuario :

- * Calcular la velocidad crítica requerida para una eficiente limpieza del agujero para las condiciones operacionales dadas .
- * Simula los efectos de varios parametros de perforación en la limpieza de agujeros desviados .
- * Define el modelo reológico apropiado para los fluidos de perforación , de acuerdo a datos del viscosímetro ver Apéndice A

Los módulos del paquete son :

Módulo de excentricidad .

Genera los espacios entre placas debido a la excentricidad de la tubería .

Módulo reológico.

Determina cual será el modelo reológico más apropiado de acuerdo a las lecturas del viscosímetro , maneja los siguientes modelos , Newtoniano , Plástico de Bingham y Ley de Potencia (Apéndice A).

Módulo diámetro equivalente.

Calcula el diámetro equivalente de un recorte de acuerdo a la forma del mismo en función del número de Reynold de la partícula .

Módulo régimen de flujo..

Determina cual será el régimen de flujo más adecuado de acuerdo al número de Reynolds, lo cual nos dará el respectivo coeficiente de arrastre , manejando flujo laminar , transición y turbulento.

Módulo espesor, concentración de recortes.

Calcula el espesor y concentración de la cama de recortes , en caso de que el gasto de bombeo no sea mayor al gasto crítico .

Este programa es interactivo y es muy útil como una herramienta de diseño y análisis para la optimización del proceso de transporte de recortes . Las aplicaciones incluyen la selección de la más apropiada trayectoria del agujero así como la formulación adecuada de los fluidos de perforación óptimos para la eficiente limpieza del agujero. También es posible utilizarlo para analizar la sensibilidad de diferentes parámetros de perforación

4. VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 PROBAR MODELO A PARTIR DE UN RANGO DE DATOS

El comportamiento teórico de los modelos desarrollados será probado tomando como base resultados experimentales existentes . Al presentarse el caso en el cual el gasto de bombeo sea menor al gasto crítico calculado , se precipitarán los recortes a la parte inferior del agujero formando con ello una acumulación de recortes mejor conocida como cama de recortes , Esta tendrá una altura y una concentración , por lo que a partir de los modelos desarrollados se pueden determinar tales parámetros . Partiendo del trabajo experimental reportado por Tomren⁸ e Iyoho⁹ , el cual consta de 59 puntos como se muestra en la Tabla 1 , se observa en la Fig. 8 que las predicciones de los modelos aquí presentados son congruentes con los resultados experimentales .

A continuación se muestran los efectos de varios parámetros de perforación en la eficiencia de la limpieza del agujero , lo cual permite identificar el impacto originado por un cambio en cualquiera de ellos , considerando principalmente los siguientes :

- Ángulo del agujero
- Velocidad del fluido
- Propiedades del fluido (propiedades reológicas y densidad)
- Tamaño , forma y densidad del recorte
- Geometría del espacio anular
- Excentricidad
- Régimen de flujo
- Modelo reológico

TABLA No. 1 Datos de laboratorio encontrados por Iyoho y Tomren

IYOHO ⁹						
FLUIDO	VISCOCIDAD PLÁSTICA cP	PUNTO DE CEDENCIA Pa	VELOCIDAD MEDIA m/min	ÁNGULO DE DESVIACIÓN °	CONC. TOTAL %	RELACIÓN DE ALTURA CAMA/AGUJERO %
BENT. BAJA VISC.	3	.9579	34.93	40	16	38
			34.93	80	19	44
			34.93	90	28	50
			43.72	90	18.78	44
			52.31	80	13.6	31
			52.31	90	11	31
			61.1	90	8.54	25
			69.88	80	11	25
69.88	90	6.67	19			
BENT. ALTA VISC.	19	8.1423	34.93	40	16.2	38
			34.93	80	19.9	44
			43.72	40	10	19
			52.31	40	13.93	13
			52.31	80	9.5	38
			69.88	80	7	20
POLI-MÉRICO	14	6.705	26.15	20	10.1	19
			26.15	40	30.5	56
			34.93	20	5.89	6
			34.93	40	26.4	51
			34.93	60	24.8	50
			34.93	80	21.13	55
			43.72	40	17.3	44
			43.72	60	20.1	44
			43.72	80	18.68	47
			52.31	40	6.02	25
			52.31	60	14.1	38
			52.31	80	16.34	41
			61.1	60	10.66	25
			61.1	80	12.58	25
			69.88	60	8.33	19
69.88	80	9.48	12			

... continuación TABLA No. 1

TOMREN ³						
FLUIDO	VISCOSIDAD PLÁSTICA cP	PUNTO DE CEDENCIA Pa	VELOCIDAD MEDIA m/min	ÁNGULO DE DESVIACIÓN °	CONC. TOTAL %	RELACIÓN DE ALTURA CAMA/AGUJERO %
AGUA	1	0	34.93	40	28.94	56
			34.93	80	23.3	56
			52.31	80	16.02	44
			69.88	80	11.83	25
POLI-MÉRICO	14	6.705	26.15	40	30.5	56
			34.93	20	5.59	7
			34.93	40	26.44	50
			34.93	60	24.8	55
			34.93	80	21.13	55
			43.72	40	17.3	44
			43.72	60	20.1	44
			43.72	80	18.68	44
			52.31	60	14.1	38
			52.31	80	14.4	38
			61.1	60	10.66	25
			61.1	80	12.58	25
69.88	60	8.33	19			
69.88	80	9.48	20			

EFFECTO DE LA VELOCIDAD MEDIA DEL FLUIDO Y LA DESVIACIÓN DEL AGUJERO

Las Figuras 9 y 10 muestran el efecto de la velocidad media del fluido y la desviación del agujero en la concentración total de recortes. Como se puede observar, a mayor desviación y mayor velocidad media del fluido se obtiene una menor concentración de recortes. {Cabe recordar que la disminución en la concentración total de recortes es un buen indicador de la eficiencia de transporte del fluido de perforación}, además se puede observar que el fluido de perforación se comporta mejor

a bajos ángulos de desviación , y se observa concordancia de los resultados de los modelos con los resultados experimentales .

EFFECTO DE LA VISCOSIDAD Y DESVIACIÓN DEL AGUJERO

Las Figuras 11 y 12 muestran el efecto de la viscosidad del fluido y la desviación del agujero en la concentración total de recortes . Como puede observarse a partir de dos fluidos de perforación , en el mismo régimen de flujo , el fluido de mayor viscosidad da mejor comportamiento de transporte que el fluido de baja viscosidad .

EFFECTO DE LA VELOCIDAD MEDIA DEL FLUIDO Y LA DESVIACIÓN DEL AGUJERO

Las Figuras 13 y 14 muestran el efecto de la velocidad del fluido y la desviación del agujero en la relación altura del recorte/diámetro del agujero . Se observa que la relación de alturas se mantiene casi constante a partir de los 50 y 60 grados , siendo mayor la formación de la cama a bajas velocidades .

EFFECTO DEL TAMAÑO DEL RECORTE

La Figura 15 muestra el efecto del tamaño del recorte y la viscosidad del fluido sobre la velocidad crítica , como puede observarse los recortes de mayor tamaño requieren una mayor velocidad crítica , especialmente en fluidos de baja viscosidad .

EFFECTO DEL PUNTO DE CEDENCIA

La Figura 16 muestra el efecto del punto de cedencia del fluido , observándose que a mayores puntos de cedencia se tienen velocidades críticas menores .

EFFECTO DE LA DENSIDAD DEL FLUIDO

La Figura 17 muestra el efecto de la densidad del fluido en función de la velocidad crítica, logrando apreciar que tiene un efecto significativo, es decir en los pozos donde ya no se pueda aumentar el gasto de bombeo, aumentar la densidad del fluido puede ser una solución alternativa para ayudar a la limpieza del agujero, esto es debido principalmente a que al aumentar la densidad del fluido se incrementa la flotación de los recortes.

EFFECTO DE LA DENSIDAD DEL RECORTE

La Figura 18 muestra el efecto de la densidad específica del recorte, se puede observar que influye considerablemente en la velocidad crítica, un aumento en la densidad del recorte significa un aumento en la velocidad crítica, debido a que disminuye el factor de flotación. Es importante mencionar que este parámetro no es controlable, ya que depende de la formación perforada.

EFFECTO DEL RITMO DE PENETRACIÓN Y ÁNGULO DE DESVIACIÓN

La Figura 19 muestra el efecto del ritmo de penetración y ángulo de desviación en la velocidad crítica. De ella se observa que al tener un incremento en el ritmo de penetración se requiere un aumento en la velocidad crítica (debido a que la concentración de recortes es directamente proporcional al ritmo de penetración) manteniéndose aproximadamente constante después de los 70 grados de desviación.

EFFECTO DE LA EXCENTRICIDAD Y ÁNGULO DE DESVIACIÓN

Las Figuras 20 y 21 muestran el efecto de un espacio anular excéntrico y la desviación del agujero, observando que al existir una excentricidad se obtiene una mayor

velocidad crítica, dado que en el espacio reducido disminuye la velocidad pero en el espacio abierto se requiere una mayor velocidad crítica .

EFFECTO DEL RÉGIMEN DE FLUJO Y ÁNGULO DE DESVIACIÓN

La Figura 22 nos presenta el efecto de los regímenes de flujo , observando que un fluido viscoso requiere mayor velocidad crítica en régimen laminar , notando en este caso que el mejor régimen es el turbulento .

EFFECTO DEL MODELO REOLÓGICO Y ÁNGULO DE DESVIACIÓN

La Figura 23 presenta el efecto que se tiene al seleccionar o trabajar con un modelo reológico cualquiera, lo cual nos indica que tendremos grandes diferencias si trabajamos con el modelo Newtoniano , Plástico de Bingham o Ley de Potencia . Es importante señalar que el paquete desarrollado tiene un módulo que selecciona el modelo reológico apropiado de acuerdo a las lecturas del viscosímetro para un fluido de perforación .

4.2 COMPARACIÓN CON CORRELACIONES Y OTROS MODELOS EXISTENTES

En este trabajo se utilizaron las correlaciones empíricas de Iyoho⁹ y Becker¹⁴ , las cuales proporcionan el comportamiento de los recortes con respecto a varias variables , también se utilizó los datos obtenidos por Gavignet³⁰ .

CORRELACIÓN DE IYOHO

Esta correlación predice la velocidad media requerida .

Los parámetros incluidos en la correlación son :

- Régimen laminar y turbulento
- Ángulo de inclinación
- Concentración total de recortes
- Factor de corrección de área
- Gasto de bombeo
- Viscosidad efectiva

CORRELACIÓN DE BECKER

Esta correlación predice la velocidad media requerida .

Los parámetros incluidos en la correlación son:

- Velocidad media del fluido
- Concentración total de recortes
- Ángulo de inclinación
- Densidad del fluido
- Relación de diámetro tubería/diámetro agujero
- Excentricidad

MODELO GAVIGNET Y SOBEY

El modelo predice el gasto crítico , espesor de la cama de recortes y concentración de recortes .

Los parámetros que incluyen son:

- Diámetro del agujero
- Diámetro de la tubería
- Excentricidad
- Diámetro de la partícula
- Reología del fluido
- Velocidad media del fluido
- Densidad de la partícula y del fluido
- Ángulo de inclinación

Para mostrar el comportamiento de los nuevos modelos desarrollados se comparan con las correlaciones mencionadas arriba , presentándose los siguientes efectos :

EFFECTO DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN

Como se puede observar en las Figuras 24-27 los cinco métodos predicen el mismo efecto general de la desviación del agujero , es decir requieren mayor velocidad conforme se incrementa el ángulo de desviación . Observando que el modelo de Iyoho siempre se dispara con respecto a los otros métodos, principalmente al haber un cambio de diámetros, debido a que esto causa un aumento en el término de la viscosidad efectiva en su correlación lo cual hace que reduzca el gasto .

EFFECTO DEL TAMAÑO DEL ESPACIO ANULAR

Comparando las Figuras 24 y 25 para agua , 26 y 27 para polimérico conforme se aumenta el tamaño del espacio anular aumenta el gasto crítico , excepto para la correlación de Iyoho como se explico arriba .

EFECTO DE LA VISCOSIDAD

Comparando Figuras 28 y 29 , observamos que de acuerdo al régimen de flujo un fluido de baja viscosidad en flujo turbulento puede dar mejores resultados que un fluido de alta viscosidad en régimen laminar .

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Basado en los resultados del modelo se hacen las siguientes conclusiones :

- 1.- La velocidad media del fluido tiene gran influencia en la concentración total de recortes, a mayor velocidad media menor concentración de recortes, aunque si se tienen problemas de erosión en el agujero, caídas de presión o capacidad de bombas, la velocidad media (gasto bombas) deberá mantenerse lo más cercano posible al valor de la velocidad crítica, lo cual minimiza o elimina estos problemas.
- 2.- La densidad del fluido tiene un efecto significativo sobre la velocidad crítica, un aumento en la densidad del fluido genera una disminución en la velocidad crítica, esto es debido a que al aumentar la densidad, se incrementa el efecto de flotación de los recortes.
- 3.- La excentricidad de la tubería afecta el transporte de recortes, ya que una tubería excéntrica requiere mayor velocidad crítica debido al espacio abierto generado por la excentricidad.
- 4.- El ritmo de penetración afecta considerablemente a la velocidad crítica, ya que un aumento en el ritmo de penetración requiere una mayor velocidad crítica para desalojar los recortes, esto es debido a que la concentración de recortes es directamente proporcional al ritmo de penetración.
- 5.- Los efectos de los parámetros anteriores aumentan al relacionarlos con la desviación del pozo, el cual es un factor importante en el transporte de recortes llegando a empeorar conforme aumenta la desviación. Como esta es una variable

no controlable, el lodo y la hidráulica deben optimizarse para disminuir la formación de la cama de recortes.

- 6.- Existe una gran congruencia entre los resultados obtenidos con el modelo desarrollado y los resultados obtenidos de laboratorio y de otras correlaciones existentes. Lo cual nos da la confiabilidad del modelo ya que se realizaron bajo lineamientos y normas existentes.

5.2. RECOMENDACIONES

- 1.- Contemplar el régimen de flujo turbulento en el modelo puntual.
- 2.- Contemplar el modelo de Ley de Potencia con Punto de Cedencia en el modelo promedio.
- 3.- Ampliar el modelo para considerar entrada de gas y/o agua, o pérdida parcial de fluido.
- 4.- Contemplar el efecto de la rotación de la tubería en los modelos.
- 5.- Se recomienda efectuar mínimo 1 análisis granulométrico por cada barrena empleada, ya que actualmente no se tiene información del tamaño del recorte.
- 6.- Cuando se presenten problemas de precipitación de recortes y a la vez formación de una cama, deberá de analizarse en forma conjunta la influencia de las variables de perforación, para de esta manera saber cual atacar, siempre y cuando sea una variable controlable.
- 7.- Hacer el programa de cómputo más rápido a través de otro lenguaje.

NOMENCLATURA

A_{ab}	=	área abierta al flujo (mm^2)
A_h	=	área del agujero perforado (mm^2)
A_n	=	área del espacio anular TP-agujero (mm^2)
A_L	=	área proyectada del recorte en la dirección normal al flujo (mm^2)
A_r	=	área ocupada por los recortes en el espacio anular (mm^2)
C_D	=	coeficiente de arrastre (adim)
C_L	=	coeficiente de levantamiento (adim)
C_v	=	concentración volumétrica de recortes (%)
D	=	diámetro de la tubería para transporte de mezclas (mm)
D_h	=	diámetro del agujero (mm)
D_{op}	=	diámetro exterior de la tubería de perforación (mm)
D_s	=	diámetro del recorte (mm)
dP/dL	=	caída de presión por fricción (Pa/m)
f_s	=	coeficiente de fricción entre el recorte y pared del e.a. (adim)
F_D	=	fuerza de arrastre (Pa)
F_f	=	fuerza de fricción (Pa)
F_g	=	fuerza de gravedad (Pa)
F_{ga}	=	componente de la fza de gravedad paralela al eje del agujero (Pa)
F_{gva}	=	componente de la fza de gravedad perpendicular al eje del agujero (Pa)
F_L	=	fuerza de levantamiento (Pa)
g	=	aceleración debido a la gravedad (m/s^2)
h	=	distancia entre placas (mm)
K	=	índice de consistencia en el modelo de Ley de Potencia ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)
L	=	longitud axial de la sección del espacio anular (m)
n	=	índice de comportamiento de flujo (adim)
NREP	=	número de Reynold del recorte (adim)

NIF	= número de índice de flujo (adim)
PC	= punto de cedencia (Pa)
Q_B	= gasto de bombeo real (m^3/min)
Q_c	= gasto de bombeo crítico (m^3/min)
Q_{inj}	= gasto de inyección de recortes (m^3/min)
R_c	= número de Reynold (adim)
ROP	= ritmo de penetración de la barrena (m/hr)
RT	= relación de suspensión (fracción)
r_i	= radio exterior de la tubería (mm)
r_o	= radio del agujero (mm)
V_a	= velocidad media del fluido (m/min)
V_f	= velocidad local del fluido (m/min)
V_c	= velocidad crítica del fluido para mantener en suspensión los recortes (m/min)
V_s	= velocidad de asentamiento de los recortes (m/min)
V_r	= velocidad de viaje del recorte (m/min)
VP	= viscosidad plástica (cP)
y	= posición del recorte en la rendija (mm)
ϕ	= ángulo de desviación del agujero de la vertical (grados)
θ	= ángulo excéntrico definido en Figura 6 (grados)
μ	= viscosidad del fluido newtoniano (cP)
μ_a	= viscosidad aparente del fluido (cP)
ϵ	= excentricidad de la tubería de perforación (fracción)
ρ_s ó γ_r	= densidad del recorte (kg/m^3)
ρ_f	= densidad del fluido de perforación (kg/m^3)
τ_o	= esfuerzo de corte en la pared (Pa)
γ	= velocidad de corte local (s^{-1})
γ_s	= densidad relativa del recorte (adim)

REFERENCIAS

- 1.- Saeed Bin-Haddah A.: " Development of Models For Drill Cuttings Transport in Inclined Wells Based on Deposition Critical Velocity Concept" M.S. thesis, U. of Tulsa, Tulsa, OK (1988)
- 2.- Pigott, R. J. S.: " Mud flow in drilling , " Drill. and Prod. Prac., API (1941) 91-103.
- 3.- Hall, H. N., Thompson, H., and Nuss, F.: " Ability of drilling Mud to Lift Bit Cuttings," Trans., AIME (1950) 189, 35-46.
- 4.- Williams, C.C Jr. and Bruce, G.H.: " Carrying Capacity of Drilling Muds, " Trans., AIME (1951) 192,111-20.
- 5.- Hopkin, E.A.: " Factors Affecting Cuttings Removal During Rotary Drilling, " JPT (june 1967) 807-14 ; Trans., AIME , 240.
- 6.- Zeidler, H.U.: " Fluid and Drilled Particle Dynamics Related to Drilling Mud Carrying Capacity, " PhD dissertation , U. of Tulsa , Tulsa, OK (1974) .
- 7.- Boulet, D.P.: " A Study of the Applicability of the Zeidler Transport Model to Hole Geometry Variation, " MS thesis, U. of Tulsa, Tulsa, OK (1974) .
- 8.- Thomas, R.P., Azar ,J.J and Becker, T.E.: " Drill Pipe Eccentricity Effect on Drilled Cuttings Behavior, " JPT , (sept. 1982) 1929-1937 .
- 9.- Tomren, P.H.: " The Transport of Drilling Cuttings in an Inclined Eccentric Annulus, "M.S. thesis , U. of Tulsa, Tulsa, Oklahoma (1979) .
- 10.- Iyoho, A. W.: " Drilled -Cuttings Transport by Non-Newtonian Drilling Fluids through Inclined, Eccentric Annuli, " Ph.D. disretation, U. of Tulsa, Tulsa, Oklahoma (1980) .
- 11.-Okranji, S.S: " Mud Cuttings Transport Study in Directional Well Drilling, " TUDRP Post-Doctoral Report, U. of Tulsa Tulsa, Oklahoma (1981) .

- 12.-Becker, T.E.: " The Effects of Mud Weight and Hole Geometry Variations on Cuttings Transport in Directional Drilling, " M.S. thesis, U. of Tulsa, Tulsa, Oklahoma (1982) .
- 13.-Hareland, G.: " A Comparative Drilled Cuttings Transport Study of Invert Emulsion Mineral-Oil Base Muds and Water-Base Muds Having Similar Rheological Propierties in Directional Drilling, " M.S. thesis , U. of Tulsa, Tulsa, Oklahoma (1985) .
- 14.-Meano, W.: " Experimental Study of Shale Cuttings Transport in an Inclined Annulus Using Mineral Oil-base Mud, " M.S. thesis, U. of Tulsa, Tulsa , Oklahoma (1897) .
- 15.-Becker, T.E.: " Correlations for Drill-Cuttings Transport in Directional Well Drilling, " Ph.D.dissertation , U. of Tulsa, Tulsa, Oklahoma (1987) .
- 16.-Parker,D.J.: " An Experimental Study of the effect of Hole Washout and Cuttings Size on the Annular Hole Cleaning in Highly Deviated Wells, " M.S. thesis, U. of Tulsa, Tulsa, Oklahoma (1987) .
- 17.-Iyoho,A.W.: "A Computer Model for Hole Cleaning Analysis, " JPT (sept . 1988) 1183-1192 .
- 18.-Ford,J.T.,et al.: " Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Boreholes, " SPE 20421 (Copyright) , (1990) .
- 19.-Peden, J.M.,et al.: " Comprehensive Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Wells Includind the Effects of Rotation and Eccentricity. " SPE 20925 (Copyright) , (1990) .
- 20.-Sifferman, T.R. and Becker, T.E.: " Hole Cleaning in Full-Scall Inclined Wellbores. " SPE 20422, presented at the 1990 SPE 65th annual Technical Conference & Exhibition, New Orleans,Sept. 23-26 , 1990 .
- 21.-Hareland, G. et al.: " Comparison of Cuttings Transport in Directional Drilling Using Low-Toxicity Invert Emulsion Mineral-Oil-Based and Water-Based Muds, " SPI 25871 (Copyright) , (1993)
- 22.-Saffman, P.G.: " The Lift on a small sphere in a Slow Shear Flow, " J. Fluid Mech (1965), vol. 22, part 2, 385-400

- 23.-Bourgoyne,A.T.,et al.: " Applied Drilling engineering , " SPE textbook (1991) .
- 24.-Bird,R.B.,et al.: " The Rheology and flow of Viscoplastic Materials, " Review in Chemical Freud Publishing House Limited (1982) .
- 25.-Moore, P.L.: " Drilling Practices Manual , "
- 26.-Iyoho,A.W.: " An Accurate Slot-Flow Model for Non-Newtonian Fluid Flow Through Eccentric Annuli, " SPE (1981) .
- 27.-Zandi,I. and Govatos,G.: " Heterogeneous Flow of Solids in Pipelines, " J. Hydraulic Division, ASCE, vol. 93, HY 3 , (May 1967) , 145-157 .
- 28.-Dodge,D.W., and Metzner , A.B.: " Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems, " AIChE J. 5(2) (June 1959) 189-204 .
- 29.-Larsen,T., et al.: " Development of a New Cuttings Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal Wells, " paper SPE 25872 presented at the Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver , April 12-14, 1993 .
- 30.-Gavignet, A.A. and Sobey, I.J.: " A Model for the Transport of Cuttings in Highly Deviated Wells, " SPE 15417 (1986) .
- 31.-Monicard R.: "Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual, " Gulf Publishing Company , 1982 .

FIGURAS

RELACION ESPESOR-RECORTE / DIAMETRO AGUJERO

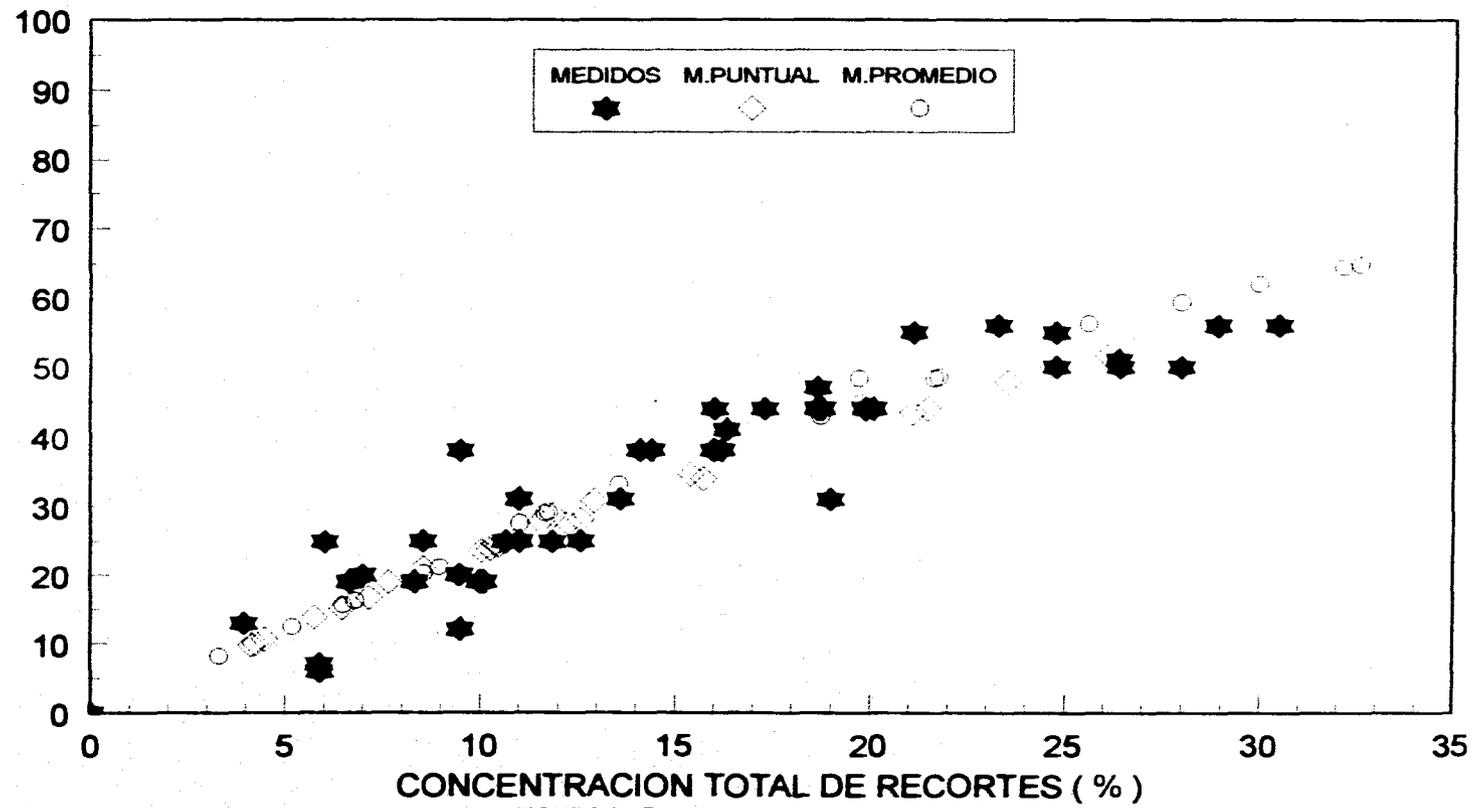


FIGURA 8. Espesor recorte / diámetro agujero y concentración total de recortes calculados contra medidos

CONCENTRACION TOTAL DE RECORTES (%)

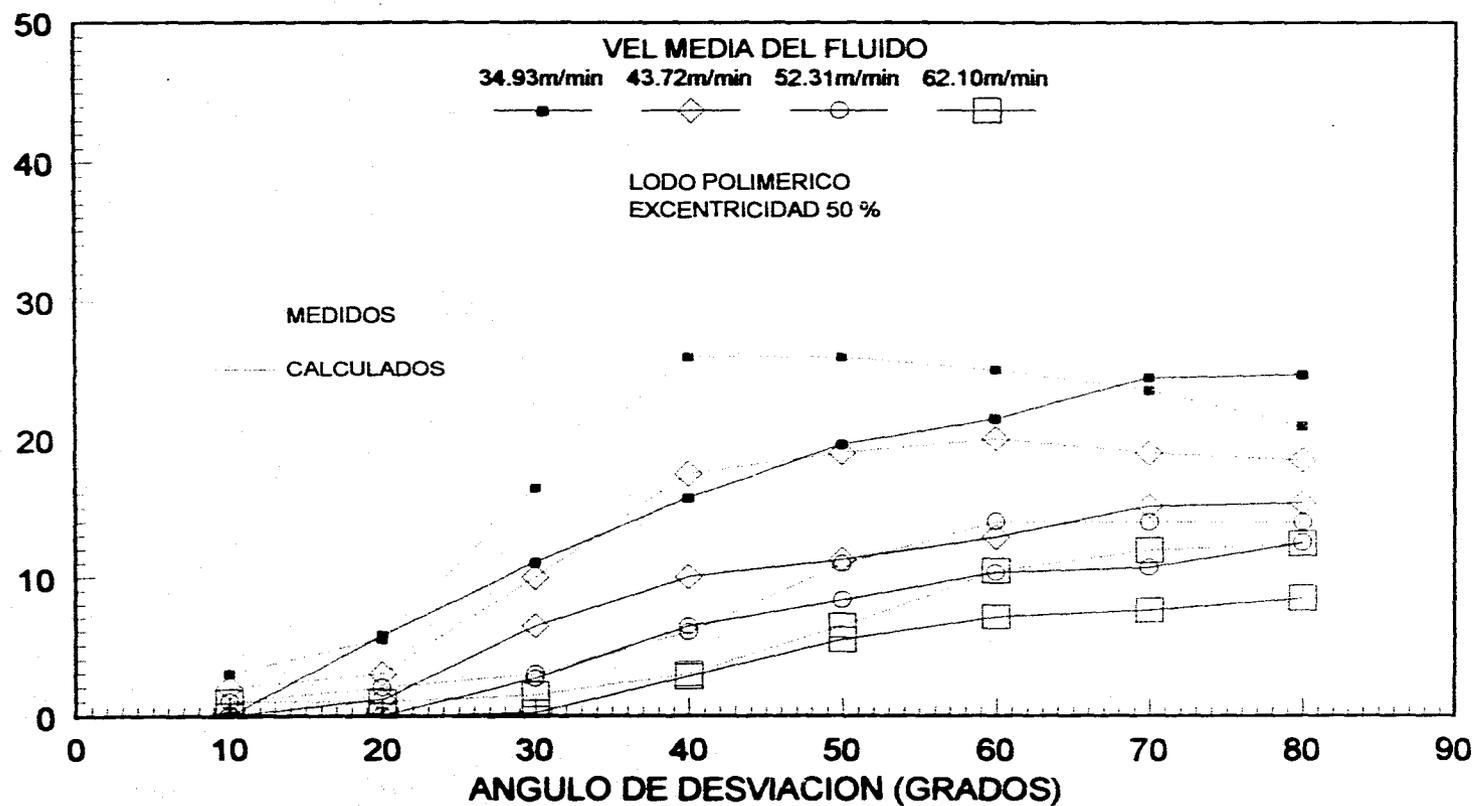


FIGURA 9. Variación de la concentración de recortes con la desviación del pozo . modelo puntual

CONCENTRACION TOTAL DE RECORTES (%)

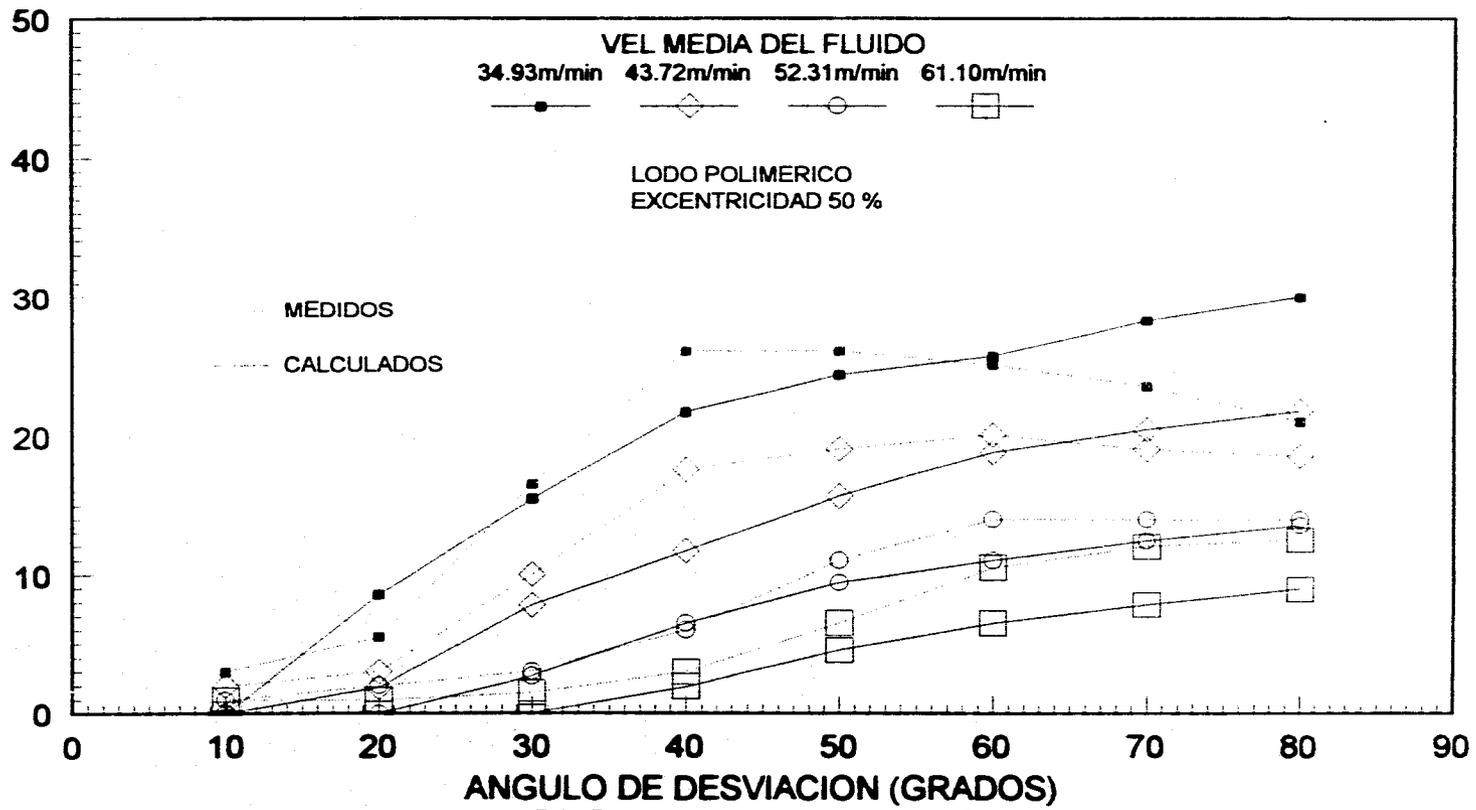


FIGURA 10 . Variación de la concentración de recortes con la desviación del pozo . modelo promedio

50

CONCENTRACION TOTAL DE RECORTES (%)

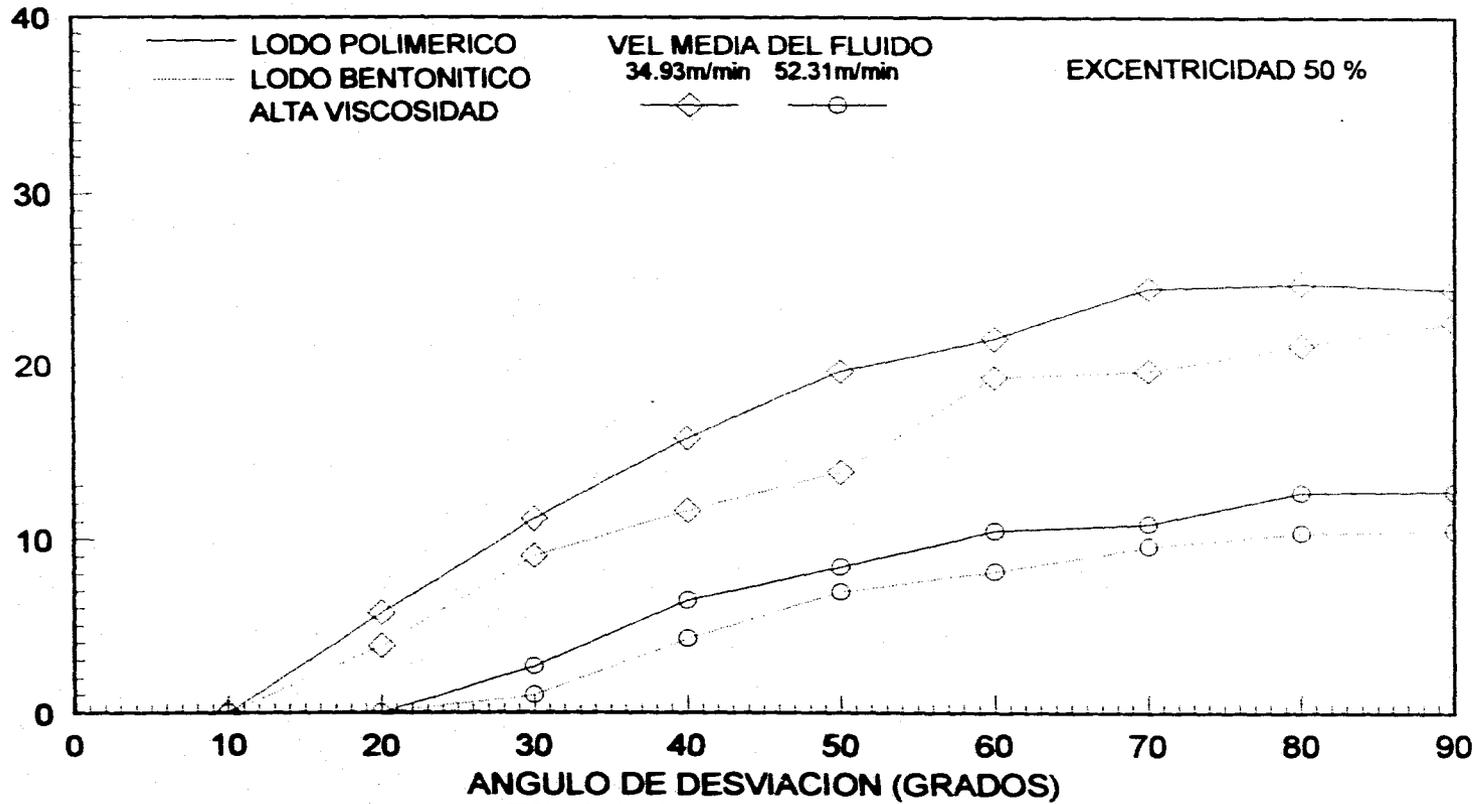
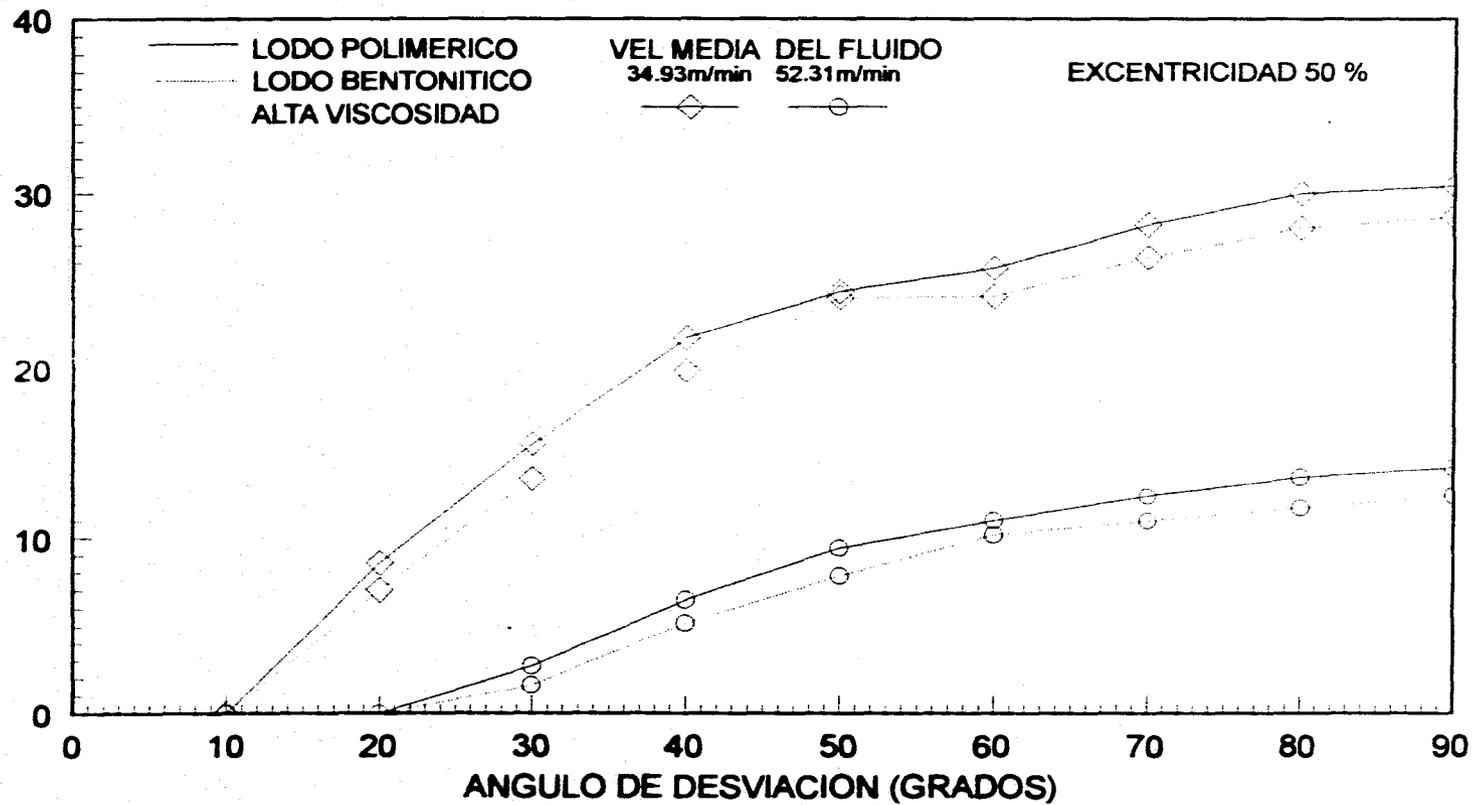


FIGURA 11. Efecto de la viscosidad y desviación del pozo en la concentración de recortes . modelo puntual

CONCENTRACION TOTAL DE RECORTES (%)



ANGULO DE DESVIACION (GRADOS)

FIGURA 12. Efecto de la viscosidad y desviación del pozo en la concentración de recortes . modelo promedio

REL ALTURA RECORTE/DIAMETRO AGUJERO (%)

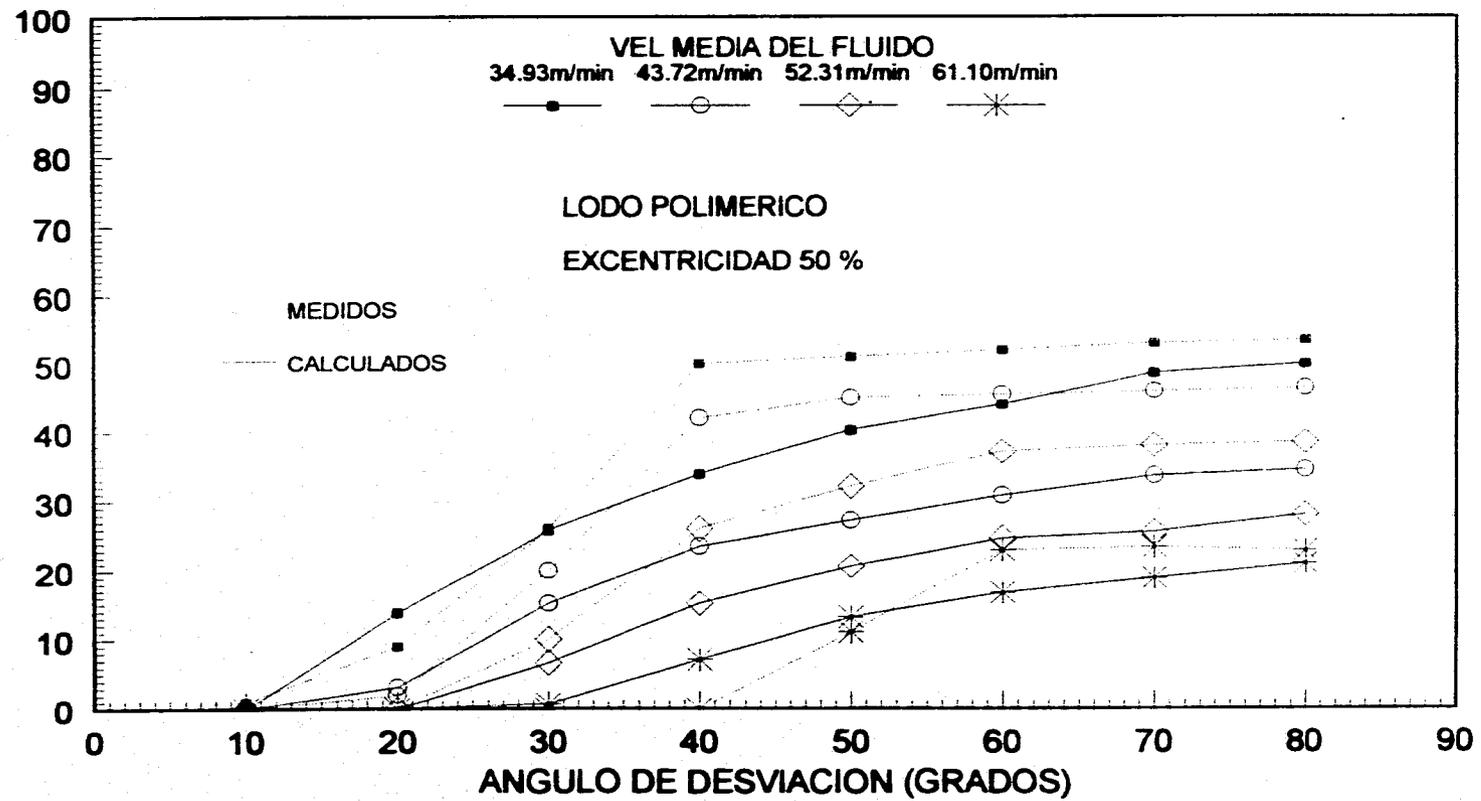


FIGURA 13. Variación de la altura de la cama de recortes con la desviación del pozo . modelo puntual

REL ALTURA RECORTE/DIAMETRO AGUJERO (%)

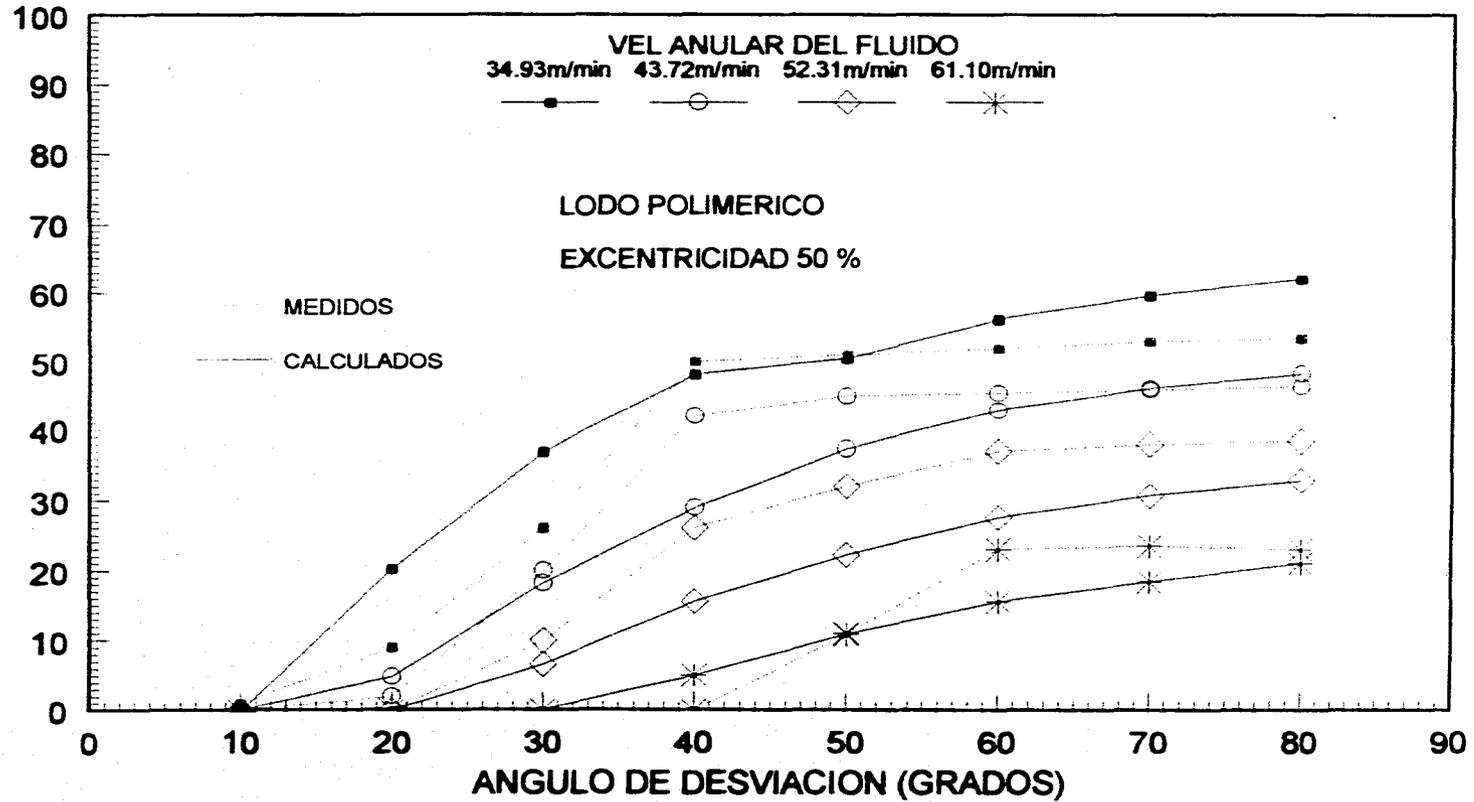


FIGURA 14. Variación de la altura de la cama de recortes con la desviación del pozo . modelo promedio

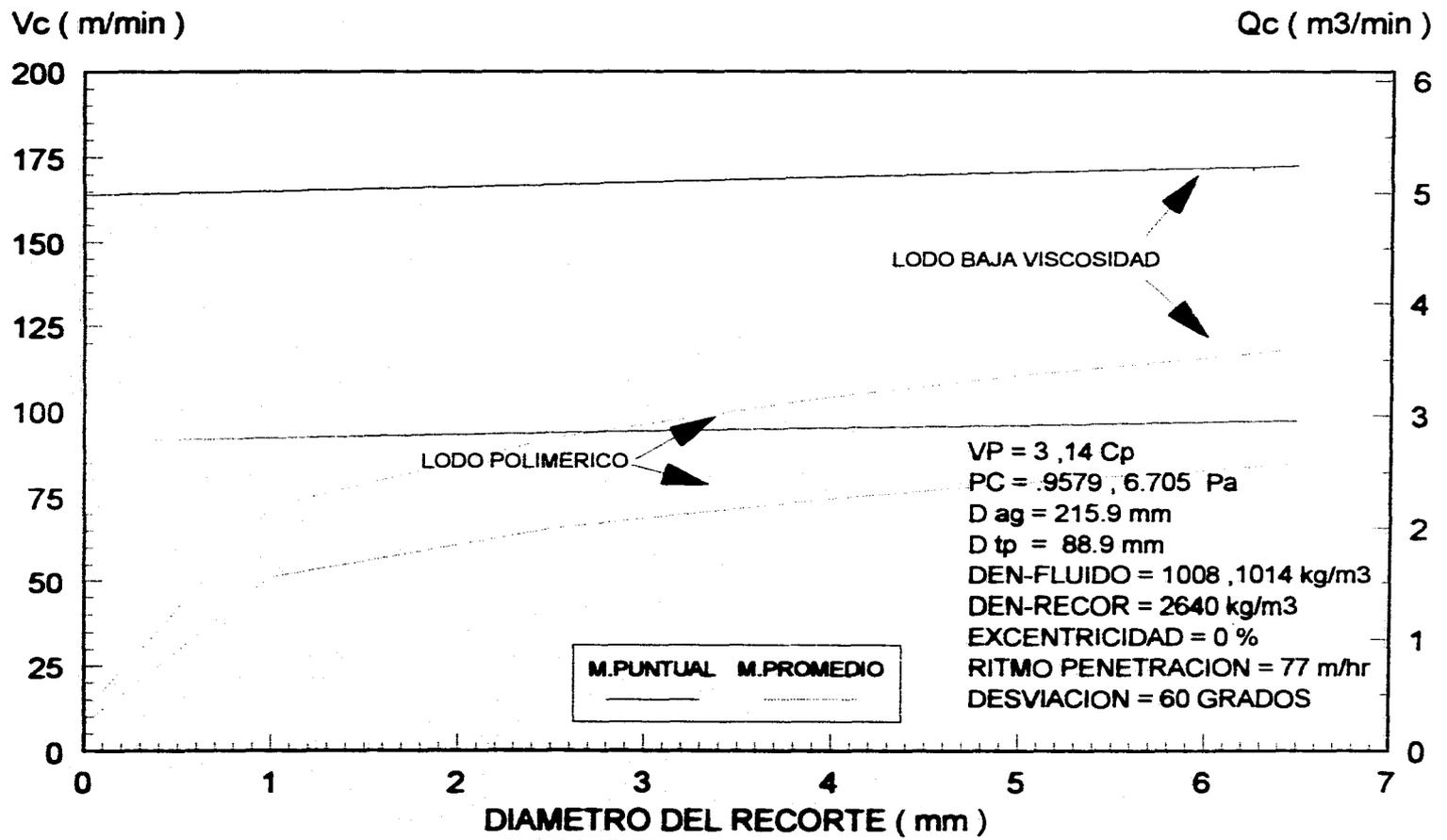


FIGURA 15. Efecto del tamaño del recorte en la velocidad crítica .

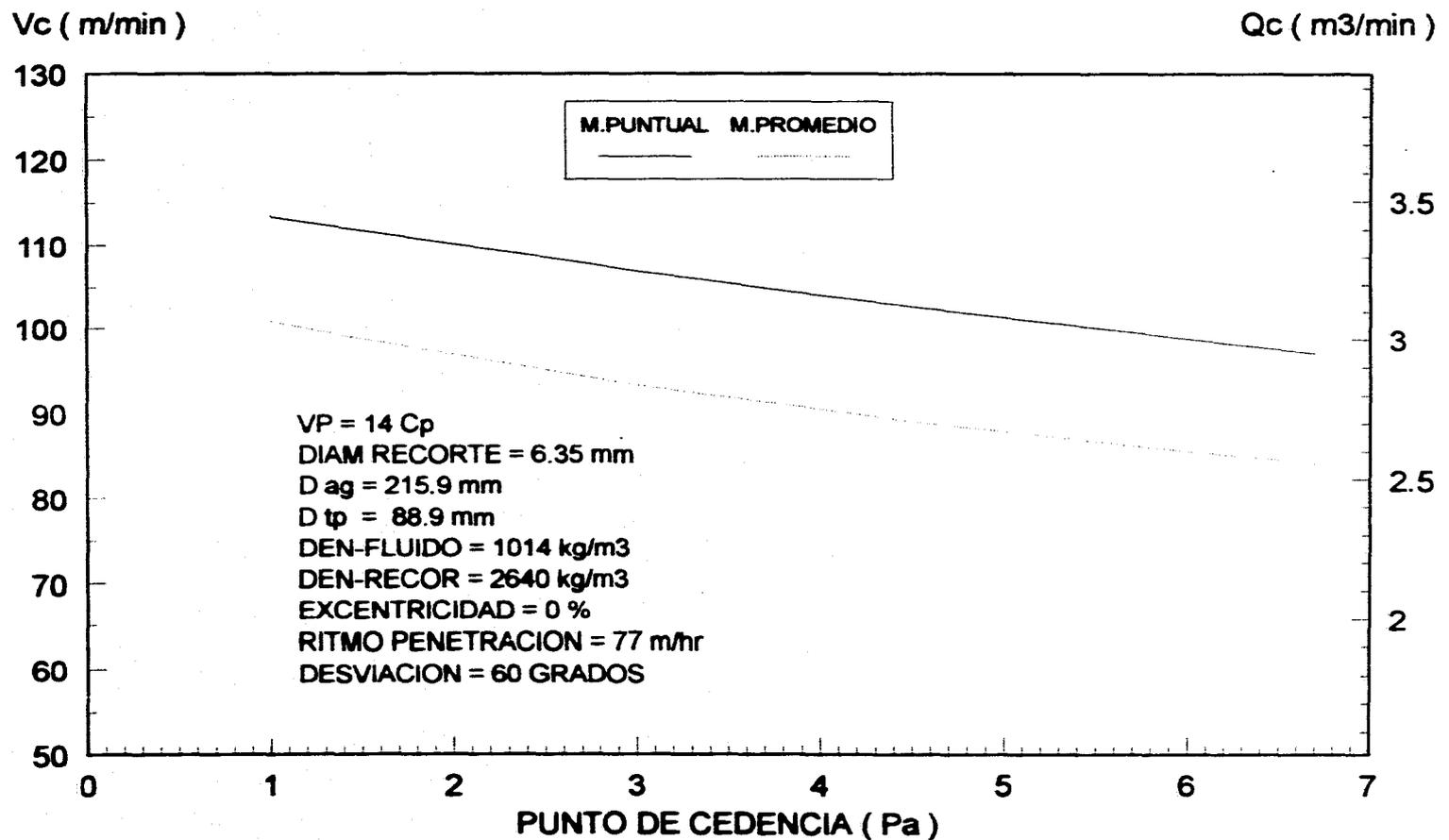


FIGURA 16. Efecto del punto de cedencia en la velocidad critica

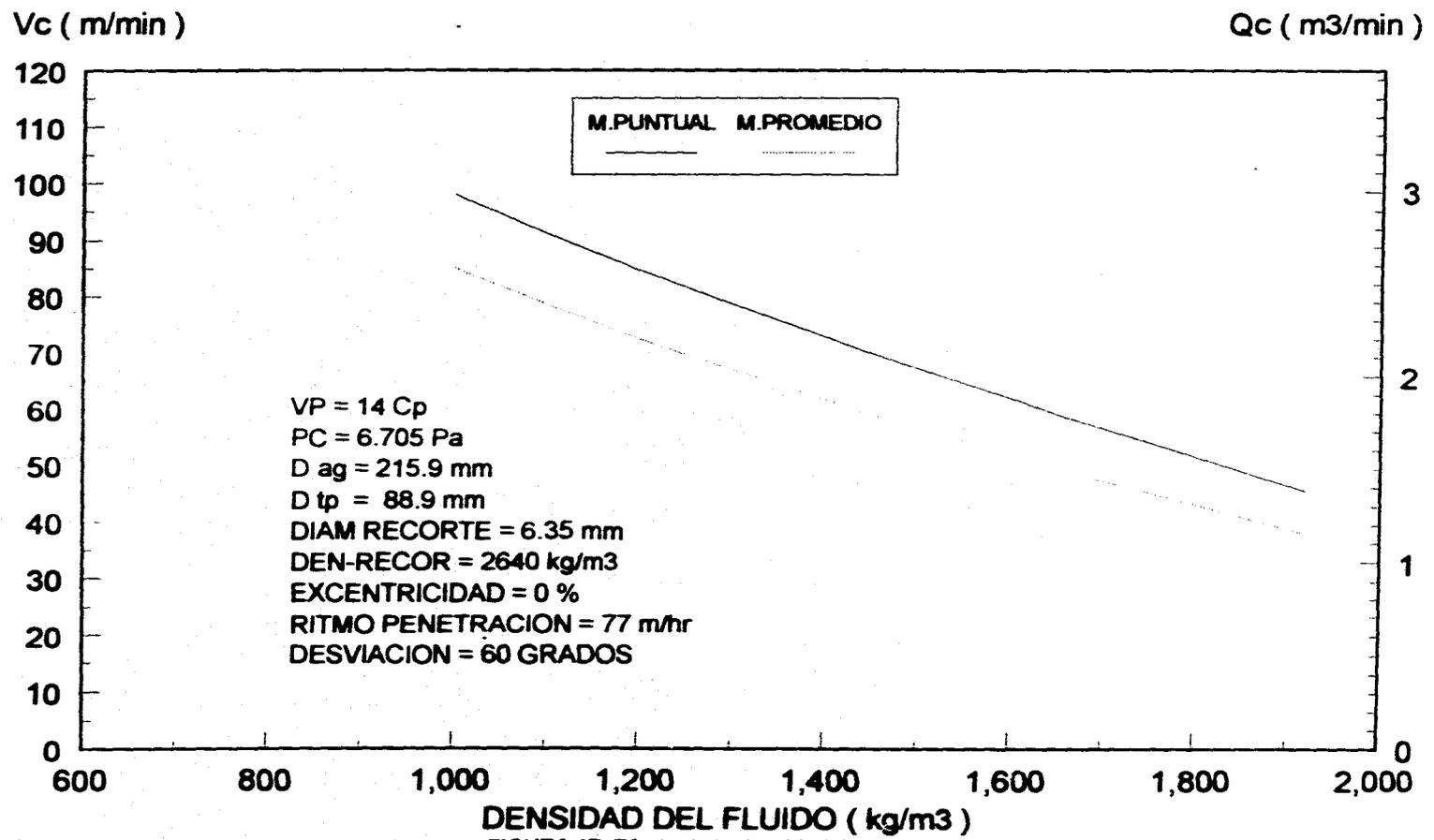


FIGURA 17. Efecto de la densidad del fluido en la velocidad crítica .

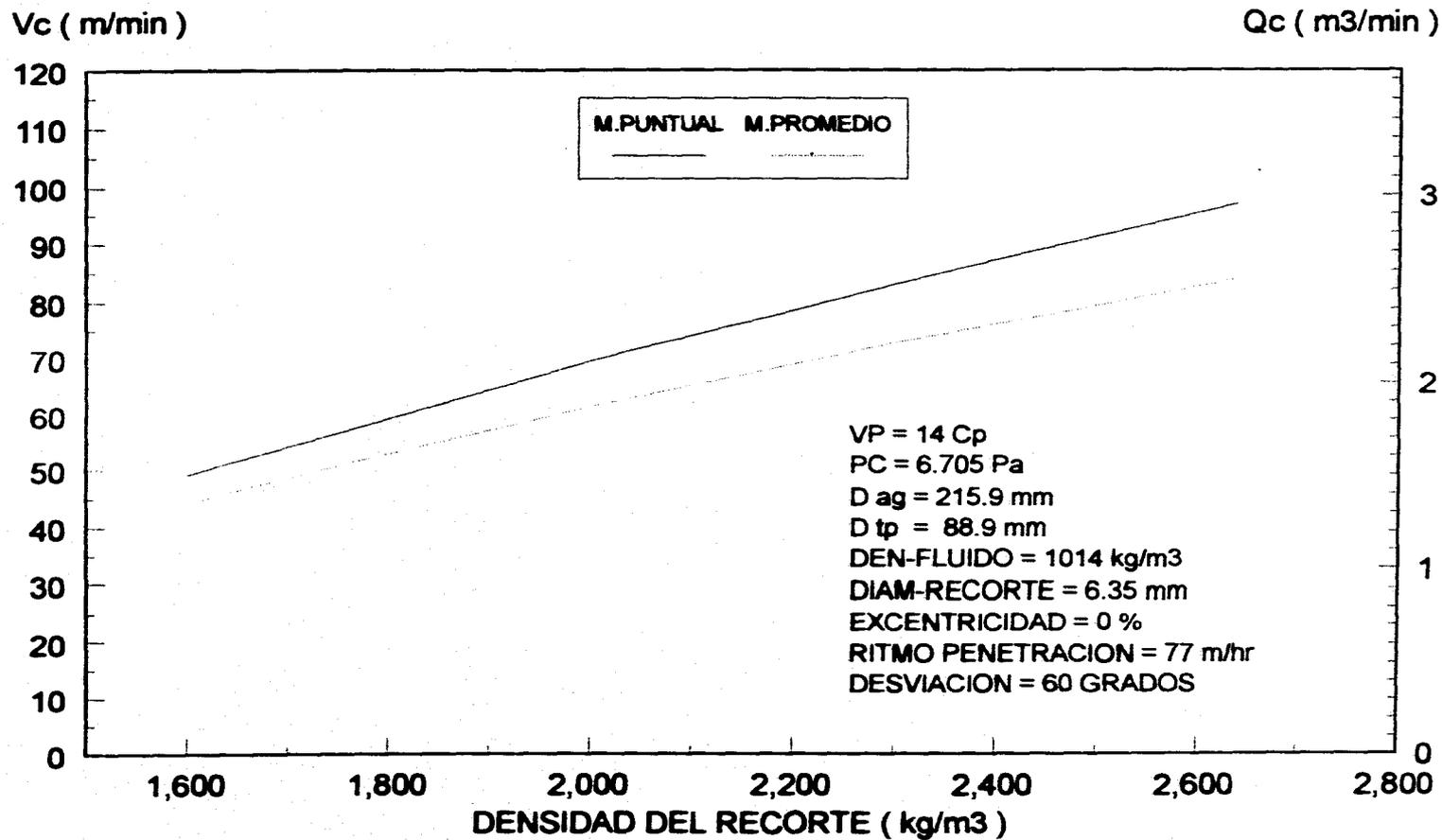


FIGURA 18. Efecto de la densidad del recorte en la velocidad critica .

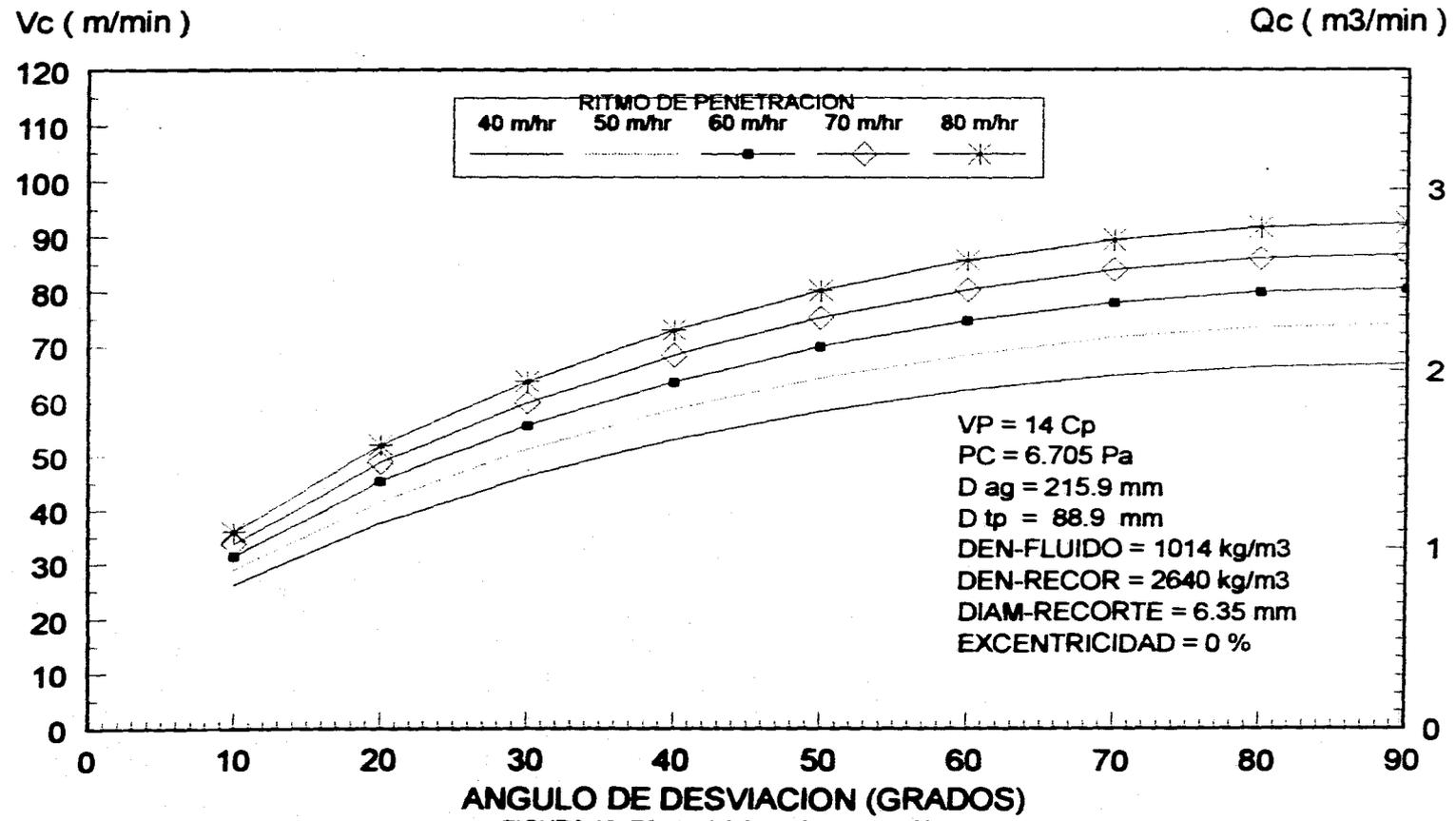


FIGURA 19. Efecto del ritmo de penetración y ángulo de desviación en la velocidad crítica .

(9)

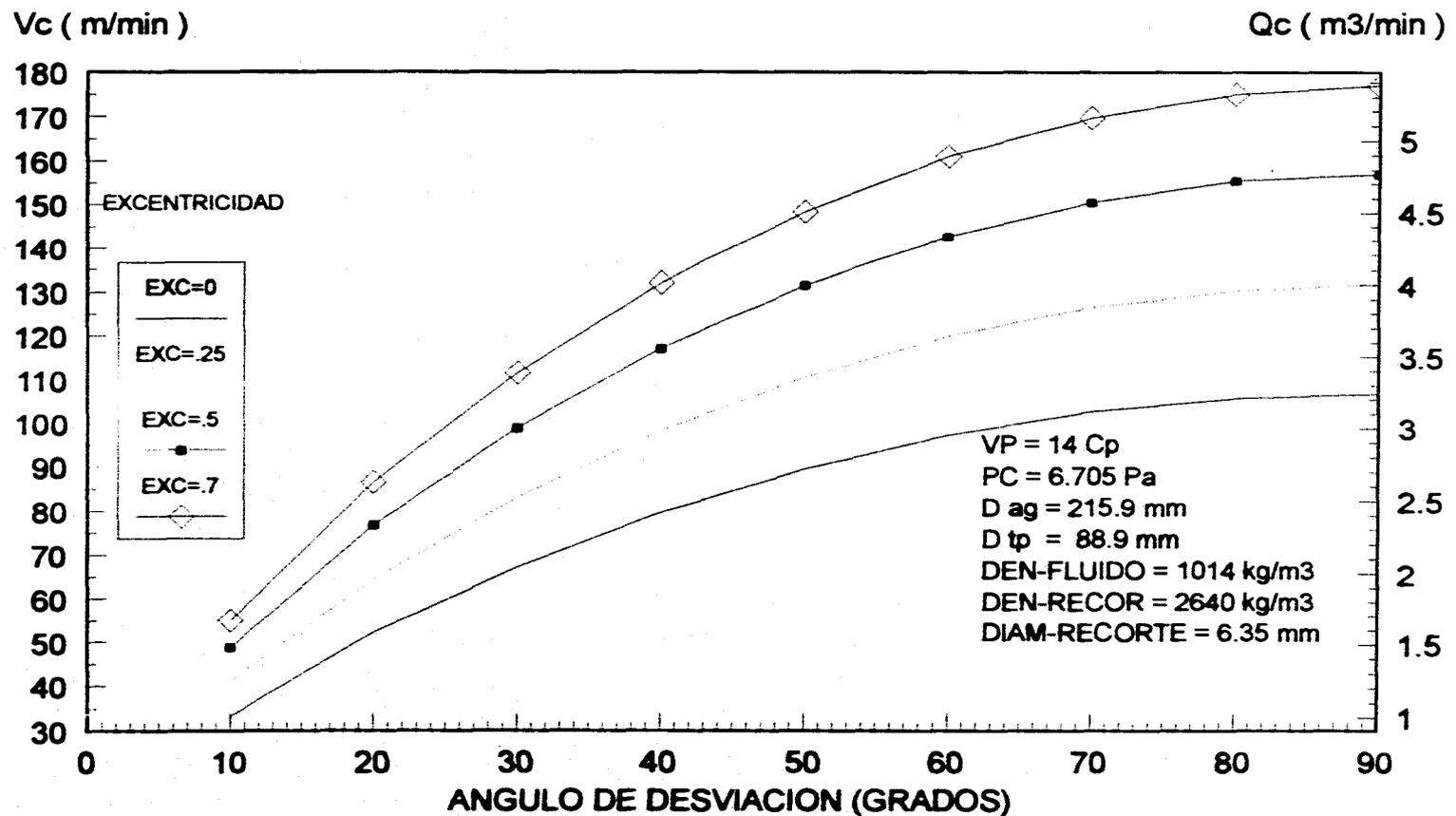


FIGURA 20. Efecto de la excentricidad y del ángulo de desviación en la velocidad crítica (modelo puntual)

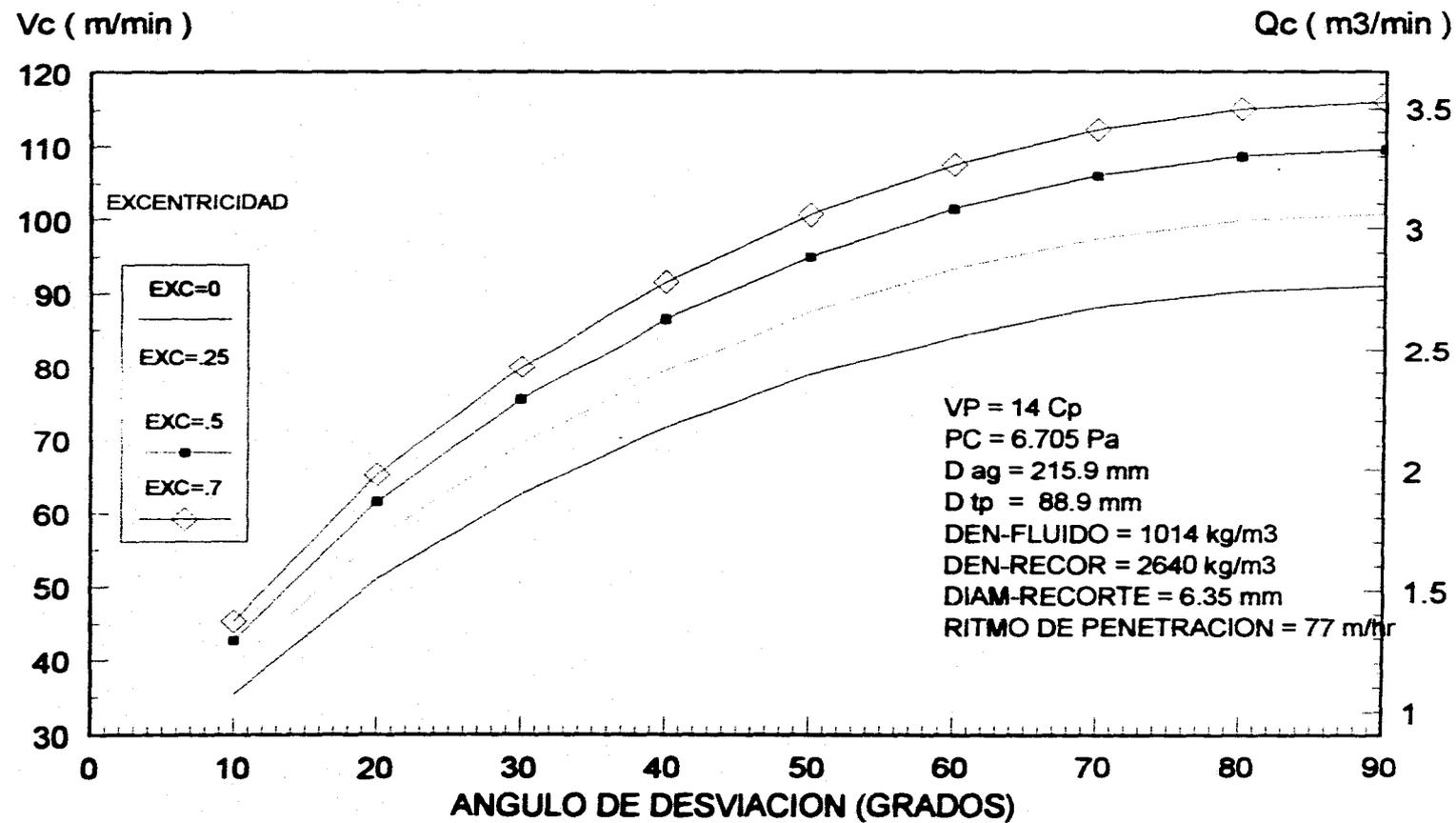
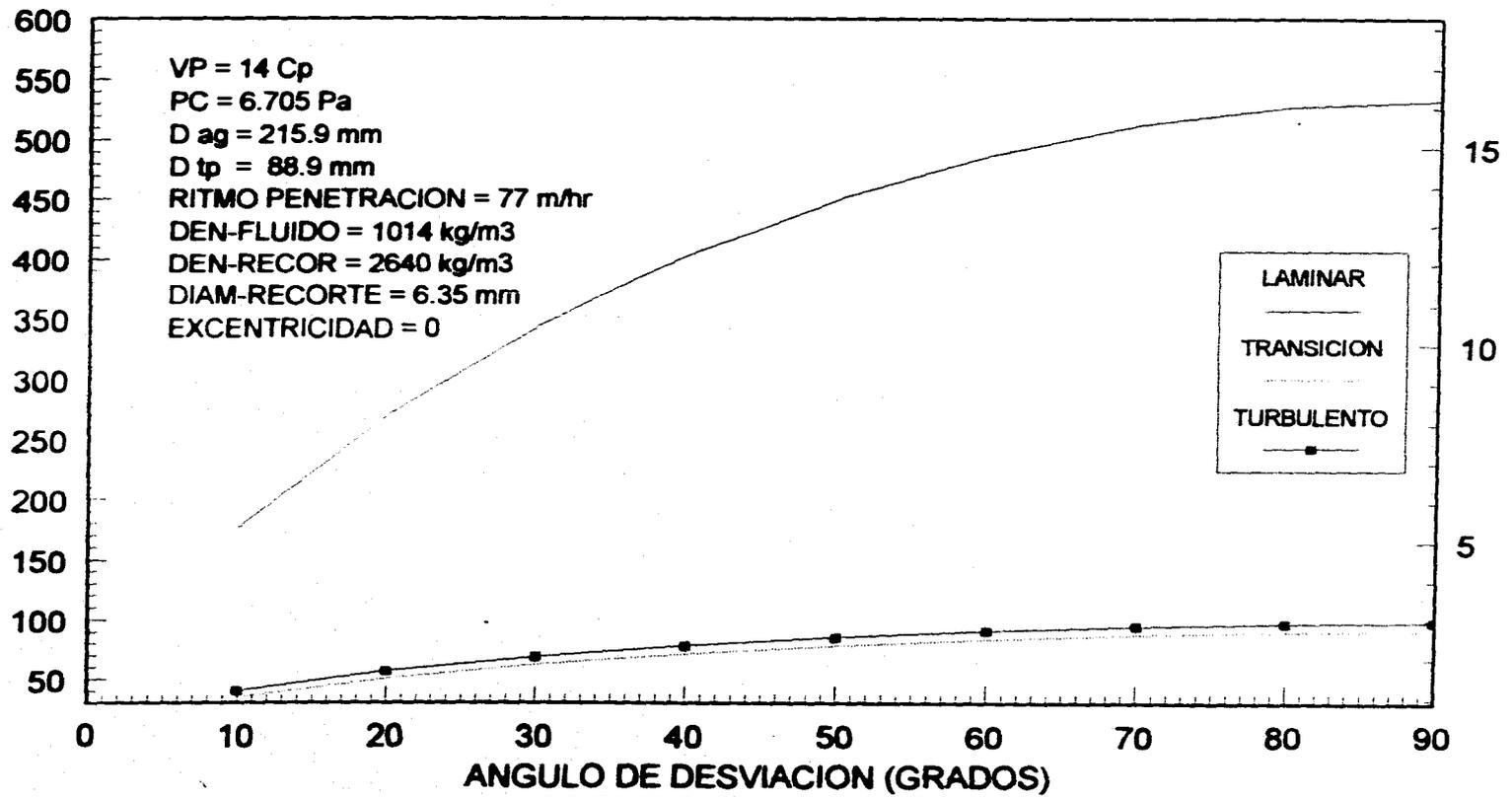


FIGURA 21. Efecto de la excentricidad y del ángulo de desviación en la velocidad crítica (modelo promedio)

Vc (m/min)

Qc (m3/min)



ANGULO DE DESVIACION (GRADOS)

FIGURA 22. Efecto del regimende flujo y del ángulo de desviación en la velocidad crítica .

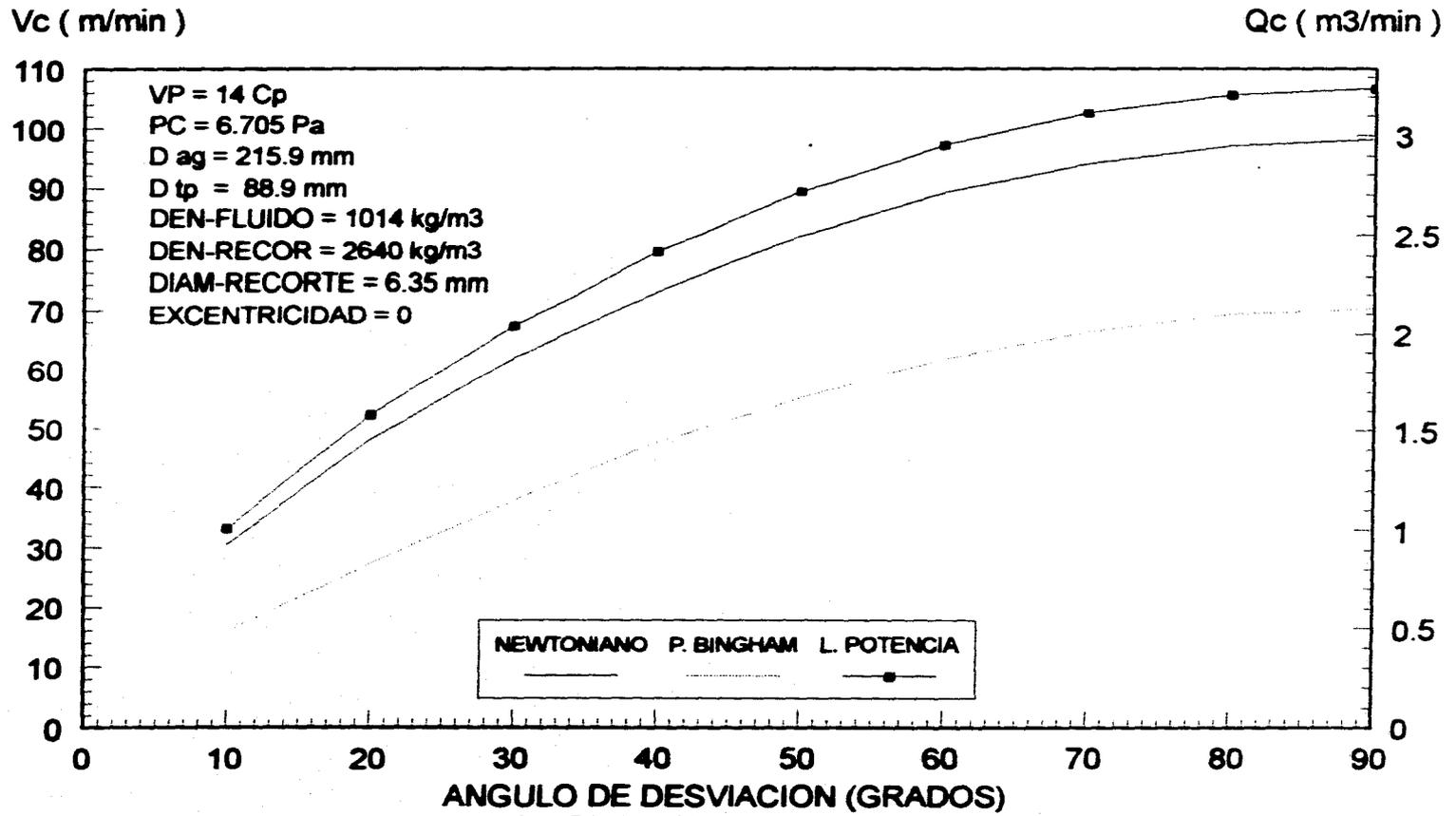
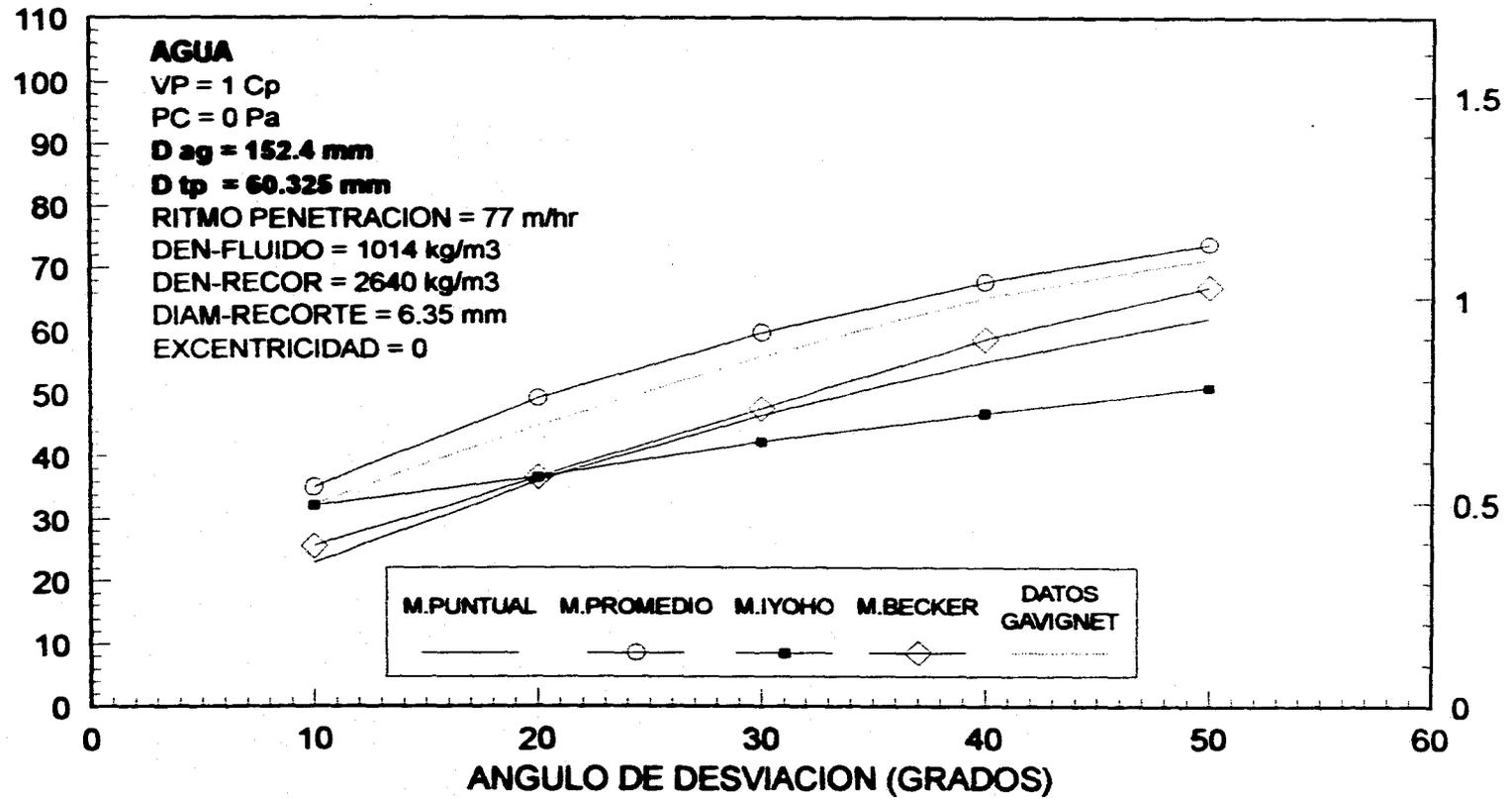


FIGURA 23. Efecto del modelo reológico y del ángulo de desviación en la velocidad crítica .

Vc (m/min)

Qc (m3/min)



ANGULO DE DESVIACION (GRADOS)

FIGURA 24. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio ,mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica .

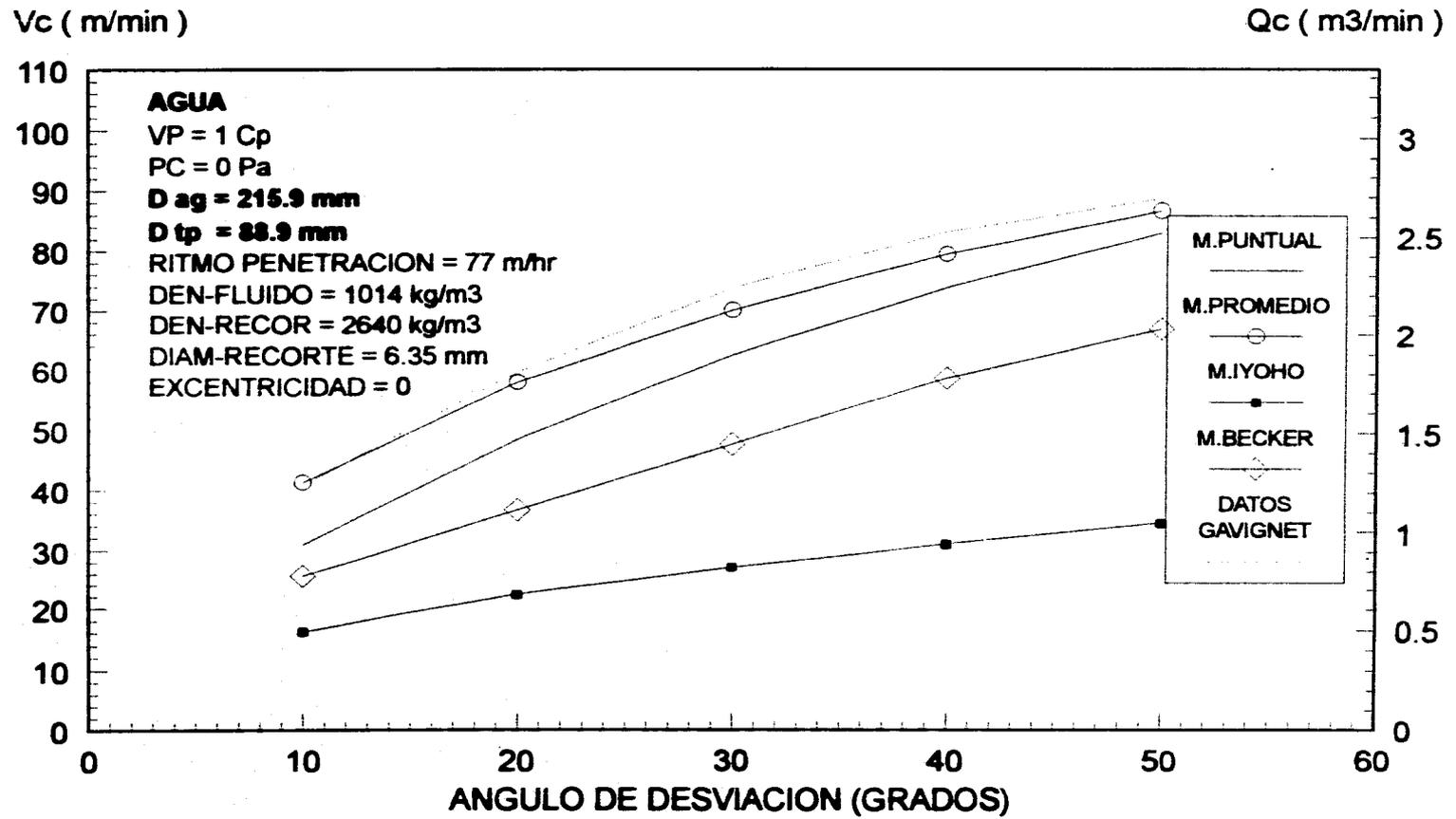


FIGURA 25. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio ,mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica .

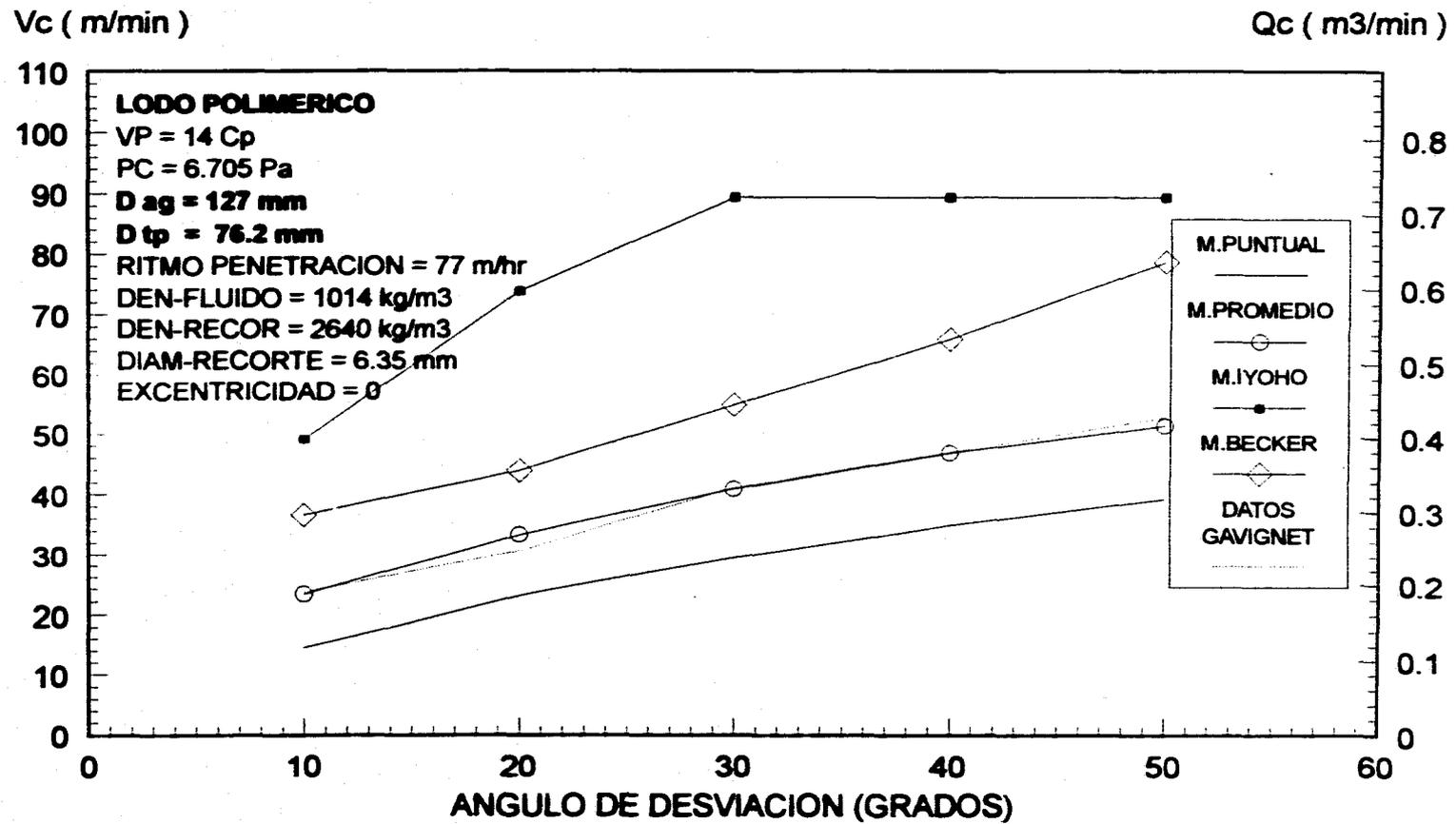
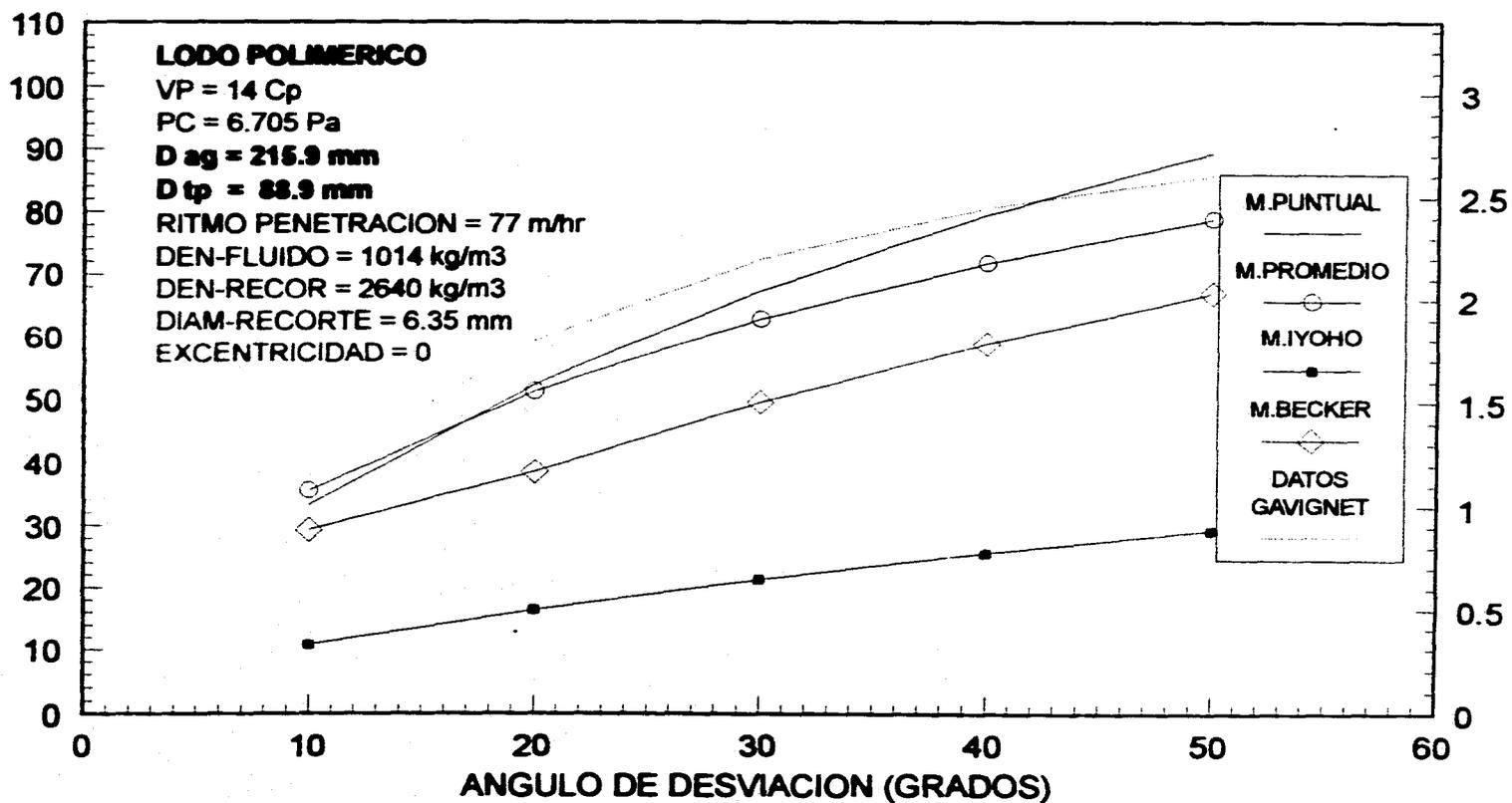


FIGURA 26. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio, mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica.

Vc (m/min)

Qc (m³/min)



ANGULO DE DESVIACION (GRADOS)

FIGURA 27. Comparación con otros modelos y datos de laboratorio, mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica.

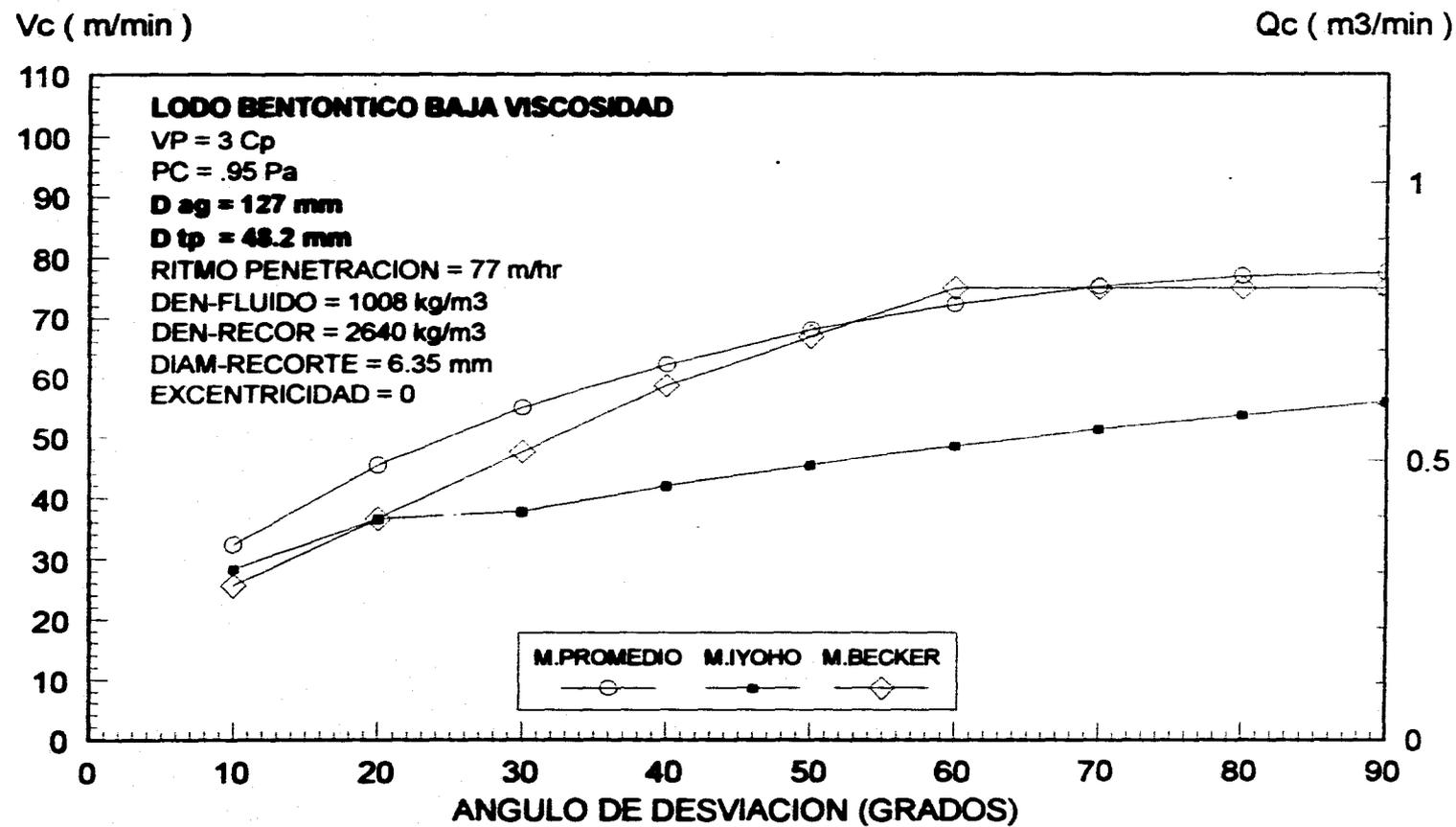


FIGURA 28. Comparación con otros modelos mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica (flujo turbulento).

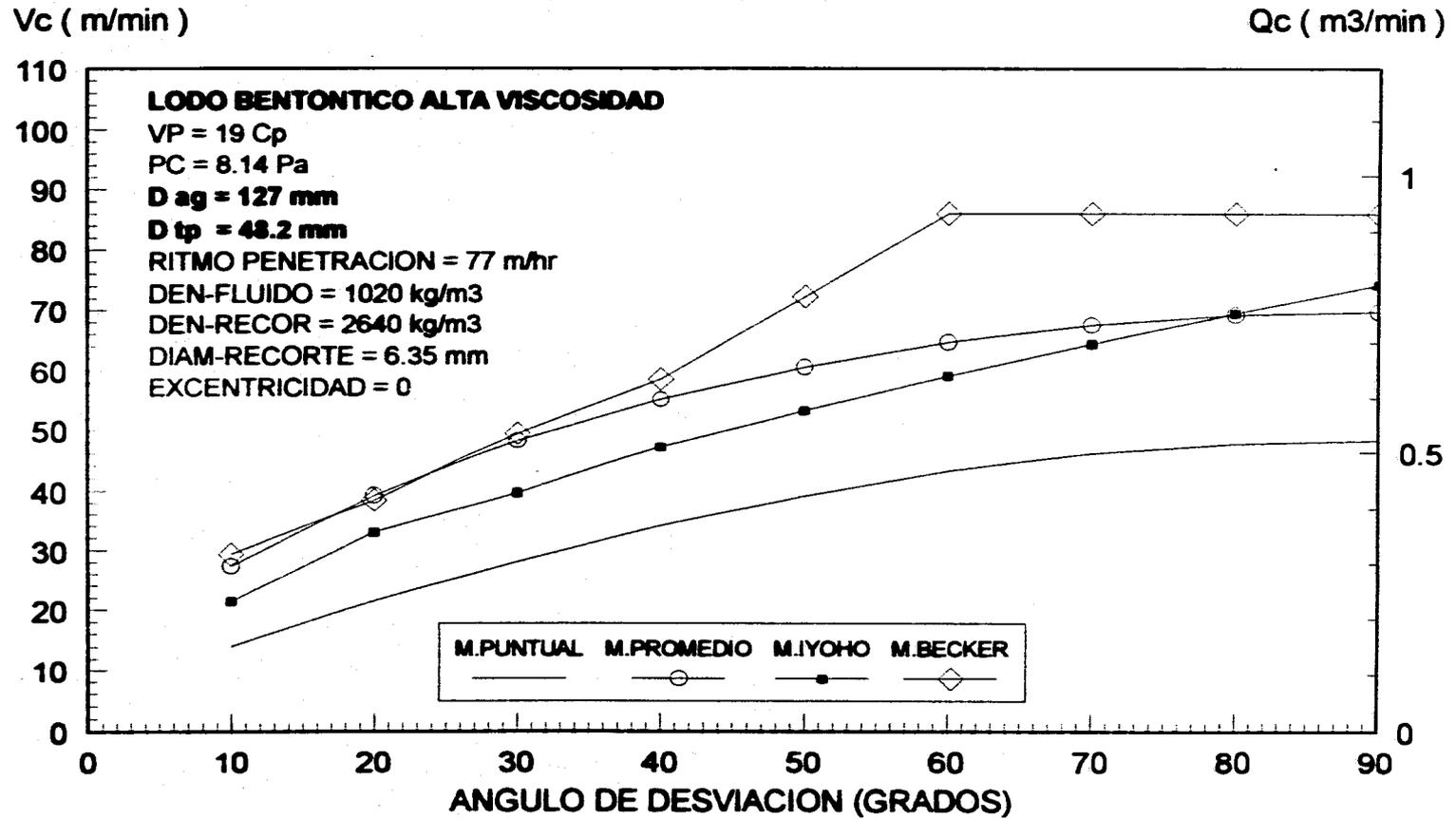


FIGURA 29. Comparación con otros modelos mostrando efecto de la desviación en la velocidad crítica (flujo laminar).

APÉNDICE A
SELECCIÓN DEL MODELO REOLÓGICO

Los fluidos de perforación son generalmente suspensiones de sólidos en líquidos, los cuales presentan características de flujo bastante complejas; pues no siguen, al menos en una forma rigurosa, ninguno de los comportamientos reológicos existentes. Sin embargo, en este trabajo los fluidos, son estudiados como Fluidos Newtonianos, Plásticos de Bingham o Ley de Potencia.

La selección del modelo reológico apropiado se realiza en base a las lecturas obtenidas del viscosímetro rotacional, tomando en cuenta que las lecturas a 3 y 6 rpm no se usan si el fluido tiene punto de cedencia (flujo tapón) o si es tixotrópico.

Las variables que se utilizan para este análisis son:

L = velocidad de rotación del cilindro exterior, rpm

T = lectura del dial del viscosímetro rotacional

P = número de lecturas realizadas

SELECCIÓN DEL MODELO NEWTONIANO:

El fluido de perforación puede ajustarse por este modelo cuando:

$$\frac{T_1}{L_1} = \frac{T_2}{L_2}$$

SELECCIÓN DEL MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM O LEY DE POTENCIA:

La selección del modelo apropiado se hace a partir de la regresión lineal²¹ de los puntos (L,T) del viscosímetro, en coordenadas cartesianas o logarítmica. Donde el modelo con el coeficiente de correlación más cercano a la unidad, es el apropiado. Este coeficiente de correlación está dado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{P \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[P \sum X^2 - (\sum X)^2][P \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

X = es la velocidad de corte o su logaritmo ($\dot{\gamma}$ o $\log \dot{\gamma}$)

Y = es el esfuerzo de corte o su logaritmo (τ o $\log \tau$)

después de que el modelo es seleccionado , los siguientes parámetros reológicos son determinados :

- Viscosidad Plástica (VP) y Punto de Cedencia (PC) para un fluido de Bingham.
- Índice de comportamiento de flujo (n) e Índice de consistencia (K) para un fluido Ley de Potencia .

empleando las siguientes ecuaciones :

$$VP = 300 \frac{\sum T \sum L - P \sum (LT)}{(\sum L)^2 - P \sum N^2} \quad (\text{cP})$$

$$PC = 0.51 \frac{\sum (LT) \sum L - \sum T \sum L^2}{(\sum L)^2 - P \sum L^2} \quad (\text{Pa})$$

$$n = \frac{\sum \log T \sum \log \dot{\gamma} - P \sum (\log T \cdot \log \dot{\gamma})}{(\sum \log \dot{\gamma})^2 - P \sum (\log \dot{\gamma})^2} \quad (\text{adim})$$

$$\log K = \frac{\sum (\log T \cdot \log \dot{\gamma}) \sum \log \dot{\gamma} - \sum \log T \sum (\log \dot{\gamma})^2}{(\sum \log \dot{\gamma})^2 - P \sum (\log \dot{\gamma})^2} \quad \text{K en Pa}\cdot\text{s}^n$$

APÉNDICE B
DIAGRAMA DE FLUJOY PROGRAMA DE COMPUTO

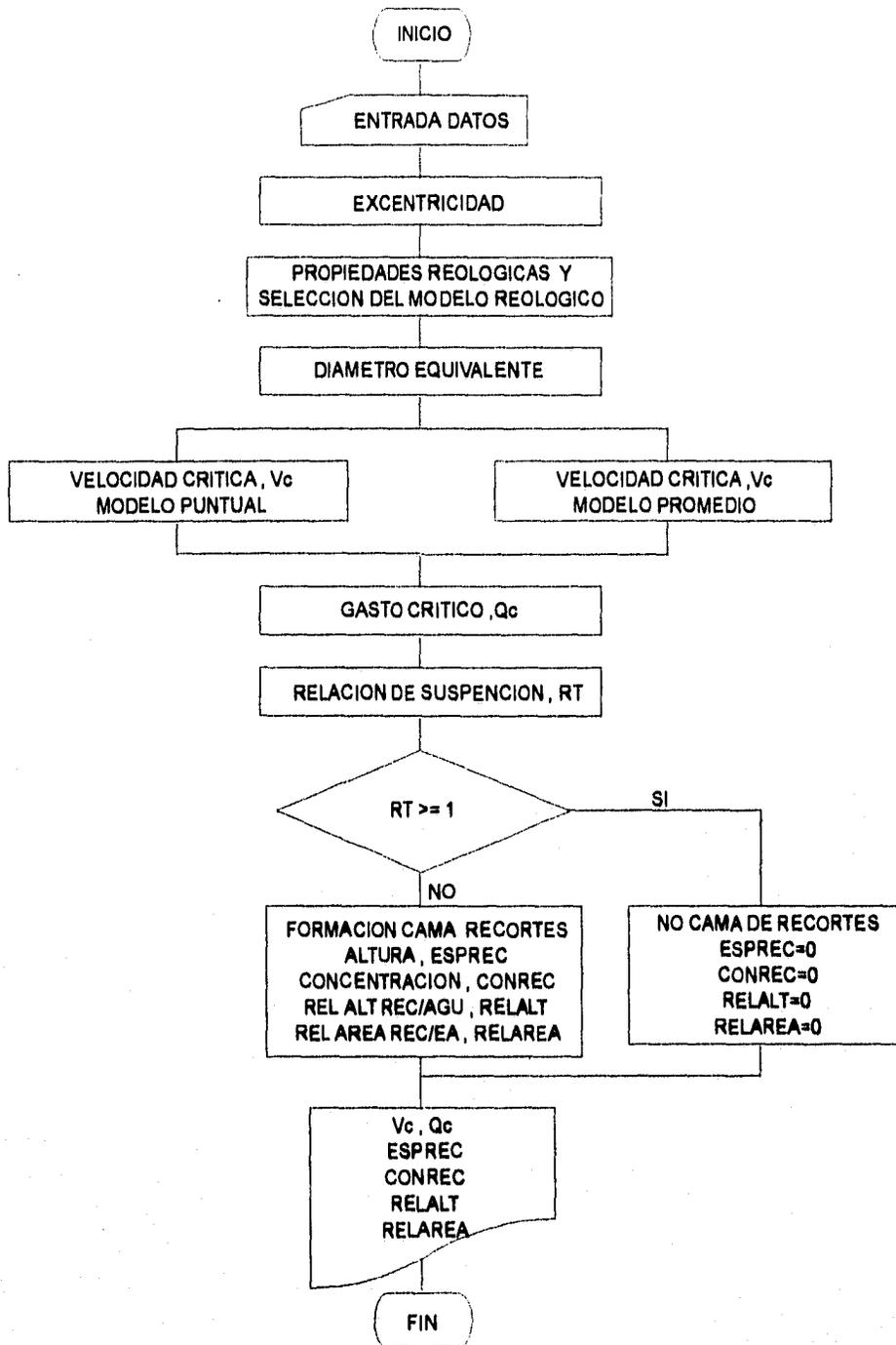


FIGURA A - 1 . Diagrama de flujo general

```

.....
.....
***
*** UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO ***
***
*** FACULTAD DE INGENIERIA ***
***
*** DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO ***
***
*** MAESTRIA EN INGENIERIA PETROLERA ***
***
*** T E S I S ***
***
*** DESARROLLO DE UN MODELO MATEMATICO PARA DETERMINAR ***
*** LA CAPACIDAD DE ACARREO APARTIR DE LA VELOCIDAD CRITICA ***
*** EN POZOS ALTAMENTE DESVIADOS ***
***
*** ROGER P. ORTIZ POLO ***
***
.....

```

```

CLEAR, , 18000
PI = 3.141592654#
REDIM PORCAP(103)
REDIM L(12), T(12), VELC(12), TI(12), VELCI(12)
REDIM QC(9, 9), ESPREC(9, 10), QCP(9, 9), ESPRECP(9, 10)
REDIM H(9), VC(9, 10), VCP(9, 9), AN(9), TETA(9), FHS(9)
REDIM VELASP(9, 9), VISCO(9, 9), CONREC(9, 10), CONRECP(9, 10)
REDIM RELALT(9, 9), RELALTP(9, 9), RELAREA(9, 9), RELAREAP(9, 9)
REDIM VEC(9), VECP(9)
REDIM SESPRECP(9), SRELALT(9), SRELAREA(9), SCONREC(9)
REDIM SESPRECP(9), SRELALTP(9), SRELAREAP(9), SCONRECP(9)
REDIM SQC(9), SQCP(9), VELAS(9)
COLOR 11, 4, 7
CLS
MEL = 0
CLS
IF MEL = 0 THEN 20
15 ON RUL GOTO 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42
PRINT
20 PRINT
INPUT "NOMBRE DEL POZO: "; NOPS
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
22 INPUT "DIAMETRO DE LA BARRENA (mm) "; DIH
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
24 INPUT "DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA (mm) "; DOP
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
26 INPUT "DENSIDAD DEL FLUIDO DE PERFORACION (kg/m3) "; ROF
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
28 INPUT "DENSIDAD DEL RECORTE (kg/m3) "; ROS
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
30 INPUT "EXCENTRICIDAD DE LA TUBERIA (FRACCION) "; EXC
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
32 INPUT "FORMA DEL RECORTE(ESFERA=1,PRISMA=2,CILINDRO=3)"; FORMA
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85

IF FORMA <> 1 THEN
IF FORMA = 2 THEN
33 INPUT "LONGITUD LADO 1 (mm) "; L.ADO1
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
34 INPUT "LONGITUD LADO 2 (mm) "; L.ADO2
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85

```

```

35 INPUT "LONGITUD LADO 3 (mm)          "; LADO3
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
ELSE
    IF FORMA = 3 THEN
36 INPUT "ALTURA DEL CILINDRO (mm)    "; HC
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
37 INPUT "DIAMETRO DEL CILINDRO (mm)  "; DC
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
END IF
END IF
ELSE
38 INPUT "DIAMETRO DEL RECORTE (mm)    "; DS
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
END IF
39 INPUT "RITMO DE PENETRACION DE LA BARRENA (m/hr) "; ROP
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
40 INPUT "GASTO DE BOMBEO (m3/min)     "; QB
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
41 INPUT "REGIMEN DE FLUJO (LAMINAR=1,TRANSITORIO=2,TURBULENTO=3,AUTO=0)";REGSEL
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
42 INPUT "ANGULO DE DESVIACION < MARCAR [0] PARA CALCULO DE 10 A 90 GRADOS>";ANGDES
PRINT
IF MEL = 1 THEN 85
85 CLS
PRINT
PRINT
PRINT
1 CLS
COLOR 7, 1
REM VERIFICACION DE DATOS
PRINT " 1.- NOMBRE DEL POZO: "; NOPS
PRINT " 2.- DIAMETRO DE LA BARRENA (mm)          "; DH
PRINT " 3.- DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA (mm)   "; DOP
PRINT " 4.- DENSIDAD DEL FLUIDO DE PERFORACION (kg/m3) "; ROF
PRINT " 5.- DENSIDAD DEL RECORTE (kg/m3)           "; ROS
PRINT " 6.- EXCENTRICIDAD DE LA TUBERIA (FRACCION)  "; EXC
PRINT " 7.- FORMA DEL RECORTE(ESFERA=1,PRISMA=2,CILINDRO=3)"; FORMA
IF FORMA <> 1 THEN
IF FORMA = 2 THEN
PRINT " 8.- LONGITUD LADO 1 (mm)          "; LADO1
PRINT " 9.- LONGITUD LADO 2 (mm)          "; LADO2
PRINT "10.- LONGITUD LADO 3 (mm)          "; LADO3
ELSE
IF FORMA = 3 THEN
PRINT "11.- ALTURA DEL CILINDRO (mm)     "; HC
PRINT "12.- DIAMETRO DEL CILINDRO (mm)    "; DC
END IF
END IF
ELSE
PRINT "13.- DIAMETRO DEL RECORTE (mm)    "; DS
END IF
PRINT "14.- RITMO DE PENETRACION DE LA BARRENA (m/hr) "; ROP
PRINT "15.- GASTO DE BOMBEO (m3/min)      "; QB
PRINT "16.- REGIMEN DE FLUJO(LAMINAR=1,TRANSITORIO=2,TURBULENTO=3,AUTO=0)"; REGSEL
PRINT "17.- ANGULO DE DESVIACION < MARCAR [0] PARA CALCULO DE 10 A 90 GRADOS >"; ANGDES
PRINT
PRINT "....."
PRINT ";;"
PRINT ";; DESEAS HACER ALGUN CAMBIO [ 1 - 17 | SI NO OPRIME [ 0 ] ";
PRINT ";;"
PRINT "....."
PRINT
INPUT RUL

```

```

MEL = 1
IF RUL <> 0 THEN 15
CLS
PRINT

'CALCULO DE LA SEPARACION h ENTRE PLACAS CONSIDERANDO LA EXCENTRICIDAD
GOSUB EXCENTRICIDAD

'GENERACION DEL ANGULO DE DESVIACION
IF ANGDES <> 0 THEN
  TETA(1) = ANGDES
  ANGNUM = 1
ELSE
  ANGNUM = 9
  FOR J = 1 TO ANGNUM
    TETA(J) = TETA(J - 1) + 10
  NEXT J
END IF

'CALCULO DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS Y SELECCION DEL MODELO REOLOGICO
GOSUB MODELO

'CALCULO DEL DIAMETRO EQUIVALENTE
IF FORMA = 1 THEN
  RECORTES = "ESFERA"
ELSE
  IF FORMA = 2 THEN RECORTES = "PRISMA"
  IF FORMA = 3 THEN RECORTES = "CILINDRO"
  GOSUB DIAMETRO
END IF

'CALCULO DEL PERFIL DE VELOCIDAD < MODELO PUNTUAL > DE ACUERDO AL MODELO REOLOGICO
'SELECCIONADO
IF TIPO = 1 THEN
  GOSUB NEWTONIANO
END IF

IF TIPO = 2 THEN
  GOSUB BINGHAM
END IF

IF TIPO = 3 THEN
  GOSUB POTENCIA
END IF

'MODELO PROMEDIO

'SELECCION DEL REGIMEN DE FLUJO
IF REGSEL <> 0 THEN
  IF REGSEL = 1 THEN GOSUB LAMINAR
  IF REGSEL = 2 THEN GOSUB TRANSITORIO
  IF REGSEL = 3 THEN GOSUB TURBULENTO
ELSE
  FOR J = 1 TO ANGNUM
    FOR I = 1 TO 9
  CLS
  COLOR 7, 1
  LOCATE 10, 33: PRINT J, I
  LOCATE 11, 8: PRINT "....."
  LOCATE 12, 8: PRINT "....."
  LOCATE 13, 8: PRINT "**"
  LOCATE 14, 8: PRINT "** MODELO PROMEDIO **"
  LOCATE 15, 8: PRINT "**"
  LOCATE 16, 8: PRINT "....."
  LOCATE 17, 8: PRINT "....."
  IF DS >= H(I) THEN

```

```
VCP(J, I) = 1
GOTO 1083
END IF
```

```
VC = VC(J, 2)
'DH-DOP=2 * H(I)
425 VISA = (K / .144) * (.72 * 2 * H(I) / VC) ^ (1 - N) * ((2 + 1 / N) / (.0208)) ^ N
VS = 5.5
CV = .0583333# * ROP + .505
450 NREP = ROF * DS * VS / (60.0666 * VISA)
```

'REGIMEN LAMINAR

```
IF NREP <= 3 THEN
CD = 40 / NREP
VSN = 6.862 * (DS * (ROS - ROF) / (CD * ROF)) ^ .5
DIF1 = ABS(VSN - VS)
IF DIF1 <= .1 THEN
GOTO 500
ELSE
VS = VSN
GOTO 450
ENDIF
500 VCN = (.329664 * CV * 2 * H(I) * (ROS - ROF) ^ 1.5 * DS ^ 1.5 * (SIN(TETA(J) * (PI / 180))) / (ROF ^ .5 * VISA)) ^ .5
DIF2 = ABS(VCN - VC)
IF DIF2 <= .1 THEN
VCP(J, I) = VC
VELASP(J, I) = VS
ELSE
VC = VCN
GOTO 425
ENDIF
REGS = "LAMINAR"
END IF
```

'REGIMEN TRANSITORIO

```
IF NREP > 3 AND NREP <= 300 THEN
CD = 22 / NREP ^ .5
VSN = 6.862 * (DS * (ROS - ROF) / (CD * ROF)) ^ .5
DIF3 = ABS(VSN - VS)
IF DIF3 <= .1 THEN
GOTO 700
ELSE
VS = VSN
GOTO 450
ENDIF
700 VCN = (1.092309 * CV * 2 * H(I) * (ROS - ROF) ^ 1.1667 * DS ^ .5 * (SIN(TETA(J) * (PI / 180))) / (ROF ^ .8333 * VISA ^
.3333)) ^ .5
DIF4 = ABS(VCN - VC)
IF DIF4 <= .1 THEN
VCP(J, I) = VC
VELASP(J, I) = VS
ELSE
VC = VCN
GOTO 425
ENDIF
REGS = "TRANSITORIO"
END IF
```

'REGIMEN TURBULENTO

```
IF NREP > 300 THEN
CD = 1.5
VSN = 6.862 * (DS * (ROS - ROF) / (CD * ROF)) ^ .5
DIF5 = ABS(VSN - VS)
IF DIF5 <= .1 THEN
GOTO 900
ELSE
VS = VSN
GOTO 450
```

```

END IF
900 VCN = (9.41186 * CV * 2 * H(I) * (ROS - ROF) * (SIN(TETA(J) * (PI / 180))) / ROF) ^ .5
DIF6 = ABS(VCN - VC)
IF DIF6 <= .1 THEN
  VCP(J, I) = VC
  VELASP(J, I) = VS
ELSE
  VC = VCN
  GOTO 425
END IF
REGS = "TURBULENTO"
END IF

1083 NEXT I
NEXT J

END IF

FOR J = 1 TO ANGNUM
SVCP = 0: SMVCP = 0: SMVELASP = 0
FOR I = 1 TO 9

  NVCP = 1
  SVCP = SVCP + NVCP
  SMVCP = SMVCP + VCP(J, I)
  SMVELASP = SMVELASP + VELASP(J, I)

NEXT I
VECP(J) = SMVCP / SVCP
VELAS(J) = SMVELASP / SVCP
NEXT J

```

'CALCULO DEL GASTO CRITICO, RELACION DE SUSPENSION Y ESPESOR DE LA CAMA

```

ARAN = (DH ^ 2 - DOP ^ 2) * PI / 4
ARTP = DOP ^ 2 * PI / 4

```

```

IF UCASE$(SIS) = "S" THEN
  GOTO 3026
ELSE
  FOR U = 0 TO 100 STEP 2
  READ PORCAP(U)
  NEXT U
  DATA 0.00000, 0.04799, 0.13480, 0.24509, 0.37501, 0.52023, 0.67979, 0.85114
  DATA 1.03234, 1.22421, 1.42346, 1.63077, 1.84466, 2.06502, 2.29195, 2.52298
  DATA 2.75729, 2.99762, 3.24061, 3.48667, 3.73539, 3.98525, 4.23749, 4.49132
  DATA 4.64560, 5.00000, 5.25440, 5.50868, 5.76231, 6.01475, 6.26461, 6.51333
  DATA 6.75939, 7.00238, 7.24271, 7.47702, 7.70805, 7.93498, 8.15334, 8.36923
  DATA 8.57634, 8.77579, 8.96766, 9.14886, 9.32021, 9.47975, 9.62499, 9.75491
  DATA 9.86520, 9.95201, 1
  END IF

```

3026 'AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL (AGUJERO-TP) DE LA PARTE SUPERIOR DE LA TP
'AL LADO INFERIOR DEL AGUJERO

```

RELDA = CINT(((H(9) + DOP) / DH) * 100)

```

```

FOR U = 0 TO 100 STEP 2
  IF (RELDA = U) OR ((RELDA + 1) = U) THEN
    FACTORA = PORCAP(U)
  END IF
NEXT U

```

```

AREAA = ARAN * FACTORA

```

'AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL (AGUJERO-TP) DE LA PARTE INFERIOR DE LA TP
'AL LADO INFERIOR DEL AGUJERO

```

RELDB = CINT((H(9) / DH) * 100)

FOR U = 0 TO 100 STEP 2
  IF (RELDB = U) OR ((RELDB + 1) = U) THEN
    FACTORB = PORCAP(U)
  END IF
NEXT U

AREAB = ARAN * FACTORB

'MODELO PUNTUAL

FOR J = 1 TO ANGNUM
  SVC = 0: SMESP = 0: SMALT = 0: SMARE = 0: SMCON = 0: SMQC = 0
  FOR I = 1 TO 9

    QC(J, I) = (.0000007853981634# * VC(J, I) * (DH ^ 2 - DOP ^ 2))
    RT = QB / QC(J, I)

    IF RT >= 1 THEN

      ESPREC(J, I) = 0
      RELALT(J, I) = 0
      RELAREA(J, I) = 0
      CONREC(J, I) = 0

    ELSE

      ARREC = ARAN * (1 - RT)
      GOSUB ESPESOR
      ESPREC(J, I) = HREC

      IF I <> 1 THEN
        IF ESPREC(J, I) > ESPREC(J, I - 1) THEN ESPREC(J, I) = ESPREC(J, I - 1)
      END IF

      RELALT(J, I) = (ESPREC(J, I) / DH) * 100
      RELAREA(J, I) = (1 - RT) * 100

      IF RELALT(J, I) <= 13 THEN
        CONREC(J, I) = RELALT(J, I) / 3.307888041#
      END IF
      IF RELALT(J, I) > 13 AND RELALT(J, I) <= 50.6635 THEN
        CONREC(J, I) = (RELALT(J, I) - 1.60721) / 2.23164
      END IF
      IF RELALT(J, I) > 50.6635 THEN
        CONREC(J, I) = (RELALT(J, I) - 31.60716317#) / 1.02169
      END IF

      IF I <> 1 THEN
        IF CONREC(J, I) > CONREC(J, I - 1) THEN CONREC(J, I) = CONREC(J, I - 1)
      END IF

    END IF

    NVC = 1
    SVC = SVC + NVC
    SMESP = SMESP + ESPREC(J, I)
    SMALT = SMALT + RELALT(J, I)
    SMARE = SMARE + RELAREA(J, I)
    SMCON = SMCON + CONREC(J, I)
    SMQC = SMQC + QC(J, I)

  NEXT I

  SESPREC(J) = SMESP / SVC
  SRELALT(J) = SMALT / SVC
  SRELAREA(J) = SMARE / SVC

```

```

SCONREC(J) = SMCON / SVC
SQCP(J) = SMQC / SVC

NEXT J

'MODELO PROMEDIO

FOR J = 1 TO ANGNUM
SVCP = 0: SMESPP = 0: SMALTP = 0: SMAREP = 0: SMCONP = 0: SMQCP = 0
FOR I = 1 TO 9

QCP(J, I) = (.0000007853981634# * VCP(J, I) * (DH ^ 2 - DOP ^ 2))
RTP = QB / QCP(J, I)

IF RTP >= 1 THEN

    ESPRECP(J, I) = 0
    RELALTP(J, I) = 0
    RELAREAP(J, I) = 0
    CONRECP(J, I) = 0

ELSE

    ARREC = ARAN * (1 - RTP)
    GOSUB ESPESOR
    ESPRECP(J, I) = HREC

    IF I <> 1 THEN
        IF ESPRECP(J, I) > ESPRECP(J, I - 1) THEN ESPRECP(J, I) = ESPRECP(J, I - 1)
    END IF

    RELALTP(J, I) = (ESPRECP(J, I) / DH) * 100
    RELAREAP(J, I) = (1 - RTP) * 100

    IF RELALTP(J, I) <= 13 THEN
        CONRECP(J, I) = RELALTP(J, I) / 3.307888041#
    END IF
    IF RELALTP(J, I) > 13 AND RELALTP(J, I) <= 50.6635 THEN
        CONRECP(J, I) = (RELALTP(J, I) - 1.60721) / 2.23164
    END IF
    IF RELALTP(J, I) > 50.6635 THEN
        CONRECP(J, I) = (RELALTP(J, I) - 31.60716317#) / 1.02169
    END IF

    IF I <> 1 THEN
        IF CONRECP(J, I) > CONRECP(J, I - 1) THEN CONRECP(J, I) = CONRECP(J, I - 1)
    END IF

END IF

    NVC = 1
    SVCP = SVCP + NVC
    SMESPP = SMESPP + ESPRECP(J, I)
    SMALTP = SMALTP + RELALTP(J, I)
    SMAREP = SMAREP + RELAREAP(J, I)
    SMCONP = SMCONP + CONRECP(J, I)
    SMQCP = SMQCP + QCP(J, I)

NEXT I

SESPRECP(J) = SMESPP / SVCP
SRELALTP(J) = SMALTP / SVCP
SRELAREAP(J) = SMAREP / SVCP
SCONRECP(J) = SMCONP / SVCP
SQCP(J) = SMQCP / SVCP

NEXT J

'IMPRESION EN PANTALLA

escala$ = "CDEFGAB"

```

```

PLAY "L16"
FOR I% = 0 TO 6
  PLAY "O" + STR$(I%)
  PLAY "X" + VARPTR$(escala$)
NEXT I%

CLS
COLOR 7, 1
LOCATE 11, 8: PRINT "*****"
LOCATE 12, 8: PRINT "*****"
LOCATE 13, 8: PRINT "*****"
LOCATE 14, 8: PRINT "DESEAS IMPRESION EN PANTALLA [ S/N ] *****"
LOCATE 15, 8: PRINT "*****"
LOCATE 16, 8: PRINT "*****"
LOCATE 17, 8: PRINT "*****"
PRINT
INPUT PANTALLAS
PRINT

IF UCASE$(PANTALLAS) = "S" THEN

  GOSUB PANTALLA

END IF

CLS
COLOR 7, 1
LOCATE 11, 8: PRINT "*****"
LOCATE 12, 8: PRINT "*****"
LOCATE 13, 8: PRINT "*****"
LOCATE 14, 8: PRINT "DESEAS IMPRESION EN PAPEL [ S/N ] *****"
LOCATE 15, 8: PRINT "*****"
LOCATE 16, 8: PRINT "*****"
LOCATE 17, 8: PRINT "*****"
PRINT
INPUT PAPEL$
PRINT

IF UCASE$(PAPEL$) = "S" THEN

  CLS
  COLOR 2, 8, 4
  DO

  LOCATE 3, 23: PRINT STRING$(35, 220);
  LOCATE 20, 23: PRINT STRING$(35, 223);

  FOR ROW = 4 TO 19
  LOCATE ROW, 23: PRINT CHR$(219);
  LOCATE ROW, 57: PRINT CHR$(219);
  NEXT ROW

  LOCATE 5, 29: PRINT "MENU DE IMPRESION";
  LOCATE 7, 29: PRINT "(A) DATOS";
  LOCATE 8, 29: PRINT "(B) VEL CRITICA PUNTUAL.";
  LOCATE 9, 29: PRINT "(C) VEL CRITICA PROMEDIO";
  LOCATE 10, 29: PRINT "(D) GASTO CRITICO PUNTUAL.";
  LOCATE 11, 29: PRINT "(E) GASTO CRITICO PROMEDIO";
  LOCATE 12, 29: PRINT "(F) ESPESOR PUNTUAL.";
  LOCATE 13, 29: PRINT "(G) ESPESOR PROMEDIO";
  LOCATE 14, 29: PRINT "(H) CONCENTRACION PUNTUAL.";
  LOCATE 15, 29: PRINT "(I) CONCENTRACION PROMEDIO";
  LOCATE 16, 29: PRINT "(J) VELOCIDAD ASENTAMIENTO";
  LOCATE 17, 29: PRINT "(X) ESPACIO <H> ENTRE PANTALLAS";
  LOCATE 18, 29: PRINT "(M) Menu continuacion...";

  LOCATE 22, 3: PRINT SPACES(70)
  LOCATE 22, 3: PRINT "OPRIMA LA LETRA SELECCIONADA (A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,X o M)";
  DO
  BEEP: KEYS$ = UCASE$(INPUT$(1))
  LOOP WHILE INSTR("ABCDEFGHIJXM", KEYS$) = 0

```

```

SELECT CASE KEYSLS
CASE "A"
  GOSUB DATOS
CASE "B"
  GOSUB VCPUNTUAL
CASE "C"
  GOSUB VCPROMEDIO
CASE "D"
  GOSUB QCPUNTUAL
CASE "E"
  GOSUB QCPROMEDIO
CASE "F"
  GOSUB ESPUNTUAL
CASE "G"
  GOSUB ESPROMEDIO
CASE "H"
  GOSUB CONCENPUN
CASE "I"
  GOSUB CONCENPROM
CASE "J"
  GOSUB VELASPROM
CASE "X"
  GOSUB ESPACIO
CASE "M"
  EXIT DO
END SELECT

```

```

CLS
LOOP
CLS
CLS
COLOR 2, 8, 4
DO
LOCATE 3, 23: PRINT STRING$(37, 220);
LOCATE 20, 23: PRINT STRING$(37, 223);

```

```

FOR ROW = 4 TO 19
LOCATE ROW, 23: PRINT CHR$(219);
LOCATE ROW, 59: PRINT CHR$(219);
NEXT ROW

```

```

LOCATE 3, 27: PRINT "...MENU DE IMPRESION";
LOCATE 9, 27: PRINT "(P) RELACION ALT/DIAM PUNT";
LOCATE 11, 27: PRINT "(Q) RELACION ALT/DIAM PROM";
LOCATE 13, 27: PRINT "(R) REL AREA-REC/AREA-ANUL PUNT";
LOCATE 15, 27: PRINT "(T) REL AREA-REC/AREA-ANUL PROM";
LOCATE 17, 27: PRINT "(S)ir menu impresion";

```

```

LOCATE 22, 3: PRINT SPACES(70)
LOCATE 22, 3: PRINT "OPRIMA LA LETRA SELECCIONADA (P,Q,R,T o S)";
DO
BEEP: KEYSLS = UCASE$(INPUT$(1))
LOOP WHILE INSTR("PQRST", KEYSLS) = 0
SELECT CASE KEYSLS
CASE "P"
  GOSUB ALTDIAM
CASE "Q"
  GOSUB ALTDIAMP
CASE "R"
  GOSUB AREAANUL
CASE "T"
  GOSUB AREAANULP
CASE "S"
  EXIT DO
END SELECT
CLS
LOOP
CLS
ELSE
END IF

```

```

CLS
COLOR 6,4
LOCATE 11,8:PRINT "*****"
LOCATE 12,8:PRINT "*****"
LOCATE 13,8:PRINT "***"
LOCATE 14,8:PRINT "***          OTRO CALCULO [ S/N ]          ***"
LOCATE 15,8:PRINT "***"
LOCATE 16,8:PRINT "*****"
LOCATE 17,8:PRINT "*****"
PRINT

```

```

INPUT SIS
IF UCASES(SIS) = "S" THEN
GOTO 1
ELSE
END IF
END

```

'SUBROUTINA DIAMETRO EQUIVALENTE

```

DIAMETRO:
IF FORMA = 2 THEN
VOLREC = LADO1 * LADO2 * LADO3
ELSE
IF FORMA = 3 THEN
VOLREC = ((PI * DC ^ 2) / 4) * HC
END IF
END IF
DIES = (VOLREC * 6 / PI) ^ (1 / 3)
VAN = 1273239.545# * QB / (DH ^ 2 - DOP ^ 2)
VIS = (K / .144) * (.72 * (DH - DOP) / VAN) ^ (1 - N) * ((2 + 1 / N) / (.0208)) ^ N
VELS = .4240738384# * DIES * (ROS - ROF) ^ .667 / (ROF ^ .333 * VIS ^ .333)
NRE = ROF * DIES * VELS / (60.0666 * VIS)
IF (NRE >= 3) AND (NRE <= 300) THEN
DS = .8974 * DIES / NRE ^ .0625
ELSE
DS = DIES
END IF
RETURN

```

'SUBROUTINA EXCENTRICIDAD

```

EXCENTRICIDAD:
AN(0) = -22.5
FOR I = 1 TO 9
AN(I) = AN(I - 1) + 22.5
C = .5 * (DH - DOP)
H(I) = (DH ^ 2 / 4 - EXC ^ 2 * C ^ 2 * (SIN(AN(I) * (PI / 180))) ^ 2) ^ .5 - DOP / 2 + EXC * C * (COS(AN(I) * (PI / 180)))
NEXT I
RETURN

```

'SUBROUTINA SELECCION DEL MODELO REOLOGICO

```

MODELO:
CLS
COLOR 7,1
LOCATE 11,8:PRINT "*****"
LOCATE 12,8:PRINT "*****"
LOCATE 13,8:PRINT "***"
LOCATE 14,8:PRINT "***          QUIERES TRABAJAR CON UN MODELO DADO [ S/N ]          ***"
LOCATE 15,8:PRINT "***"
LOCATE 16,8:PRINT "*****"
LOCATE 17,8:PRINT "*****"
PRINT
INPUT TRAS
IF UCASES(TRAS) = "S" THEN
CLS
COLOR 2,8,4

```

```

DO
LOCATE 3,23:PRINT STRINGS(35,220);

```

```

LOCATE 19, 23: PRINT STRINGS(35, 223);
FOR ROW = 4 TO 18
LOCATE ROW, 23: PRINT CHR$(219);
LOCATE ROW, 57: PRINT CHR$(219);
NEXT ROW
LOCATE 5, 29: PRINT "MENU DE MODELOS";
LOCATE 9, 29: PRINT "(N)ewtoniano";
LOCATE 11, 29: PRINT "(P)lastico de Bingham";
LOCATE 13, 29: PRINT "(L)ey de Potencia";
LOCATE 15, 29: PRINT "(S)alir";
LOCATE 22, 3: PRINT SPACES(70)
LOCATE 22, 3: PRINT "OPRIMA LA LETRA SELECCIONADA (N,P,L o S)";
DO
BEEP: KEYS$ = UCASE$(INPUT$(1))
LOOP WHILE INSTR("NPLS", KEYS$) = 0
SELECT CASE KEYS$
CASE "N"
MOQ = 1
CASE "P"
MOQ = 2
CASE "L"
MOQ = 3
CASE "S"
EXIT DO
END SELECT
CLS
LOOP
CLS
ELSE
MOQ = 0
END IF
CLS
COLOR 7, 1
LOCATE 10, 8: PRINT "*****"
LOCATE 11, 8: PRINT "*****"
LOCATE 12, 8: PRINT "*****"
LOCATE 13, 8: PRINT "** TIENES LOS VALORES DE VP Y PC [1] **"
LOCATE 14, 8: PRINT "** o TIENES LECTURAS DE VISCOSIMETRO [2] **"
LOCATE 15, 8: PRINT "*****"
LOCATE 16, 8: PRINT "*****"
LOCATE 17, 8: PRINT "*****"
PRINT
INPUT VALE
IF VALE = 2 THEN
PRINT "*****"
PRINT "**          **"
PRINT "**          N O T A          **"
PRINT "**          **"
PRINT "** LAS LECTURAS REPRESENTATIVAS DE LAS CONDICIONES **"
PRINT "** PARA EL ESPACIO ANULAR SON [100 - 6 RPM] **"
PRINT "**          EN EL VISCOSIMETRO          **"
PRINT "**          **"
PRINT "*****"
INPUT "CUANTAS LECTURAS TIENES"; P
PRINT "EMPIEZA CON LA LECTURA DE MAYOR A MENOR <RPM>"
FOR I = 1 TO P
INPUT "RPM="; L(I)
PRINT "LECTURA A"; L(I); "RPM="; INPUT T(I)
NEXT I
ELSE
INPUT "VISCOSIDAD PLASTICA (Cp)="; VP
INPUT "PUNTO DE CEDENCIA (Pa)="; PAC
PC = PAC / .478964
P = 2
L(1) = 600
L(2) = 300
T(1) = 2 * VP + PC
T(2) = VP + PC
ENDIF

```

'SELECCION PARA EL MODELO NEWTONIANO. FIN'

```

SN = 0
FOR I = 1 TO (P - 1)
IF (T(I)/T(I + 1)) = (L(I)/L(I + 1)) THEN Q = 1 ELSE Q = 0
SN = SN + Q
NEXT I

```

```

VISN = 1
N = 1
K = 1 * .001
IF SN = (P - 1) THEN
TIPO = 1
MODELOS = " NEWTONIANO"
GOTO 1010
END IF

```

'SELECCION PARA EL MODELO PLASTICO DE BINGHAM

```

SUMXY = 0: SUMX = 0: SUMY = 0: SUMX2 = 0: SUMY2 = 0: SUML = 0
FOR I = 1 TO P
VELC(I) = L(I) * 1.7
XY = T(I) * VELC(I)
SUMXY = SUMXY + XY
SUMX = SUMX + T(I)
SUMY = SUMY + VELC(I)
SUMX2 = SUMX2 + T(I)^2
SUMY2 = SUMY2 + VELC(I)^2
SUML = SUML + L(I)^2
NEXT I

```

```

IF VALE = 2 THEN
VP = 300 * (SUMX * SUMY / 1.7 - P * SUMXY / 1.7) / ((SUMY / 1.7)^2 - P * SUML)
PC = .478964 * ((SUMXY / 1.7) * SUMY / 1.7 - SUMX * SUML) / ((SUMY / 1.7)^2 - P * SUML)
ELSE
PC = PAC
END IF

```

$$R = (P * SUMXY - SUMX * SUMY) / ((P * SUMX2 - SUMX^2) * (P * SUMY2 - SUMY^2))^{.5}$$

'SELECCION PARA EL MODELO DE LEY DE POTENCIA

```

SUXY = 0: SUX = 0: SUY = 0: SUX2 = 0: SUY2 = 0
FOR I = 1 TO P
T1(I) = .4343 * LOG(T(I))
VELC1(I) = .4343 * LOG(VELC(I))
XY1 = T1(I) * VELC1(I)
SUXY = SUXY + XY1
SUX = SUX + T1(I)
SUY = SUY + VELC1(I)
SUX2 = SUX2 + T1(I)^2
SUY2 = SUY2 + VELC1(I)^2
NEXT I

```

```

N = (SUX * SUY - P * SUXY) / (SUY^2 - P * SUY2)
LK = (SUXY * SUY - SUX * SUY2) / (SUY^2 - P * SUY2)
K = (10^LK) * .478964
R1 = (P * SUXY - SUX * SUY) / ((P * SUX2 - SUX^2) * (P * SUY2 - SUY^2))^{.5}

```

'SELECCION DEL MODELO DE BINGHAM (TIPO=2) O LEY DE POTENCIA (TIPO=3)

```

IF ((R > R1) AND (R < 1)) OR (R = 1) THEN
TIPO = 2
MODELOS = "PLASTICO DE BINGHAM"
ELSE
TIPO = 3
MODELOS = " LEY DE POTENCIA"
END IF

```

```

1010 IF MOQ = 1 THEN
VISN = 1
N = 1
K = 1 * .001

```

```

TIPO = 1
MODELOS = " NEWTONIANO"
END IF

IF MOQ = 2 THEN
TIPO = 2
MODELOS = "PLASTICO DE BINGHAM"
END IF

IF MOQ = 3 THEN
TIPO = 3
MODELOS = "LEY DE POTENCIA"
END IF

```

```

RETURN

```

```

'SUBROUTINA FLUIDO NEWTONIANO

```

```

NEWTONIANO:
CLS
COLOR 3, 5
FOR J = 1 TO ANGNUM
SVC = 0: SMVC = 0
FOR I = 1 TO 9
LOCATE 10, 34: PRINT J, I
LOCATE 12, 10: PRINT "*****"
LOCATE 13, 10: PRINT "***          **"
LOCATE 14, 10: PRINT "***          BINGHAM          **"
LOCATE 15, 10: PRINT "***          **"
LOCATE 16, 10: PRINT "*****"

```

```

IF DS >= H(I) THEN
VC(J, I) = 1
ELSE
VC(J, I) = .1661480488# * ((ROS - ROF) * (SIN(TETA(J) * (PI / 180)))) ^ (2 / 3) * II(I) ^ 2 / (ROF * VISN * (2 * H(I) - DS) ^ 2 * (H(I) - DS)) ^ (1 / 3)
END IF

```

```

IF VC(J, I) <> 0 THEN
NVC = 1
SVC = SVC + NVC
SMVC = SMVC + VC(J, I)
END IF

```

```

NEXT I
VEC(J) = SMVC / SVC
NEXT J
RETURN

```

```

'SUBROUTINA FLUIDO PLASTICO DE BINGHAM

```

```

BINGHAM:
CLS
COLOR 6, 2
FOR J = 1 TO ANGNUM
SVC = 0: SMVC = 0
FOR I = 1 TO 9
LOCATE 10, 34: PRINT J, I
LOCATE 12, 10: PRINT "*****"
LOCATE 13, 10: PRINT "***          **"
LOCATE 14, 10: PRINT "***          BINGHAM          **"
LOCATE 15, 10: PRINT "***          **"
LOCATE 16, 10: PRINT "*****"

```

```

IF DS >= H(I) THEN
VC(J, I) = 1
ELSE
CONTA = 0
IF I <> 1 THEN
Y = .5 * H(I) - .5 * DS

```

```

IF (H(I) * .5) <= Y1 OR Y <= Y1 THEN
DPDL = DPDL1
GOTO 148
ELSE
END IF
ELSE
Y = .5 * H(I) * .9
END IF

```

```

127 VFG = 6.033456 * DS * (ROS - ROF) * (SIN(TETA(J) * (PI / 180))) / (ROF ^ .5 * VP ^ .5)
CONTA = CONTA + 1

```

'METODO DE BISECCION

```

TL = .001; NI = 20
A = 50; B = 2000
DPDLV = (A + B) / 2
FOR M = 1 TO NI
FX = (.03 * (H(I) / 2) ^ 2 * DPDLV / VP * (1 - Y ^ 2 / (H(I) / 2) ^ 2) - 60 * (H(I) / 2) * PC / VP * (1 - Y / (H(I) / 2))) * ((ABS(1000 *
PC / VP - Y * DPDLV / VP)) ^ .5) - VFO
FA = (.03 * (H(I) / 2) ^ 2 * A / VP * (1 - Y ^ 2 / (H(I) / 2) ^ 2) - 60 * (H(I) / 2) * PC / VP * (1 - Y / (H(I) / 2))) * ((ABS(1000 * PC / VP
- Y * A / VP)) ^ .5) - VFO
IF FX * FA > 0 THEN
A = DPDLV
GOTO 130
END IF
B = DPDLV
130 DPDLN = (A + B) / 2
ER = ABS((DPDLN - DPDLV) / DPDLN)
IF ER <= TL GOTO 140
DPDLV = DPDLN
NEXT M
PRINT "NO CONVERGE EN "; NI; "ITERACIONES"
STOP
GOTO 150

```

```

140 DPDL = DPDLN

```

' DETERMINACION SI CAE EN REGION DE FLUJO TAPON

```

IF CONTA = 1 THEN
Y = .5 * H(I) - .5 * DS
Y1 = 1000 * PC / DPDL
DPDL1 = DPDL
IF Y <= Y1 THEN
Y = Y1
ELSE
END IF
GOTO 127
ELSE
END IF

```

```

148 TS = .001 * (H(I) / 2) * DPDL
VC(J, I) = 20 * (H(I) / 2) * TS / VP * (1 - 1.5 * PC / TS + .5 * (PC / TS) ^ 3)
END IF

```

```

IF I <> 1 THEN
IF VC(J, I) > VC(J, I - 1) THEN VC(J, I) = VC(J, I - 1)
END IF

```

```

150 IF VC(J, I) <= 0 THEN
NVC = 1
SVC = SVC + NVC
SMVC = SMVC + VC(J, I)
END IF

```

```

NEXT I
VEC(J) = SMVC / SVC
NEXT J
RETURN

```

'SUBROUTINA FLUIDO DE LEY DE POTENCIA

```
POTENCIA:
CLS
COLOR 6, 2
FOR J = 1 TO ANGNUM
SVC = 0: SMVC = 0
FOR I = 1 TO 9
LOCATE 10, 34: PRINT J, I
LOCATE 12, 10: PRINT "....."
LOCATE 13, 10: PRINT "**"
LOCATE 14, 10: PRINT "** LEY DE POTENCIA **"
LOCATE 15, 10: PRINT "**"
LOCATE 16, 10: PRINT "....."
```

```
IF DS >= H(I) THEN
VC(J, I) = 1
ELSE
Y = .5 * DS
VFG = 6.033456 * DS * (ROS - ROF) * (SIN(TETA(J) * (PI / 180))) / (ROF ^ .5 * VP ^ .5)
```

'METODO DE BISECCION

```
TL = .001: NI = 20
A = 50: B = 2000
DPDLV = (A + B) / 2
FOR M = 1 TO NI
FX = (60 * (DPDLV / K) ^ (1 / N) * ((H(I) / 2000) ^ (1 + 1 / N) - (H(I) / 2000 - Y / 1000) ^ (1 + 1 / N)) / (1 + 1 / N)) * (((H(I) *
DPDLV / (2000 * K)) ^ (1 / N)) ^ .5) - VFG
FA = (60 * (A / K) ^ (1 / N) * ((H(I) / 2000) ^ (1 + 1 / N) - (H(I) / 2000 - Y / 1000) ^ (1 + 1 / N)) / (1 + 1 / N)) * (((H(I) * A / (2000 *
K)) ^ (1 / N)) ^ .5) - VFG
IF FX * FA > 0 THEN
A = DPDLV
GOTO 230
END IF
B = DPDLV
230 DPDLN = (A + B) / 2
ER = ABS((DPDLN - DPDLV) / DPDLN)
IF ER <= TL GOTO 240
DPDLV = DPDLN
NEXT M
PRINT "NO CONVERGE EN "; NI; "ITERACIONES"
GOTO 250
```

```
240 DPDL = DPDLN
VC(J, I) = 60 * (DPDL / K) ^ (1 / N) * (H(I) / 1000) ^ (1 + 1 / N) / (2 ^ (1 / N) * (4 + 2 / N))
END IF
```

```
250 IF VC(J, I) <> 0 THEN
NVC = 1
SVC = SVC + NVC
SMVC = SMVC + VC(J, I)
END IF
```

```
NEXT I
VEC(J) = SMVC / SVC
NEXT J
RETURN
```

'SUBROUTINA REGIMEN LAMINAR

```
LAMINAR:
CLS
COLOR 3, 8
FOR J = 1 TO ANGNUM
FOR I = 1 TO 9
LOCATE 10, 30: PRINT J, I
LOCATE 12, 10: PRINT "....."
LOCATE 13, 10: PRINT "**"
LOCATE 14, 10: PRINT "** LAMINAR **"
```

```
LOCATE 15, 10: PRINT ""
LOCATE 16, 10: PRINT "*****"
REGS = "LAMINAR"
```

```
IF DS >= H(I) THEN
VCP(J, I) = 1
GOTO 1830
ENDIF
```

```
VC = VC(J, 2)
'DH-DOP=2 * H(I)
1425 VISA = (K/.144) * (.72 * 2 * H(I) / VC) ^ (1 - N) * ((2 + 1 / N) / (.0208)) ^ N
VS = 5.5
CV = .0583333# * ROP + .505
1450 NREP = ROF * DS * VS / (60.0666 * VISA)
CD = 40 / NREP
VSN = 6.862 * (DS * (ROS - ROF) / (CD * ROF)) ^ .5
DIF1 = ABS(VSN - VS)
IF DIF1 <= .1 THEN
```

```
GOTO 1500
```

```
ELSE
VS = VSN
GOTO 1450
```

```
ENDIF
```

```
1500 VCN = (.329664 * CV * 2 * H(I) * (ROS - ROF) ^ 1.5 * DS ^ 1.5 * (SIN(TETA(J) * (PI / 180))) / (ROF ^ .5 * VISA)) ^ .5
```

```
DIF2 = ABS(VCN - VC)
```

```
IF DIF2 <= .1 THEN
```

```
VCP(J, I) = VC
VELASP(J, I) = VS
```

```
ELSE
```

```
VC = VCN
GOTO 1425
```

```
ENDIF
```

```
1830 NEXT I
```

```
NEXT J
```

```
RETURN
```

'SUBROUTINA REGIMEN TRANSITORIO

TRANSITORIO:

CLS

COLOR 3, 1

FOR J = 1 TO ANGNUM

FOR I = 1 TO 9

LOCATE 10, 30: PRINT J, I

LOCATE 12, 10: PRINT "*****"

LOCATE 13, 10: PRINT ""

LOCATE 14, 10: PRINT "" TRANSITORIO ""

LOCATE 15, 10: PRINT ""

LOCATE 16, 10: PRINT "*****"

REGS = "TRANSITORIO"

```
IF DS >= H(I) THEN
```

```
VCP(J, I) = 1
```

```
GOTO 2783
```

```
ENDIF
```

```
VC = VC(J, 2)
```

```
'DH-DOP=2 * H(I)
```

```
2425 VISA = (K/.144) * (.72 * 2 * H(I) / VC) ^ (1 - N) * ((2 + 1 / N) / (.0208)) ^ N
```

```
VS = 5.5
```

```
CV = .0583333# * ROP + .505
```

```
2450 NREP = ROF * DS * VS / (60.0666 * VISA)
```

```
CD = 22 / NREP ^ .5
```

```
VSN = 6.862 * (DS * (ROS - ROF) / (CD * ROF)) ^ .5
```

```
DIF3 = ABS(VSN - VS)
```

```
IF DIF3 <= .1 THEN
```

```
GOTO 2700
```

```
ELSE
```

```
VS = VSN
```

```
GOTO 2450
```

```

END IF
2700 VCN = (1.092309 * CV * 2 * H(I) * (ROS - ROF) ^ 1.1667 * DS ^ .5 * (SIN(TETA(J) * (PI / 180))) / (ROF ^ .8333 * VISA ^
.3333)) ^ .5
DIF4 = ABS(VCN - VC)
IF DIF4 <= .1 THEN
  VCP(J, I) = VC
  VELASP(J, I) = VS
ELSE
  VC = VCN
  GOTO 2425
END IF
2783 NEXT I
NEXT J
RETURN

```

'SUBROUTINA REGIMEN TURBULENTO

```

TURBULENTO:
CLS
COLOR 3, 9
FOR J = 1 TO ANGNUM
FOR I = 1 TO 9
LOCATE 10, 30: PRINT J, I
LOCATE 12, 10: PRINT "*****"
LOCATE 13, 10: PRINT "*****"
LOCATE 14, 10: PRINT "***** TURBULENTO *****"
LOCATE 15, 10: PRINT "*****"
LOCATE 16, 10: PRINT "*****"
REGS = "TURBULENTO"

```

```

IF DS >= H(I) THEN
VCP(J, I) = 1
GOTO 3183
END IF

```

```

VC = VC(J, 2)
'DII-DOP=2 * H(I)
3425 VISA = (K / .144) * (.72 * 2 * H(I) / VC) ^ (1 - N) * ((2 + I / N) / (.0208)) ^ N
VS = 5.5
CV = .0583333# * ROP + .505
3450 NREP = ROF * DS * VS / (60.0666 * VISA)
CD = 1.5
VSN = 6.862 * (DS * (ROS - ROF) / (CD * ROF)) ^ .5
DIF5 = ABS(VSN - VS)
IF DIF5 <= .1 THEN
GOTO 3900
ELSE
VS = VSN
GOTO 3450
END IF
3900 VCN = (9.41186 * CV * 2 * H(I) * (ROS - ROF) * (SIN(TETA(J) * (PI / 180))) / ROF) ^ .5
DIF6 = ABS(VCN - VC)
IF DIF6 <= .1 THEN
  VCP(J, I) = VC
  VELASP(J, I) = VS
ELSE
  VC = VCN
  GOTO 3425
END IF
3183 NEXT I
NEXT J
RETURN

```

'SUBROUTINA CALCULO DEL ESPESOR DEL RECORTE

```

ESPESOR:
CLS
COLOR 3, 9
LOCATE 10, 30: PRINT J, I
LOCATE 12, 10: PRINT "*****"

```

```

LOCATE 13, 10: PRINT "***"
LOCATE 14, 10: PRINT "*** ESPESOR DEL RECORTE ***"
LOCATE 15, 10: PRINT "***"
LOCATE 16, 10: PRINT "*****"

```

```

'SELECCION SI EL AREA DEL RECORTE ESTA EN LA PARTE INFERIOR DE LA TP
'DEL AREA TRANSVERSAL DE LA SECCION FORMADA POR TP Y AGUJERO

```

```

IF ARREC <= AREAB THEN
FACTORINF = ARREC / ARAN
FOR U = 0 TO 100 STEP 2
MED = (PORCAP(U) + PORCAP(U + 2)) / 2
IF (FACTORINF > PORCAP(U)) AND (FACTORINF <= MED) THEN
DINF = U
ELSE
IF (FACTORINF > MED) AND (FACTORINF <= PORCAP(U + 2)) THEN
DINF = U + 2
END IF
END IF
NEXT U
HREC = DINF * DH / 100
ENDIF

```

```

'SELECCION SI EL AREA DEL RECORTE ESTA EN EL ESPACIO ANULAR
'DE LA PARTE OCUPADA POR LA TP DE LA SECCION TRANSVERSAL

```

```

IF (ARREC < AREAA) AND (ARREC > AREAB) THEN
FACTOR = ARREC / ARAN
FOR U = 0 TO 100 STEP 2
MED = (PORCAP(U) + PORCAP(U + 2)) / 2
IF (FACTOR > PORCAP(U)) AND (FACTOR <= MED) THEN
D = U
ELSE
IF (FACTOR > MED) AND (FACTOR <= PORCAP(U + 2)) THEN
D = U + 2
END IF
END IF
NEXT U

```

```

ALTREC = D * DH / 100
ALTTP1 = ALTREC - H(9)
RELDTP1 = CINT((ALTTP1 / DOP) * 100)
FOR U = 0 TO 100 STEP 2
IF (RELDTP1 = U) OR ((RELDTP1 + 1) = U) THEN
FACTORTP1 = PORCAP(U)
END IF
NEXT U
AREATP1 = ARTP * FACTORTP1
AREA2 = ARREC + 3 * AREATP1
3045 FACTOR2 = AREA2 / ARAN

```

```

FOR U = 0 TO 100 STEP 2
MED = (PORCAP(U) + PORCAP(U + 2)) / 2
IF (FACTOR2 > PORCAP(U)) AND (FACTOR2 <= MED) THEN
D2 = U
ELSE
IF (FACTOR2 > MED) AND (FACTOR2 <= PORCAP(U + 2)) THEN
D2 = U + 2
END IF
END IF
NEXT U

```

```

ALTREC2 = D2 * DH / 100
ALTTP2 = ALTREC2 - H(9)
RELDTP2 = CINT((ALTTP2 / DOP) * 100)

```

```

FOR U = 0 TO 100 STEP 2
IF (RELDTP2 = U) OR ((RELDTP2 + 1) = U) THEN
FACTORTP2 = PORCAP(U)
END IF
NEXT U

```

```

ARTP2 = ARTP * FACTORTP2
AREATP2 = ARTP2 - AREATP1
AREAN = AREA2 - AREATP1 - AREATP2
DIFAREA = ABS(ARREC - AREAN)

IF DIFAREA <= 55 THEN
  HREC = ALTREC2
ELSE
  IF AREAN > ARREC THEN
    AREA2 = AREA2 * .95
  ELSE
    AREA2 = AREA2 * 1.05
  END IF
  GOTO 3045
END IF
END IF

'SELECCION SI EL AREA DEL RECORTE LLEGA ARRIBA DE LA TP
'EN LA SECCION TRANSVERSAL DEL ESPACIO ANULAR

IF ARREC >= AREA A THEN
  FACTORSUP = (ARREC + ARTP) / ARAN

  FOR U = 0 TO 100 STEP 2
    MED = (PORCAP(U) + PORCAP(U + 2)) / 2
    IF (FACTORSUP > PORCAP(U)) AND (FACTORSUP <= MED) THEN
      DSUP = U
    ELSE
      IF (FACTORSUP > MED) AND (FACTORSUP <= PORCAP(U + 2)) THEN
        DSUP = U + 2
      END IF
    END IF
  NEXT U

  HREC = DSUP * DH / 100
END IF

RETURN

PANTALLA:
'RESULTADOS
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT TAB(25); "MODELO "; MODELOS
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          VEL CRITICA (m/min)"
PRINT " 0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"

PRINT

AS = "#### "
LS = "###"
FOR J = 1 TO ANGNUM
  PRINT USING LS; TETA(J);
  FOR I = 1 TO 9
    PRINT USING AS; VC(J, I);
  NEXT I
  PRINT
NEXT J
'PRINT

STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7

```

```

PRINT
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          VEL CRITICA (m/min) "
PRINT
PRINT " 0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "##"
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; VCP(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J

```

```

PRINT
PRINT TAB(25); "MODELO "; MODELOS
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          GASTO CRITICO (m3/min)"
PRINT
PRINT " 0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "##"
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; QC(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
PRINT

```

```

STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          GASTO CRITICO (m3/min) "
PRINT
PRINT " 0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "##"
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; QCP(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J

```

```

PRINT
PRINT TAB(25); "MODELO "; MODELOS
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"
PRINT

```

```
PRINT
PRINT "ANGULO          ESPESOR CAMA RECORTE (mm)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT
```

```
AS = "###.## "
LS = "##"
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; ESPREC(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
PRINT
```

```
STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          ESPESOR CAMA RECORTE (mm)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT
```

```
AS = "###.## "
LS = "##"
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; ESPREC(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
```

```
STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
PRINT TAB(25); "MODELO "; MODELOS
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          CONCENTRACION TOTAL DE RECORTES (%)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT
```

```
AS = "###.## "
LS = "##"
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; CONREC(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
PRINT
```

```
STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
```

```

PRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          CONCENTRACION TOTAL DE RECORTES (%)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; CONRECP(I, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
PRINT

```

```

STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
PRINT TAB(25); "MODELO "; MODELOS
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          RELACION ALTURA RECORTE/DIAMETRO AGUJERO (%)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; RELALT(I, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
PRINT

```

```

STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO          RELACION ALTURA RECORTE/DIAMETRO AGUJERO (%)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; RELALTP(I, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
PRINT

```

```

STOP
CLS

```

```

COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
PRINT TAB(25); "MODELO "; MODELOS
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO      RELACION AREA RECORTE/AREA ANULAR (%)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; RELAREA(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
PRINT

```

```

STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO      RELACION AREA RECORTE/AREA ANULAR (%)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; RELAREAP(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
PRINT

```

```

STOP
CLS
COLOR 11, 4, 7
PRINT
PRINT
PRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"
PRINT
PRINT
PRINT "ANGULO      VELOCIDAD ASENTAMIENTO (m/min)"
PRINT
PRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
PRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
PRINT USING AS; VELASP(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J

```

```

PRINT
PRINT
PRINT "          ESPACIO < H > ENTRE PLACAS (mm) "
PRINT
PRINT " 0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180"
PRINT

AS = "#### "
FOR I = 1 TO 9
PRINT USINO AS; H(I);
NEXT I
PRINT

RETURN

DATOS:
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(15); "  D A T O S"
LPRINT
LPRINT " FECHA CORRIDA "; DATES; " A LAS "; TIMES
LPRINT " NOMBRE DEL POZO          "; NOPS
LPRINT " DIAMETRO DE LA BARRENA (mm)          "; DII
LPRINT " DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA (mm)          "; DOP
LPRINT " DENSIDAD DEL FLUIDO DE PERFORACION (kg/m3)          "; ROF
LPRINT " DENSIDAD DEL RECORTE (kg/m3)          "; ROS
LPRINT " EXCENTRICIDAD DE LA TUBERIA (FRACCION)          "; EXC
LPRINT " FORMA DEL RECORTE          "; RECORTES
  IF FORMA <> 1 THEN
    IF FORMA = 2 THEN
      LPRINT " LONGITUD LADO 1 (mm)          "; LADO1
      LPRINT " LONGITUD LADO 2 (mm)          "; LADO2
      LPRINT " LONGITUD LADO 3 (mm)          "; LADO3
    ELSE
      IF FORMA = 3 THEN
        LPRINT " ALTURA DEL CILINDRO (mm)          "; HC
        LPRINT " DIAMETRO DEL CILINDRO (mm)          "; DC
      END IF
    END IF
  END IF
  LPRINT " DIAMETRO EQUIVALENTE DEL RECORTE (mm)          "; DS
  ELSE
    LPRINT " DIAMETRO DEL RECORTE (mm)          "; DS
  END IF
  LPRINT " RITMO DE PENETRACION DE LA BARRENA (m/hr)          "; ROP
  LPRINT " OASTO DE BOMBEO (m3/min)          "; QB
  IF ANGES <> 0 THEN
    LPRINT " ANGULO DE DESVIACION (grados)          "; ANODES
  END IF
  IF VALE = 2 THEN
    FOR I = 1 TO P
      LPRINT " LECTURA A"; I(I); "RPM ="; T(I)
    NEXT I
  END IF
  LPRINT " VISCOSIDAD PLASTICA (Cp)          "; VP
  LPRINT " PUNTO DE CEDENCIA (Pa)          "; PC
  LPRINT " INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO < n >          "; N
  LPRINT " INDICE DE CONSISTENCIA < K > (Pa-s^n)          "; K
  LPRINT
  RETURN

VCPUNTUAL:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"; "-"; MODELOS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANOULO          VEL CRITICA (m/min)"
LPRINT
LPRINT " 0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"

```

LPRINT

```
AS = "###.## "  
LS = "## "  
BS = "###.## "  
FOR J = 1 TO ANGNUM  
LPRINT USING LS; TETA(J);  
FOR I = 1 TO 9  
LPRINT USING AS; VC(J, I);  
NEXT I  
LPRINT USING BS; VEC(J);  
LPRINT  
NEXT J  
LPRINT  
LPRINT
```

RETURN

```
VCPROMEDIO:  
WIDTH LPRINT 132  
LPRINT  
LPRINT  
LPRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"; "-"; REGS  
LPRINT  
LPRINT  
LPRINT "ANGULO          VEL CRITICA (m/min)"  
LPRINT  
LPRINT " 0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"  
LPRINT
```

```
AS = "###.## "  
LS = "## "  
BS = "###.## "  
FOR J = 1 TO ANGNUM  
LPRINT USING LS; TETA(J);  
FOR I = 1 TO 9  
LPRINT USING AS; VCP(J, I);  
NEXT I  
LPRINT USING BS; VEC(J);  
LPRINT  
NEXT J  
LPRINT  
RETURN
```

```
QCPUNTUAL:  
WIDTH LPRINT 132  
LPRINT  
LPRINT  
LPRINT  
LPRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"; "-"; MODELOS  
LPRINT  
LPRINT  
LPRINT "ANGULO          GASTO CRITICO (m3/min)"  
LPRINT  
LPRINT " 0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"  
LPRINT
```

```
AS = "###.## "  
LS = "## "  
BS = "###.## "  
FOR J = 1 TO ANGNUM  
LPRINT USING LS; TETA(J);  
FOR I = 1 TO 9  
LPRINT USING AS; QC(J, I);  
NEXT I  
LPRINT USING BS; SQC(J);  
LPRINT  
NEXT J  
LPRINT  
RETURN
```

```

QCPROMEDIO:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"; "-"; REGS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO          GASTO CRITICO (m3/min) "
LPRINT
LPRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"
LPRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; QCP(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SQCP(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN

```

```

ESPUNTUAL:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"; "-"; MODELOS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO          ESPESOR CAMA RECORTE (mm) "
LPRINT
LPRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"
LPRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; ESPREC(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SESPREC(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN

```

```

ESPPROMEDIO:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"; "-"; REGS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO          ESPESOR CAMA RECORTE (mm) "
LPRINT
LPRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"
LPRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; ESPRECP(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SESPRECP(J);

```

```
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN
```

```
CONCENPUN:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"; "-", MODELOS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO      CONCENTRACION TOTAL DE RECORTES (%)"
LPRINT
LPRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"
LPRINT
```

```
AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; CONREC(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SCONREC(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN
```

```
CONCENPROM:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"; "-", REGS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO      CONCENTRACION TOTAL DE RECORTES (%)"
LPRINT
LPRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"
LPRINT
```

```
AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; CONRECP(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SCONRECP(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN
```

```
ALTDIAM:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"; "-", MODELOS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO      RELACION ALTURA RECORTE DIAMETRO AGUJERO (%)"
LPRINT
LPRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"
LPRINT
```

```
AS = "###.## "
LS = "## "
```

```

FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; RELALT(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SRELALT(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN

```

```

ALTDIAMP:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"; "-"; REGS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO      RELACION ALTURA RECORTE/DIAMETRO AGUJERO (%)"
LPRINT
LPRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"
LPRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; RELALTP(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SRELALTP(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN

```

```

AREAANUL:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PUNTUAL"; "-"; MODELOS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANOULO      RELACION AREA RECORTE/AREA ANULAR (%)"
LPRINT
LPRINT "  0  22.5  45  67.5  90  112.5  135  157.5  180  PROM"
LPRINT

```

```

AS = "###.## "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANONUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; RELAREA(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SRELAREA(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN

```

```

AREAANULP:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"; "-"; REGS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO      RELACION AREA RECORTE AREA ANULAR (%)"
LPRINT

```

```
LPRINT " 0 22.5 45 67.5 90 112.5 135 157.5 180 PROM"
LPRINT
```

```
AS = "#### "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; RELAREAP(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; SRELAREAP(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN
```

```
VELASPROM:
WIDTH LPRINT 132
LPRINT
LPRINT
LPRINT TAB(30); "MODELO PROMEDIO"; "-"; REGS
LPRINT
LPRINT
LPRINT "ANGULO VELOCIDAD ASENTAMIENTO (m/min)"
LPRINT
LPRINT " 0 22.5 45 67.5 90 112.5 135 157.5 180 PROM"
LPRINT
```

```
AS = "#### "
LS = "## "
FOR J = 1 TO ANGNUM
LPRINT USING LS; TETA(J);
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; VELASP(J, I);
NEXT I
LPRINT USING AS; VELAS(J);
LPRINT
NEXT J
LPRINT
RETURN
```

```
ESPACIO:
LPRINT
LPRINT
LPRINT " ESPACIO < H > ENTRE PLACAS (mm)"
LPRINT
LPRINT " 0 22.5 45 67.5 90 112.5 135 157.5 180"
LPRINT
```

```
AS = "#### "
FOR I = 1 TO 9
LPRINT USING AS; H(I);
NEXT I
LPRINT
RETURN
```