

01174
4
Zey

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTABILIDAD MECÁNICA DE POZOS EN LUTITAS.

TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA PETROLERA.

Presenta:

JOSÉ MANUEL PAVÓN PREVE.

Director de tesis:

DR. VICENTE CASARIEGO GONZÁLEZ

Marzo de 1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Resumen:

Existen múltiples estudios para predecir el comportamiento de las paredes de un pozo al someterse a diferentes tipos de esfuerzos, sin que hasta la fecha, se tenga un modelo que pueda predecir dicho comportamiento en forma efectiva. En este trabajo, se presenta una alternativa para predecir la inestabilidad del pozo.

El modelo desarrollado en el trabajo, considera los aspectos mecánicos y los químicos, entre el fluido de perforación y el de las lutitas, que afectan la estabilidad de las paredes del pozo. El modelo determina los parámetros óptimos de densidad y salinidad en pozos direccionales y verticales, para fluidos base agua. Químicamente se inducen esfuerzos en el interior de los poros, afectando directamente el comportamiento de los esfuerzos en la vecindad del pozo, estos esfuerzos, aunados con los mecánicos, establecen el modelo de estabilidad. La ecuación constitutiva está basada en un modelo poro-elástico.

En efecto, el modelo toma en cuenta los esfuerzos inducidos en el interior de los poros, por la actividad química entre los fluidos de la formación y la del lodo de perforación. Además, el modelo considera los esfuerzos mecánicos más conocidos.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Contenido:

Capítulo	Página.
1. Introducción.....	6
2. Descripción del problema y objetivo.....	9
3. Estabilidad mecánica y modelo constitutivo.....	11
3.1. Estado de esfuerzos en las paredes del pozo	11
3.1.1 El estado de esfuerzos en la formación original	11
3.1.2 El estado de esfuerzos creado por la perforación del pozo	23
3.1.3 El estado de esfuerzos impuesto por las condiciones de frontera	29
4. Comportamiento de las lutitas en las paredes del pozo por interacción con el fluido de perforación	38
4.1 Alteraciones en la presión de poro, por interacción química con el fluido de perforación	39
4.2 Modelo de estabilidad integrando el potencial químico	46
4.3 Modelo constitutivo para formaciones arcillosas. Esfuerzos efectivos en la pared del pozo	48
5. Propiedades de las formaciones y límites de falla.....	53
5.1 Criterios de falla de la roca	54
5.2 Desarrollo para la solución del problema	60

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

5.3 Desarrollo de un programa de cómputo para determinar la estabilidad del pozo	71
6. Aplicación del programa a pozos de la Zona Marina	86
7. Conclusiones y recomendaciones.....	96
Nomenclatura.....	98
Referencias.....	104
Apéndice A.....	107
Lista de tablas.....	pag.
1. Mecanismos de transporte.....	43
2. Presión osmótica con lodos de emulsión inversa.....	45
3. Alteración de la presión de poro por diferencial de potencial químico	48
4. Resultados del análisis de núcleos	86
5. Información Balam-13	89
6. Esfuerzos normales de corte y principales.....	92
7. Esfuerzos al variar la salinidad pozo Balam-13.....	93

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Lista de figuras.....pag

1.	Esfuerzos a los que están sometidas las formaciones.....	12
2.	Estado de esfuerzos en coordenadas cilíndricas.....	13
3.	Vector desplazamiento.....	18
4.	Estado plano de esfuerzos.....	26
5.	Estado de esfuerzos y rotación de ejes.....	36
6.	Fenómeno de ósmosis.....	41
7.	Sistema coordenado del pozo (Coordenadas cartesianas).....	51
8.	Sistema coordenado del pozo (Coordenadas cilíndricas).....	51
9.	Círculo de Mohr-Coulomb.....	56
10.	Criterio de falla.....	58
11.	Comparación del perfil de falla con el perfil de esfuerzos normales.....	59
12.	Ejemplo. Esfuerzo normal vs esfuerzos de corte.....	70
13.	Avance diario de perforación del pozo Balam 13.....	87
14.	Resultados pozo Balam 13.....	91
15.	Esfuerzos al variar la salinidad.....	94

1.- Introducción.

El 75% de las formaciones perforadas de todos los pozos petroleros, son efectuadas en formaciones arcillosas, esto es en lutitas. Las lutitas son las formaciones que más problemas presentan durante la perforación de pozos. Y causan por lo menos el 90% de los problemas de inestabilidad en las paredes del agujero. Cuando se perfora una zona arcillosa, generalmente se presentan dificultades, siendo los más típicos los siguientes: embolamiento de la barrena, derrumbes, altos filtrados, cerramiento del agujero y pérdidas de circulación. Estos problemas representan un gasto excesivo para la industria de perforación, y concierne al Ingeniero de perforación las soluciones para estabilizar las paredes del agujero.

Los problemas antes mencionados, están íntimamente ligados a las propiedades de las lutitas, al estado de esfuerzos en la formación, al contenido de agua y la composición química de la misma, a la presión de poro y al grado de compactación de la roca. La industria de la perforación ha puesto especial atención al programa de densidades, al programa de Tuberías de Revestimiento (T.R.) y a las operaciones que se efectúan durante el desarrollo del pozo, para minimizar los costos, pero no se ha puesto el mismo empeño en proteger la estabilidad del pozo, que es el problema que más ha afectado en los costos durante la perforación y la vida productiva del pozo. La estabilidad de las lutitas, en muchas ocasiones es incontrolable, dando como resultado pérdidas de tiempos en las operaciones y/o la necesidad de desviar el pozo.

Existen muchos factores que afectan la estabilidad del pozo. Entre los más importantes están el tipo y la densidad del fluido de perforación.

El uso de los lodos de emulsión inversa, es una alternativa de solución para los problemas de inestabilidad de las lutitas. Estos lodos propician en la formación una barrera semipermeable, esto es que el lodo base aceite absorbe el agua de la formación o viceversa. La existencia de una membrana semipermeable controlará la absorción. En efecto, basta modificar la salinidad del lodo a un rango de valores determinados para eliminar la inestabilidad de las lutitas. Desafortunadamente los problemas de contaminación que los lodos de emulsión inversa producen limitan su uso, generalizándose el empleo de los lodos base agua.

Generalmente la inestabilidad de las lutitas ocurre cuando la presión de la formación excede a la presión del fluido de perforación. Por lo tanto, se piensa, que basta con tener una densidad de fluido mayor a la presión de poro de las formaciones para que el pozo esté bajo control, sin embargo se ha observado que los problemas de estabilidad del agujero no dejan de suceder. Existen otros factores que afectan la estabilidad del pozo, entre ellos podemos citar: la inclinación del pozo, el rumbo y el intercambio de fluidos entre el lodo de perforación y los fluidos que contienen las rocas. Este último factor juega un papel importante, en virtud de que altera la presión de poro de las lutitas y esta alteración afectará la estabilidad del agujero.

Existen múltiples estudios para predecir el comportamiento de las rocas, al ser perforadas y someterse a diferentes tipos de esfuerzos. Desafortunadamente no existe un modelo que pueda predecir dicho comportamiento en una forma efectiva, debido a que el comportamiento de las lutitas es demasiado compleja, en esencia, la mecánica de rocas, ha sido aplicada para predecir la estabilidad de los pozos. Pero existe la necesidad de un mayor número de herramientas matemáticas para simular los problemas físicos de los agujeros.

En este trabajo se presenta un modelo matemático para predecir la inestabilidad de la pared del pozo. El modelo toma en cuenta los esfuerzos generados por el intercambio de fluidos entre el lodo de perforación y los fluidos contenidos en las lutitas.

Aunque el modelo aquí presentado incluye el esfuerzo adicional causado por el intercambio de fluidos, tiene limitaciones. Entre las limitaciones sobresalientes están el considerar que las lutitas presentan un comportamiento lineal-elástico, y que las rocas son homogéneas e isotrópicas.

2.- Descripción del problema y objetivo.

Las lutitas son comúnmente las que provocan la mayoría de los problemas durante la perforación, estos problemas son frecuentemente atribuidos a la interacción química lodo-lutita, a la presión anormal y a excesivas sobrecargas o esfuerzos tectónicos, sin embargo, en el campo generalmente se analizan los problemas desde un punto de vista operativo, sin llegar a investigar exhaustivamente las causas que los provocan. Esto evita tomar medidas correctivas, y encontrar soluciones durante el desarrollo de los campos.

El problema de inestabilidad del pozo, es resultado de la remoción de la roca al ser perforada de su sitio original. Esta roca originalmente se encuentra sometida a un estado de esfuerzos compresivos, y en estado natural se encuentran en equilibrio mecánico. Al perforar el pozo se produce una redistribución de esfuerzos alrededor del agujero y los esfuerzos que estaban siendo soportados por la roca removida se distribuyen concentrándose en las paredes del pozo, estos esfuerzos tienen que guardar un equilibrio para evitar el colapso por derrumbes, cerramiento del agujero, fracturamiento de la roca, fricciones, etc. El fluido de perforación aparte de tener la densidad óptima para soportar estos esfuerzos de la roca tiene que tener propiedades químicas que no afecten la propiedades de resistencia de la roca y que no alteren la presión de poro de la misma.

En este trabajo se presenta un modelo que conjunta los aspectos mecánicos y químicos que afectan la estabilidad de pozos. Se espera que el modelo conduzca a un mejor entendimiento de la estabilidad de las arcillas durante la perforación de pozos.

Por lo anteriormente mencionado el objetivo de este trabajo es el siguiente:

1.- Hacer un análisis del estado de esfuerzos que guardan las paredes del pozo, y establecer un modelo constitutivo que represente ese estado de esfuerzos.

2.- Establecer las bases para el estudio de la alteración de la presión de poro en las formaciones arcillosas por la diferencial de concentración de sales entre el fluido de perforación y la formación, dando una solución matemática que pueda ser añadida a las ecuaciones constitutivas originales.

3.- Hacer un programa de cómputo integrando a las ecuaciones constitutivas el criterio de falla de la roca, para determinar los esfuerzos en la pared del agujero y obtener el rango de densidades y de salinidades del fluido de perforación, en el cual se puede operar en una forma segura para evitar colapso y fractura del pozo.

3.- Analizar los resultados obtenidos, resaltando los puntos críticos, para utilizar este proyecto en pozos de desarrollo de la Zona Marina de PEMEX Exploración Producción, para culminar con éxito la perforación de pozos.

3.- Estabilidad mecánica y modelo constitutivo¹.

En este capítulo se desarrolla el modelo matemático para determinar el estado de esfuerzos a los que está sometida la roca del pozo. El modelo considera un plato cuadrado con un agujero circular en el centro (Timoshenko y Goodier²), asumiendo un comportamiento lineal elástico de la roca, con propiedades homogéneas e isotrópicas, de proporciones grandes para descartar los efectos de extremo.

3.1 Estado de esfuerzos en las paredes del pozo.

Para obtener el estado total de esfuerzos, es necesario estudiar los siguientes estados esfuerzos:

- 1.- El estado de esfuerzos en la formación original.
- 2.- El estado de esfuerzos creado por la perforación del pozo.
- 3.- El estado de esfuerzos impuesto por las condiciones de frontera.

3.1.1 El estado de esfuerzos en la formación original.

Se considera que el esfuerzo principal es el vertical, referido a una profundidad vertical z , y se calcula integrando el registro de densidad mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\text{vert}} = \int_0^z \rho_b (g/g_c) dz \quad \text{--- (1)}$$

En el plano horizontal existen dos componentes de esfuerzos principales originales in-situ, el máximo σ_{H1} y el mínimo σ_{H2} (figura 1). Estos esfuerzos se calculan considerando

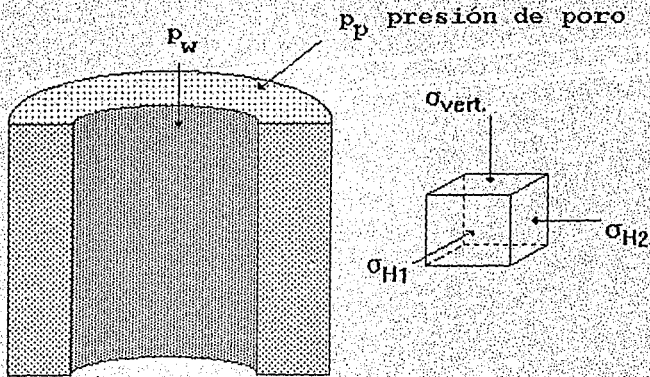


Figura 1

Esfuerzos a los que están sometidas las formaciones

que las formaciones tienen un comportamiento lineal y de acuerdo a un modelo poro-elástico, sin deformaciones laterales durante la sedimentación. Si no existe información externa acerca de las magnitudes de σ_{H1} y σ_{H2} , se supone que ambas tienen el mismo valor y se determinan con la siguiente fórmula²:

$$\sigma_{H1} = \sigma_{H2} = \frac{\nu}{1 - \nu} (\sigma_{vert} - P_p) + P_p \quad (2)$$

Para resolver la ecuación 2, es necesario primero calcular la presión de poro P_p y la relación de Poisson, en función de la profundidad. La relación de Poisson se calcula a partir de los tiempos de tránsito de las ondas de corte y compresional, obtenidos del registro sísmico digital, usando la siguiente expresión:

$$v = \frac{0.5(dts/dtc)^2 - 1}{(dts/dtc)^2 - 1} \quad \text{--- (3)}$$

Considerando un cilindro de formación y analizando un pequeño volumen, en coordenadas cilíndricas, la posición de un punto en su parte media, estará dada por la distancia r , por el ángulo θ y por la distancia z al origen del eje coordenado, como se muestra en la figura 2. Adnoy³ encontró que los esfuerzos máximos en los que pueden fallar una roca, será cuando el ángulo θ es 0° ó 90° , y se ha tomado forma más general 90° .

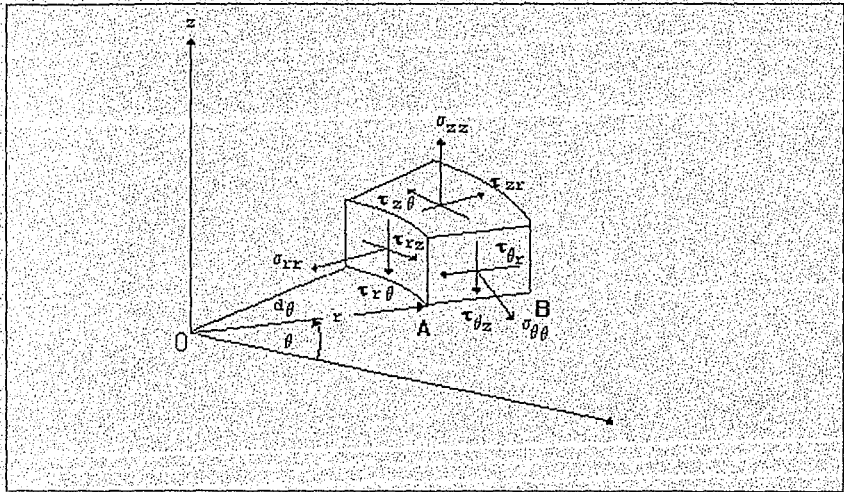


Figura 2
Estado de esfuerzos en coordenadas cilíndricas.

Considerando un volumen infinitesimal estático en equilibrio con superficies paralelas a los planos r , θ , z , las componentes normales de los esfuerzos actuando sobre las

diferentes superficies en dirección radial, tangencial y axial, son designados por σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} respectivamente y las componentes de corte o tangenciales son $\tau_{\theta r}$, τ_{rz} , $\tau_{z\theta}$, $\tau_{\theta z}$, τ_{zr} , τ_{rz} . La fuerza generada por el esfuerzo normal σ_{rr} en dirección r será^{1, 3}:

$$F_{rr} = \sigma_{rr} * \text{Área} \quad \text{--- (4)}$$

Y en el lado opuesto será:

$$F_{r+dr} = \left(\sigma_{rr} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} dr \right) * \text{Área} \quad \text{--- (5)}$$

Este mismo análisis se realiza para el resto de las superficies basados en la consideración de continuidad de esfuerzos. Además existe la fuerza generada por el peso mismo de cuerpo debido a la gravedad, y está representada por las tres componentes R , θ , z . Cada componente del esfuerzo es función de su posición, por ejemplo: En el punto A, el esfuerzo $\sigma_{rr}(r, \theta, z)$, es función de su posición. Si desplazamos el punto A en dirección r , se tendrá el punto B y el nuevo valor es $\sigma_{rr}(r+dr, \theta, z)$. Si el esfuerzo σ_{rr} es una función diferenciable y continua, entonces de acuerdo al teorema de Taylor se tendrá:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}(r+dr, \theta, z) &= \sigma_{rr}(r, \theta, z) + dr \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r}(r, \theta, z) + \\ &+ dr^2 \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \sigma_{rr}}{\partial r^2}(r + \alpha dr, \theta, z) \quad \text{--- (6)} \end{aligned}$$

donde $0 \leq \alpha \leq 1$. El último término es muy pequeño comparado con los otros por lo que se puede despreciar, quedando:

$$\sigma_{rr}(r+dr, \theta, z) = \sigma_{rr}(r, \theta, z) + dr \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r}(r, \theta, z) \quad - - - - (7)$$

Las fuerzas se detallan en un diagrama de cuerpo libre (figura 2), en donde las fuerzas están en equilibrio, multiplicando cada componente de esfuerzo por el área donde se está aplicando, por ejemplo el esfuerzo radial σ_{rr} en dirección r generará la fuerza:

$$F_1 = (\sigma_{rr} + dr \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r})(r+dr) d\theta dz - \sigma_{rr} r d\theta dz \quad - - - - (8)$$

En el plano tangencial θ en dirección r :

$$F_2 = -(\sigma_{\theta\theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} d\theta) dr dz \sin(d\theta/2) - \sigma_{\theta\theta} r dr dz \sin(d\theta/2) \quad - - - - (9)$$

$$F_3 = (\tau_{r\theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} d\theta) dr dz - \tau_{r\theta} r dr dz \quad - - - - (10)$$

$$F_4 = (\sigma_{zr} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial z} dz) (\frac{rd\theta + (r+dr)d\theta}{2}) dr - \sigma_{zr} (\frac{rd\theta + (r+dr)d\theta}{2}) dr \quad - - - - (11)$$

Por último la componente de la fuerza másica en función del volumen:

$$F_s = R \cdot drdz \left(\frac{rd\theta + (r+dr)d\theta}{2} \right) \quad \text{--- (12)}$$

Donde R es la componente radial de la fuerza másica.

Sumando todas las fuerzas en dirección radial despreciando las diferenciales de orden superior e igualando a cero, se tendrá la primera ecuación de equilibrio:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} dr d\theta dz + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} r dr d\theta dz - \sigma_{\theta\theta} dr d\theta dz + \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} dr d\theta dz + \\ + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} r dr d\theta dz + R \cdot r dr d\theta dz = 0 \quad \text{--- (13a)} \end{aligned}$$

dividiendo entre $r dr d\theta dz$ se tiene en dirección r:

$$\frac{\sigma_{rr}}{r} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + R = 0 \quad \text{--- (13b)}$$

En forma similar para la dirección angular θ :

$$\frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{\theta r}}{r} + \Theta = 0 \quad \text{--- (13c)}$$

Y en dirección z:

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} + Z = 0 \quad \text{--- (13d)}$$

El estado de equilibrio de un elemento requiere también que la suma de momentos en cualquier dirección sea cero. Si consideramos que en el volumen de control no existen momentos, esto conducirá a la importante conclusión que el tensor de esfuerzos es simétrico, esto es:

$$\tau_{ij} = \tau_{ji}$$

quedando las ecuaciones de equilibrio como sigue:

$$\frac{\sigma_{rr}}{r} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + R = 0 \quad (14a)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \theta = 0 \quad (14b)$$

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + Z = 0 \quad (14c)$$

La mayoría de los materiales que están sometidos a esfuerzos, sufren deformaciones. En la dirección axial la deformación la deformación (ϵ), depende del módulo de elasticidad ó módulo de Young² (E). Esta deformación puede ser causada tanto por esfuerzos axiales como normales. Y se representa por la ecuación 15 conocida como Ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (15)$$

Y para esfuerzos de corte dependerá del ángulo de fricción interna de la roca (ϕ) y el módulo de rigidez (G), quedando representado por la siguiente relación:

$$\tau = G \tan \phi \quad (16)$$

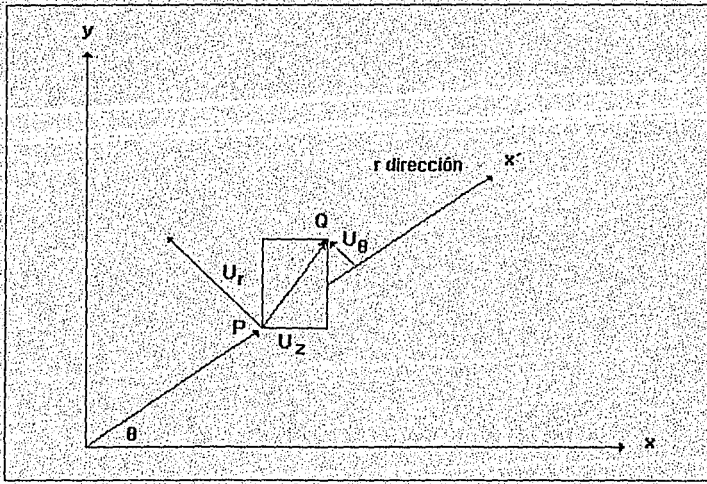


Figura 3
Vector desplazamiento.

Si consideramos un punto de un cuerpo en el espacio P, al aplicarse un esfuerzo, este sufrirá un desplazamiento³ (deformación), y tendrá una nueva posición Q, el vector PQ es el vector de desplazamiento (figura 3). En coordenadas rectangulares las componentes del vector desplazamiento u son u_x , u_y , u_z , y en coordenadas cilíndricas u_r , u_θ , u_z . Aplicando la transformación de coordenadas rectangulares a cilíndricas tenemos:

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta,$$

$$\theta = \tan^{-1} y/x$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$z = z$$

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x}{r} = \cos \theta,$$

$$\frac{\partial r}{\partial y} = \frac{y}{r} = \sin \theta$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{y}{r^2} = -\frac{\sin \theta}{r},$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{x}{r^2} = \frac{\cos \theta}{r}$$

Las derivadas en x, y , transformadas a derivadas con respecto a r y θ quedan:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial r}{\partial x} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta} = \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (17a)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \theta} = \sin \theta \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (17b)$$

Quedando los desplazamientos de la siguiente forma:

$$u_x = u_r \cos \theta - u_\theta \sin \theta \quad (18a)$$

$$u_y = u_r \sin \theta + u_\theta \cos \theta \quad (18b)$$

$$u_z = u_z \quad (18c)$$

Las componentes de deformación en coordenadas cilíndricas son:

$$\begin{matrix} \epsilon_{rr} & \epsilon_{r\theta} & \epsilon_{rz} \\ \epsilon_{\theta r} & \epsilon_{\theta\theta} & \epsilon_{\theta z} \\ \epsilon_{zr} & \epsilon_{z\theta} & \epsilon_{zz} \end{matrix}$$

Elas están referidas a un marco local de coordenadas rectangulares x', y', z' , en el cual x' coincide con la dirección r , y' con la dirección θ y z' con z . Los cosenos directores entre los dos sistemas son:

	x	y	z
r ó x'	$\cos \theta$	$\sin \theta$	0
θ ó y'	$-\sin \theta$	$\cos \theta$	0
z ó z'	0	0	1

- - - (19)

De la ley de transformación de tensores, se tiene:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{rr} &= \epsilon_{xx} \cos^2 \theta + \epsilon_{yy} \sin^2 \theta + \epsilon_{xy} \sin 2\theta \\
 \epsilon_{\theta\theta} &= \epsilon_{xx} \sin^2 \theta + \epsilon_{yy} \cos^2 \theta - \epsilon_{xy} \sin 2\theta \\
 \epsilon_{r\theta} &= (\epsilon_{yy} - \epsilon_{xx}) \cos \theta \sin \theta + \epsilon_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \\
 \epsilon_{zr} &= \epsilon_{zx} \cos \theta + \epsilon_{zy} \sin \theta \\
 \epsilon_{z\theta} &= -\epsilon_{zx} \sin \theta + \epsilon_{zy} \cos \theta \\
 \epsilon_{zz} &= \epsilon_{zz}
 \end{aligned} \tag{20}$$

finalmente:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \tag{21a}$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \tag{21b}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \tag{21c}$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \tag{21d}$$

$$\epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \tag{21e}$$

$$\epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \tag{21f}$$

Sustituyendo las ecuaciones 17, 18 en las ecuaciones 21 y a su vez en las ecuaciones 20 se tiene:

$$\epsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad \text{--- (22a)}$$

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \quad \text{--- (22b)}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad \text{--- (22c)}$$

$$\epsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right) \quad \text{--- (22d)}$$

$$\epsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \quad \text{--- (22e)}$$

$$\epsilon_{z\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \quad \text{--- (22f)}$$

Para el agujero, puede considerarse que existe simetría axial. Esto implica que las cargas límites son aplicadas a lo largo, y normales al eje del pozo, dando como resultado la siguiente igualdad:

$$\tau_{rz} = \tau_{zr} = \tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 2\epsilon_{rz} = 2\epsilon_{\theta z} = 0 \quad \text{--- (23)}$$

Las ecuaciones de equilibrio 14, aplicando las igualdades 23, se reducirán a:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + R = 0 \quad \text{--- (24a)}$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \theta = 0 \quad \text{--- (24b)}$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = 0 \quad \text{--- (24c)}$$

Si la distribución de esfuerzos es simétrica respecto a un eje perpendicular al plano x-y que pasa por 0, las componentes del esfuerzo no dependen de θ y son función solamente de r. Se deduce también por razones de simetría que $\tau_{r\theta}$ es nula, y que la fuerza másica es cero, las ecuaciones 24 se reducirían a las siguientes:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0 \quad \text{--- (25a)}$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = 0 \quad \text{--- (25b)}$$

3.1.2 El estado de esfuerzos creado por la perforación del pozo.

Continuando con el modelo presentado por Timoshenko y Goodier¹, en el que supone un plato cuadrado con un agujero circular en el centro.⁴

Las deformaciones normales en la ecuación de la ley de Hooke generalizada pueden ser escritas como sigue:

$$\sigma_r = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\epsilon_r + \frac{\nu}{1-\nu} \epsilon_\theta \right) \quad \text{--- (26a)}$$

$$\sigma_\theta = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\epsilon_\theta + \frac{\nu}{1-\nu} \epsilon_r \right) \quad \text{--- (26b)}$$

$$\sigma_r = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\epsilon_r + \epsilon_\theta) \quad \text{--- (26c)}$$

$$\tau_{r\theta} = 2 G \epsilon_{r\theta} \quad \text{--- (26d)}$$

Para un cilindro de gran espesor⁵, sustituyendo las ecuaciones 26 dentro de la 25, se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = 0 \quad \text{--- (27a)}$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \quad \text{--- (27b)}$$

Escribiendo la ecuación 27a de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(ru_r)}{dr} \right) = 0 \quad \text{--- (28)}$$

cuya solución es:

$$u_r + C_1 r + C_2 / r \quad \text{--- (29)}$$

Usando las ecuaciones de deformación^{6,7} 22, aplicando la solución 29 y sustituyendo los valores en la ecuación de esfuerzos 26, los esfuerzos en un plato con agujero circular pueden ser expresados como sigue:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \left(C_1 + \frac{C_2}{r^2} (1 - 2\nu) \right) \quad \text{--- (30a)}$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \left(C_1 - \frac{C_2}{r^2} (1 - 2\nu) \right) \quad \text{--- (30b)}$$

$$\sigma_z = \frac{2 \nu E C_1}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \text{--- (30c)}$$

Las constantes C_1 y C_2 pueden ser evaluadas con las condiciones de frontera. Sin embargo en el caso de un plato con diferentes esfuerzos in-situ, los esfuerzos de corte no desaparecen, por lo que deben ser aplicadas las ecuaciones de compatibilidad, esto significa que las deformaciones deben ser compatibles con los esfuerzos, esto es, que sea físicamente permisible esta situación. Matemáticamente, las funciones de

deformación deberán ser continuas y poseer suficientes derivadas parciales continuas.

La ecuación de compatibilidad^{2,6} en términos de coordenadas cilíndricas es la siguiente:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (31)$$

La ecuación 31 es satisfecha por las expresiones:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \quad (32a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \quad (32b)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial \theta} = - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \quad (32c)$$

en las que ϕ es la función de Airy^{2,6}, que es función de r y θ .

Como se había visto anteriormente, los esfuerzos dependen solamente de r , como en la ecuación 25a:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0$$

por lo que la ecuación de compatibilidad quedará:

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\phi}{dr} \right) =$$

$$= \frac{d^2\phi}{dr^4} + \frac{2}{r} \frac{d^3\phi}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \frac{d\phi}{dr} = 0 \quad \text{--- (33)}$$

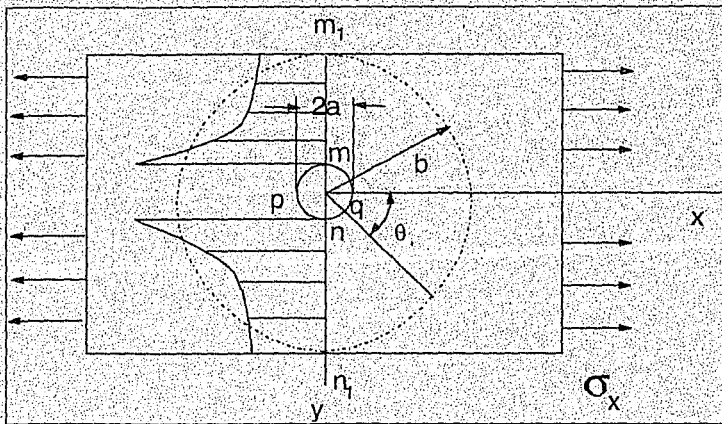


Figura 4
Estado plano de esfuerzos

En una placa con un orificio circular en el centro, la distribución de esfuerzos cambia, pero de acuerdo con el principio de Saint-Venant³, la alteración del estado de esfuerzos es despreciable a distancias grandes en comparación al radio del agujero. La figura 4 representa una placa sometida a tracción uniforme de valor σ_x en dirección x.

El círculo de radio b es grande, comparado con el orificio de radio a, entonces se puede considerar que los esfuerzos normales en los puntos de radio b, son los mismos que

existirían en la placa si no hubiera agujero y vienen dadas por:

$$(\sigma_{rx})_{r=b} = \sigma_x \cos^2 \theta = \sigma_x (1 + \cos 2\theta) / 2 \quad \text{--- (34a)}$$

$$(\tau_{r\theta x})_{r=b} = \sigma_x \sin \theta \cos \theta = \sigma_x (\sin 2\theta) / 2 \quad \text{--- (34b)}$$

$$(\sigma_{ry})_{r=b} = \sigma_y \sin^2 \theta = \sigma_y (1 - \cos 2\theta) / 2 \quad \text{--- (34c)}$$

$$(\tau_{r\theta y})_{r=b} = \sigma_y \sin \theta \cos \theta = \sigma_y (\sin 2\theta) / 2 \quad \text{--- (34d)}$$

Estas fuerzas están compuestas de dos partes, la primera es una componente constante $\sigma_x/2$ y otra que corresponde a las fuerzas normales y tangenciales, debido a que los esfuerzos in situ son todos dependientes del ángulo rotacional 2θ , la función de esfuerzos está definida como:

$$\phi = \phi (r, \theta) = f(r) \cos 2\theta \quad \text{--- (35)}$$

sustituída esta expresión en la ecuación de compatibilidad 27:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \right) = 0$$

se define la ecuación diferencial ordinaria que determina $f(r)$:

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \frac{4}{r^2} \right) \left(\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} - \frac{4f}{r^2} \right) = 0 \quad \text{--- (36)}$$

la solución general es:

$$f(r) = C_1 r^2 + C_2 r^4 + C_3 / r^2 + C_4 \quad \text{--- (37)}$$

Por lo tanto, la función de esfuerzos quedará:

$$\phi = (C_1 r^2 + C_2 r^4 + C_3 / r^2 + C_4) \cos 2\theta \quad \text{--- (38)}$$

y las correspondientes componentes del esfuerzo, de acuerdo con las ecuaciones 32 serán:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} = - \left(2C_1 + \frac{6C_3}{r^2} + \frac{4C_4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad - \quad (39a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} = \left(2C_1 + 12C_2 r^2 + \frac{6C_3}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad - \quad (39b)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial \theta} = - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) = \\ &= \left(2C_1 + 6C_2 r^2 - \frac{6C_3}{r^4} - \frac{2C_4}{r^2} \right) \sin 2\theta \quad - \quad (39c) \end{aligned}$$

El principio de superposición² se aplica al modelo descrito, note que los esfuerzos totales actuando en el plato son los siguientes:

P_w es el esfuerzo total dentro del pozo (presión hidráulica).

σ_r es el esfuerzo radial, obtenido a partir de la ec. 34, en el límite exterior; nos da el esfuerzo radial:

$$\sigma_r = \sigma_{rx} + \sigma_{ry} = ((\sigma_x + \sigma_y) + (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta) / 2 \quad - \quad (40)$$

y σ_{zz} es la carga axial (sobrecarga para un pozo vertical dada por la ecuación 1).

3.1.3 El estado de esfuerzos impuesto por las condiciones de frontera.⁶

El estado de esfuerzos totales será la suma de los esfuerzos hidrostáticos, los esfuerzos por desviación y los esfuerzos de corte, se analizarán cada uno por separados imponiendo las condiciones de frontera, para que finalmente se encuentren los totales.

Primero se resolverá la ec. 34 para esfuerzos hidrostáticos. Note que de las ecuaciones 40, los términos del lado derecho representan el esfuerzo hidrostático $(\sigma_x + \sigma_y) / 2$, y el esfuerzo desviador $(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta / 2$.

Esfuerzo Hidrostático.

Primero, definiremos las condiciones de frontera para un cilindro de gran espesor (ecuaciones 34):

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P_w && \text{para: } r = a \\ \sigma_r &= (\sigma_x + \sigma_y) / 2 && \text{para: } r = b \\ \sigma_z &= \sigma_{zz} && \text{para: } r = b \end{aligned}$$

Insertando éstas condiciones de frontera en las ecuaciones 34 y encontrando los valores de las constantes, resultan los siguientes esfuerzos:

$$\sigma_{r1} = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{a^2}{r^2} P_w \quad - - - (41a)$$

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{a^2}{r^2} P_w \quad - - - (41b)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad - - - - - (41c)$$

Para la condición de deformación plana: $\epsilon_z = 0$

$$\sigma_{z1} = \sigma_{z2} \quad \text{--- (42a)}$$

Se considera que el plato tiene una extensión infinita y por lo tanto $a/b = 0$.

Desviador de esfuerzos.

Evaluando las ecuaciones 39 con las siguientes condiciones de frontera:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0 && \text{para: } r = a \\ \sigma_r &= (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta / 2 && \text{para: } r = b \\ \tau_{r\theta} &= 0 && \text{para: } r = a \end{aligned}$$

resultan las siguientes derivaciones:

$$\sigma_{r2} = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad \text{--- (43a)}$$

$$\sigma_{\theta 2} = - \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad \text{--- (43b)}$$

$$\tau_{r\theta 2} = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \quad \text{--- (43c)}$$

Para la condición de deformación plana:

$$\sigma_{z2} = -2 \nu \frac{a^2}{r^2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta \quad - - - (43d)$$

Para la condición de esfuerzo plano:

$$\sigma_{z2} = 0 \quad - - - - - (43e)$$

Esfuerzo de corte.

Estableciendo las siguientes condiciones de frontera:

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad \text{para: } r = a$$

$$\tau_{r\theta} = -\tau_{xy} \sin 2\theta \quad \text{para: } r = b$$

$$\sigma_y = 0 \quad \text{para: } r = a$$

resultan las siguientes derivaciones:

$$\sigma_{r3} = \tau_{xy} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \quad - - - (44a)$$

$$\sigma_{\theta 3} = -\tau_{xy} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad - - - (44b)$$

$$\tau_{r\theta 3} = \tau_{xy} \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad - - - (44c)$$

Para la condición de deformación plana:

$$\sigma_{z3} = -4 \nu \tau_{xy} \frac{a^2}{r^2} \sin 2\theta \quad - - - (44d)$$

Para la condición de esfuerzo plano:

$$\sigma_{z3} = 0 \quad \text{--- (44e)}$$

Existen dos esfuerzos que no son tomados en la derivación previa debido a que se asumió que desaparecían en la ecuación 23, estos son τ_{xz} y τ_{yz} , transformando estos esfuerzos en coordenadas cilíndricas, se obtiene:

$$\tau_{xz} = \tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta$$

Asumiendo una distribución radial Bradley⁸, obtuvo el siguiente resultado:

$$\tau_{xz} = (\tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \quad \text{--- (45a)}$$

$$\tau_{\theta z} = (-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad \text{--- (45b)}$$

El total de esfuerzos es el que se tendría en el pozo desde un punto alejado hasta llegar a las paredes del agujero, y es igual a la suma de las ecuaciones 43, 44 y 45:

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{a^2}{r^2} P_w + \\ & + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + \end{aligned}$$

$$+ \tau_{xy} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \operatorname{sen} 2\theta \quad \text{--- --- (46a)}$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{a^2}{r^2} p_w - \\ & - \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \\ & - \tau_{xy} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \operatorname{sen} 2\theta \quad \text{--- --- (46b)} \end{aligned}$$

Deformación plana:

$$\sigma_z = \sigma_{zz} - 2 \nu \frac{a^2}{r^2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4 \nu \tau_{xy} \frac{a^2}{r^2} \operatorname{sen} 2\theta \quad \text{--- --- (46c)}$$

Esfuerzo plano:

$$\sigma_z = \sigma_{zz} \quad \text{--- --- (46d)}$$

$$\tau_{r\theta} = \left(\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \operatorname{sen} 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \right) \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \quad \text{--- --- (46e)}$$

$$\tau_{r\theta} = (\tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \operatorname{sen} \theta) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad \text{--- --- (46f)}$$

$$\tau_{\theta z} = (-\tau_{xz} \operatorname{sen} \theta + \tau_{yz} \operatorname{cos} \theta) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (46g)$$

Finalmente evaluamos las ecuaciones 46 para el caso en que $r = a$, reduciéndose a las siguientes ecuaciones, que son las ecuaciones constitutivas del modelo de Aadnoy y Chenevert⁴:

$$\sigma_r = P_w \quad (47a)$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y - P_w) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \operatorname{cos} 2\theta - 4\tau_{xy} \operatorname{sen} 2\theta \quad (47b)$$

Deformación plana:

$$\sigma_z = \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \operatorname{cos} 2\theta - 4\nu \tau_{xy} \operatorname{sen} 2\theta \quad (47c)$$

Esfuerzo plano:

$$\sigma_z = \sigma_{zz} \quad (47d)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (47e)$$

$$\tau_{rz} = 0 \quad (47f)$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-\tau_{xz} \operatorname{sen} \theta + \tau_{yz} \operatorname{cos} \theta) \quad (47g)$$

Estas ecuaciones son un modelo similar al de Bradley, basado en un modelo lineal-elástico.⁷

Los esfuerzos principales en la pared del pozo están dados por los eigen-valores de la siguiente matriz de esfuerzos:

$$\begin{array}{ccc}
 \sigma_r & 0 & 0 \\
 0 & \sigma_\theta & \tau_{\theta z} \\
 0 & \tau_{\theta z} & \sigma_z
 \end{array}$$

Esto es, los tres esfuerzos principales que representan es estado de esfuerzos en la pared del pozo cuando $r = a$ son:

$$\sigma_1 = \sigma_r \quad \text{--- (48a)}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) + \frac{1}{2}((\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2)^{1/2} \quad \text{--- (48b)}$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) - \frac{1}{2}((\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2)^{1/2} \quad \text{--- (48c)}$$

- σ_1 = Esfuerzo principal máximo.
- σ_2 = Esfuerzo principal intermedio.
- σ_3 = Esfuerzo principal mínimo.

Quando el pozo es vertical las ecuaciones 1 y 2 son también los esfuerzos principales, sin embargo cuando el pozo es direccional cambia el estado de esfuerzos en las paredes del mismo.⁷

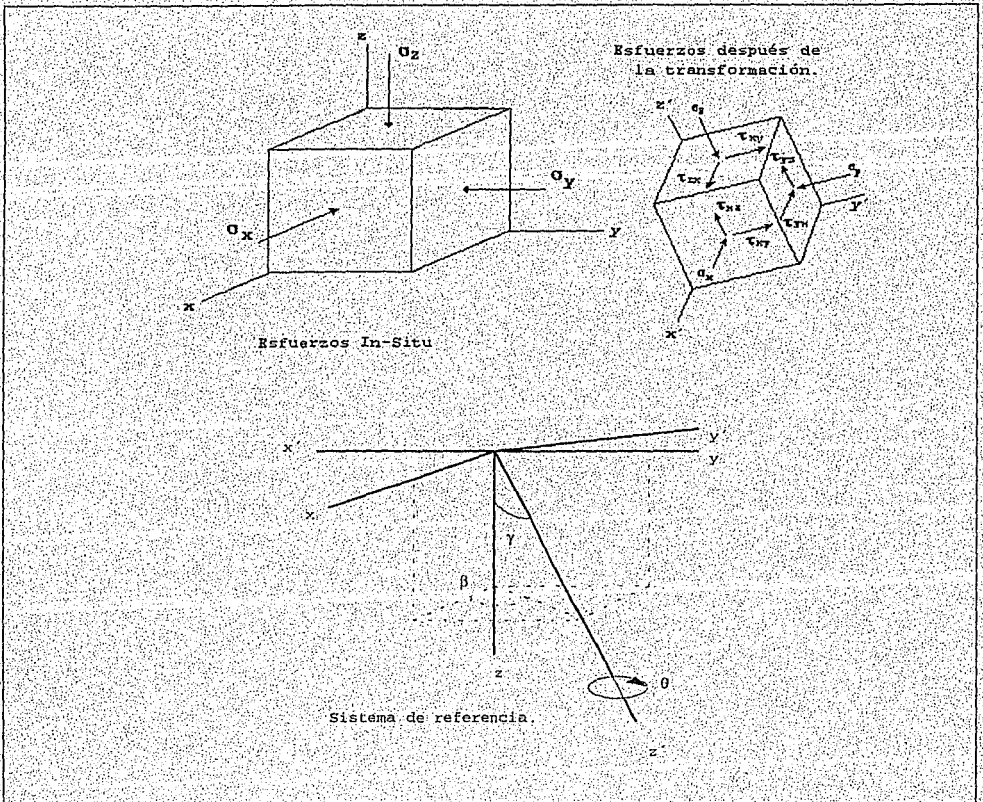


Figura 5. Estado de esfuerzos y rotación de ejes.

β representa el azimut o rumbo del pozo, γ representa el ángulo de inclinación del pozo y θ representa la posición angular alrededor del pozo o eje del pozo.

Es por eso que los esfuerzos in-situ deben ser transformados en cada punto a la nueva orientación del agujero, introduciendo un conjunto de ángulos de referencia como se muestra en la figura 5, las cuales representan el estado de esfuerzos en función de los ángulos de inclinación y rumbo del pozo, y son el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\sigma_x = (\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \sin^2\beta) \cos^2\gamma + \sigma_{vert} \sin^2\gamma \quad - - - (49a)$$

$$\sigma_y = (\sigma_{H1} \sin^2\beta + \sigma_{H2} \cos^2\beta) \quad - - - (49b)$$

$$\sigma_z = (\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \sin^2\beta) \sin^2\gamma + \sigma_{vert} \cos^2\gamma \quad - - - (49c)$$

$$\tau_{yz} = 0.5(\sigma_{H2} - \sigma_{H1}) \sin 2\beta \sin \gamma \quad - - - (49d)$$

$$\tau_{xz} = 0.5(\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \sin^2\beta - \sigma_{vert}) \sin 2\gamma \quad - - - (49e)$$

$$\tau_{xy} = 0.5(\sigma_{H2} - \sigma_{H1}) \sin 2\beta \cos \gamma \quad - - - (49f)$$

Estas son las ecuaciones que se utilizan para evaluar los esfuerzos a los que están sometidas las paredes del pozo, y calcular los límites de falla.

4.- Comportamiento de las lutitas en las paredes del pozo por interacción con el fluido de perforación.⁹

Causas que afectan la estabilidad del pozo.

Las formaciones en estado natural están sometidas a esfuerzos compresivos. Cuando un pozo es perforado, la roca alrededor del agujero tendrá que soportar las cargas que fueron tomadas al remover la roca de su lugar original.

El incremento de los esfuerzos alrededor de las paredes del agujero, podrían ocasionar que la roca falle. Más aún en la mayoría de los casos las lutitas son debilitadas por la interacción con el fluido de perforación, incrementándose la posibilidad de falla de las lutitas (por ejemplo en las arcillas sensitivas al agua).

Para evitar que la roca falle, se tendrán que tomar las siguientes medidas:

1. Seleccionar el fluido de perforación de tal forma, que este minimice el debilitamiento de la roca. Cuando es puesto en contacto la roca con el fluido de perforación, habrá una interacción química que modificará la presión de poro de la roca y posteriormente modificará las propiedades físicas de la misma, al entrar en contacto la arcilla con el agua del lodo.

2. La presión hidrostática ejercida por el peso del lodo, reemplazará las cargas de sobrecarga de los sedimentos para retener las paredes del agujero y mantenerlo en calibre, soportando los esfuerzos de la formación. La presión hidrostática generalmente excede a la presión de formación, pero este efecto no es tan significativo como la sobrepresión ocasionada por el efecto osmótico.

4.1 Alteraciones de la presión de poro, por interacción química con el fluido de perforación.

El estudio de la estabilidad del pozo en zonas arcillosas, requiere de un modelo que considere no sólo los aspectos mecánicos, sino que también considere las modificaciones que se tienen en la presión de poro, por el efecto químico lodo-formación. Este trabajo está enfocado justamentete a estudiar los factores químicos y mecánicos, y como estos influyen en el estado de esfuerzos del pozo y en las propiedades de las lutitas. El efecto del tiempo en la estabilidad de las lutitas es muy importante, pero no es considerado en este trabajo.

Antes de atacar el problema de estabilidad de las arcillas es conveniente analizar el comportamiento de las lutitas en contacto con lodos base aceite. Primero, la fase continua aceite crea un confinamiento en la presión, porque la presión de la columna hidrostática generalmente excede a la presión de poro, pero no excede a la presión capilar para que entre el fluido en la formación. Segundo, la diferencial entre el potencial químico del lodo base aceite y las lutitas, será el de seleccionar si el agua será transportada del lodo hacia la formación o de la formación al lodo. Estos conceptos son utilizados para el diseño en forma más efectiva, de los lodos base agua.

Fundamentalmente, el excesivo peso de lodo, provocará inicialmente alto flujo de filtrado a la formación; esto a su vez provocará que la presión de poro en la cercanía de la pared del agujero aumente. El resultado será un decremento en la resistencia de la roca.

El movimiento de agua que entra o sale de las lutitas está gobernado por muchos mecanismos. Los dos mecanismos más relevantes en este contexto son: la diferencial del potencial

hidráulico, que es la presión diferencial ΔP_n , entre la presión hidráulica debida al peso del lodo y la presión de poro; y la diferencial del potencial químico, $\Delta\Phi$, ocasionada por la diferencial de actividad química entre el fluido de perforación y los fluidos contenidos en el poro de la lutita.

Entonces, de estos dos mecanismos, el flujo neto podría ser descrito de la siguiente forma:

Lodo en el pozo

Presión

Hidráulica P_{mv}

Potencial

Químico Φ_{cm}

Lutitas

$P_w \leftrightarrow P_p$

$q_{hpg} \propto (P_w - P_p)$

$\Phi_{cm} \leftrightarrow \Phi_{csh}$

$q_{\Phi_{cg}} \propto (\Phi_{cm} - \Phi_{csh})$

El flujo neto será:

$$q_n = q_{hpg} + q_{\Phi_{cg}} \quad \text{--- (50)}$$

En la tabla 1 se presentan estos mecanismos de transporte de las moléculas. Estos mecanismos, difieren en magnitud e importancia, dependiendo de la composición mineralógica, la forma y tamaño de los poros y de sus conductos, la tortuosidad de los conductos y el estado de esfuerzos. La acción de la presión comunicada y el flujo osmótico, son factores importantes en la interacción del lodo base agua y las lutitas, y el estado de equilibrio del agujero en las cercanías de la pared.

La presión osmótica, se explica a través de un experimento hecho con una bolsa (permeable) de colodión cerrada con un tapón de caucho¹⁰, a través del cual, se inserta un tubo de vidrio. La bolsa se llena con una solución diluida de azúcar en

agua, y se sumerge en agua pura contenida en un vaso de precipitado (Figura 6). El nivel de la solución azucarada del tubo, empieza a subir hasta alcanzar una altura definida, que depende de la concentración de la solución. La altura de este fluido generará una presión hidrostática, a dicha presión se le conoce como presión osmótica. En la fig. 6 se puede observar, que no ha pasado ninguna cantidad de azúcar al agua pura a través de la membrana, pero si dejó pasar agua al interior de la bolsa, funcionando el colodión como una membrana semipermeable, que permite el paso del agua pero no del azúcar. El nivel del agua azucarada en el tubo aumenta hasta alcanzar un equilibrio.

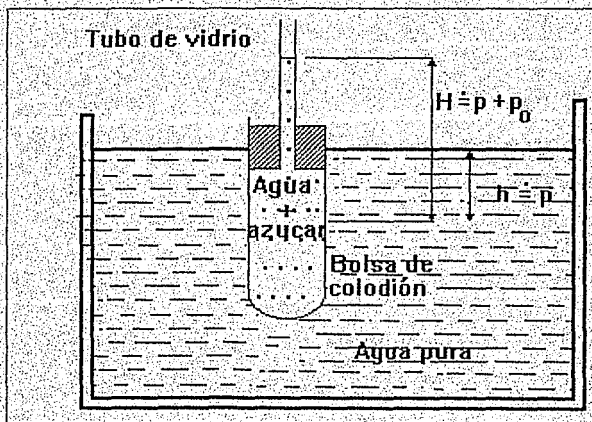


Figura 6

Fenómeno de ósmosis.

Van't Hoff¹⁰ estudió este fenómeno, estableciendo que la condición de equilibrio es que, el potencial químico del agua debe tener el mismo valor en cada lado de la membrana y a cualquier profundidad del vaso de precipitado. Esta igualdad de potencial químico se logra por la diferencia de presión en ambos lados de la membrana. Consideremos la situación a la profundidad h en la figura 6. A esta profundidad, el disolvente

está con una presión p , mientras la solución está a una presión $p + p_0$. Si $\mu(T, p+p_0, a_w)$, es el potencial químico del disolvente en la solución con la presión y $\mu^0(T, p)$, del disolvente puro a la presión p , la condición de equilibrio es:

$$\mu(T, p+p_0, a_w) = \mu^0(T, p) \quad \text{--- -- -- -- -- (51)}$$

A modo de generalización de la ley de Raoult para potencial químico en soluciones líquidas se tiene:

$$\mu^0(T, p) = \mu^0(T, p+p_0) + RT \ln(a_w) \quad \text{--- -- -- -- -- (52)}$$

El problema consiste en expresar el μ del disolvente con la presión $p+p_0$ en función de μ del disolvente con la presión p . A partir de la ecuación fundamental a T constante, tenemos que $\mu = Vdp$. Integrando tenemos:

$$\mu^0(T, p+p_0) - \mu^0(T, p) = \int_p^{p+p_0} V dp \quad \text{--- -- -- -- -- (53)}$$

En la ecuación (53) V es el volumen molar del disolvente puro. Si el disolvente es incompresible, entonces V es independiente de la presión y puede sacarse de la integral. Entonces:

$$Vp_0 + RT \ln(a_w) = 0 \quad \text{--- -- -- -- -- (54)}$$

y

$$p_0 = - (RT/V) \ln(a_w) \quad \text{--- -- -- -- -- (55)}$$

Donde R es la constante universal de los gases, V es el volumen parcial molar del agua, T es la temperatura absoluta en grados Kelvin. (a_w) es la actividad del fluido.

Los mecanismos de transporte de especies más importantes dentro de la roca, son los mostrados en la tabla 1.

Tabla 1 - Mecanismos de transporte.

Mecanismo:	Fuerzas que maneja	Especie molecular
Transporte Osmótico (Difusión)	Potencial químico del agua	H ₂ O entrando o saliendo de la lutita
Osmosis inversa	Presión Hidráulica	H ₂ O entrando o saliendo de la lutita
Flujo Hidráulico	Presión Diferencial	Volumen de agua (cationes, aniones, y agua de formación)
Combinación de flujo hidráulico y comunicación abierta.		

Esto no son los únicos mecanismos que pueden afectar la estabilidad del pozo. Como se menciona anteriormente otros mecanismos podrían ser también de importancia.⁶

La energía libre molar de los constituyentes dentro de la formación y del lodo, dan como resultado la transferencia de muchas especies (ejemplo: agua, cationes y aniones). La suma de estas fuerzas resultarán en un flujo neto que no cambia la matriz de la roca, y el equilibrio podría basarse en estas dos fuerzas. Sin embargo es de esperarse que la matriz de la roca y sus propiedades cambien con respecto al tiempo por tratarse de lutitas.

En la transferencia de agua de los sistemas de lodo base agua, las lutitas bajo condiciones in-situ tendrán características de una membrana semipermeable. En este escenario, es obvio que la lutita se alterará al menos ligeramente. Esto es apoyado por evidencias y datos experimentales¹¹⁻¹², las cuales soportan que cuando la lutita está sometida a esfuerzos in-situ, presentan características que asemejan a una membrana semipermeable, por medio de repulsiones eléctricas ó por restricciones en el tamaño del poro. Sin embargo, la efectividad de esta membrana, es difícil de cuantificar exactamente.

De estudios de laboratorio en las coalinitas, Olsen¹³, demostró que a medida que aumenta la profundidad, la magnitud de flujo hidráulico decrece más rápidamente que el flujo osmótico. Olsen también concluyó que la Ley de Darcy no es suficiente para describir la magnitud y la dirección de un flujo de fluidos en las camas de arcillas. Estos resultados sugieren, que cuando las arcillas están confinadas, la permeabilidad por la diferencia de potencial químico, puede ser muy significativo comparada con la permeabilidad de tipo hidráulica, dando consigo, una alteración en la presión de poro¹³. Esta afirmación, se explica por el hecho que la lutita encontrada a mayor profundidad, es altamente compactada y contiene baja cantidad de agua. En una compactación de tipo geológica, el agua es expelida de la lutita, y ésta tiende a ser secada, la escasa agua en la formación y la abundancia de carga, da como resultado, un incremento en la absorción por potencial químico en la arcilla¹⁴. Sin embargo, porque las lutitas son heterogéneas, para un intervalo dado, muchos mecanismos de interacción ocurren entre la lutita y el lodo; entonces el diseño del lodo puede centrarse en la optimización de la actividad del agua, la presencia de aditivos que regirán el peso del lodo y la comunicación con la presión de poro. Estas consideraciones son presentadas en este estudio.

El fenómeno de ósmosis en las lutitas, y como éstas afectan la presión interna de los poros, ha sido estudiado en laboratorio, por la Cía. Baroid¹⁵. El orden de la magnitud de la presión osmótica generada, entre un fluido de perforación base aceite con agua saturada de sales, y una lutita conteniendo agua fresca, son mostrados en la tabla 2.

Tabla 2
Presión osmótica con lodos de emulsión inversa.

Concentración de sales disueltas	*Presión osmótica
Cloruro de calcio, ppm	Psi
52,600	500
100,000	1,100
182,000	3,000
250,000	5,800
307,000	9,400
357,000	13,900

Cloruro de sodio, ppm	Psi
55,000	670
105,000	1,400
149,000	2,200
189,000	3,200
226,000	4,300

*Cálculos para agua fresca en lutitas a 25° C.

Nota: Para la conversión de partes por millón (ppm), a por ciento de concentración (%) de salinidad de diferentes cloruros, ver referencia 16.

En la tabla anterior, se puede observar la importancia de la presión osmótica en las arcillas, y el significado que ésta tiene en la estabilidad del pozo.

4.2 Modelo de estabilidad integrando el potencial químico.

Los esfuerzos causados por la diferencia de potencial químico (energía libre molar parcial del agua), entre el fluido de perforación y las lutitas, puede ser calculado a partir de la existencia de un equilibrio entre los dos potenciales químicos, y será igual a:

$$\ln(a_{wf})RT/V_{Mw} - \ln(a_{ws})RT/V_{Mw} = 0 \quad \text{--- (56)}$$

Donde a_{ws} es la actividad del agua de la lutita, y a_{wf} es la actividad del agua del fluido de perforación. Si la ecuación (56) es resuelta para los esfuerzos asociados con la lutita, entonces quedaría como resultado la siguiente ecuación:

$$RT/V [\ln(a_{wf})/(a_{ws})] = \pm \Delta p = (p_{nw} - p_{pf}) \quad \text{--- (57)}$$

Donde Δp es la diferencial de presión en el poro resultado de la diferencial de actividad entre el agua de la lutita y el agua del fluido de perforación; p_{pf} es la presión lejos de la pared del pozo debida a la actividad química en el fluido de la formación, y p_{nw} es la presión en la cercanía de la pared del pozo debida a la actividad química del lodo en el agujero.

Entonces en el caso de una membrana semipermeable ideal (como en el caso de los lodos de emulsión inversa), la presión osmótica es igual a la calculada, induciendo una presión hidrostática. En una membrana no ideal, como el de los sistemas de lutitas, la presión generada por ósmosis, es diferente a la calculada por la ecuación (57), Starveman^{17,18} corrigió esta diferencia con una relación entre el observado y el calculado, dando como resultado el "Coeficiente de reflexión", A , donde:

$$A = [(\Delta p)_{\text{Observado}} / (\Delta p)_{\text{Calculado}}]_{J_v = 0} \quad \text{--- (58)}$$

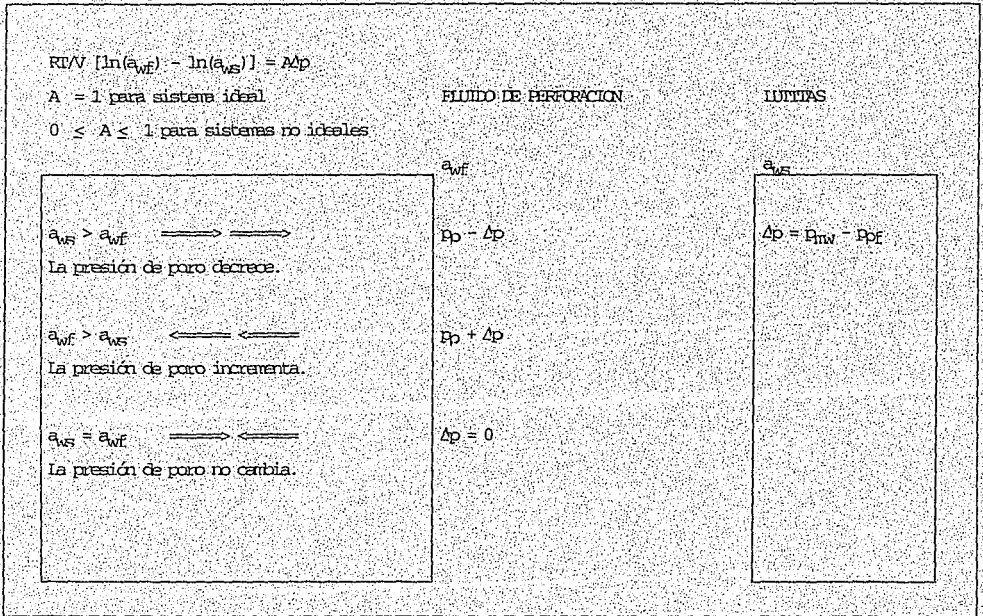
J_v es el flujo neto a través de la membrana, en este caso está definida cuando $J_v = 0$. Donde el valor de A es la efectividad de la membrana, en nuestro caso es la efectividad de la lutita para actuar como una membrana semipermeable. En el caso de una membrana ideal (como en los lodos de emulsión inversa) $A \rightarrow 1$; para una formación porosa, no teniendo membrana sería $A \rightarrow 0$.

Para un sistema de una membrana no ideal (como lutitas/lodos de perforación base agua), los valores de A dependen de algunos factores como: tipo de lutita, contenido de arcillas, esfuerzos in-situ, distribución y tamaño de poro, actividad, resistencias iónicas, etc., los valores serán entre 0 y 1. Entonces para un sistema no-ideal la ecuación (57) la podemos escribir como:

$$A \frac{RT}{V} [\ln(a_{wf}/a_{ws})] = \pm [\Delta p A] = (P_{nw} - P_{pf})_{\text{Observado}} \quad \text{--- (59)}$$

La alteración de la presión de poro, cerca del agujero, [estimada con la ecuación (57) para sistema ideal y la ecuación (59) para sistemas no-ideal], debido a la diferencial de potencial químico, entre el agua de la formación en las lutitas y el fluido de perforación, son integrados dentro del análisis de esfuerzos, afectando directamente a la presión de poro. La tabla 3 describe estos conceptos del modelo.

Tabla 3. Alteración de la presión de poro por diferencial de potencial químico⁸.



4.3 Modelo constitutivo para formaciones arcillosas. Esfuerzos efectivos en la pared del pozo.

Las ecuaciones que describen el estado de esfuerzo de las paredes del pozo, fueron tratadas en el capítulo 3, y es el caso específico, en la que no se consideran los fluidos. Estas ecuaciones son modificadas, considerando ahora el flujo de fluido dentro de la formación.

Es necesario, tomar las siguientes consideraciones para poder aplicar las ecuaciones:

- 1.- La formación se considera lineal, isotrópica, y que cumple con un modelo poro-elástico.
- 2.- El plano de esfuerzos, es ortogonal al eje del pozo.
- 3.- Para esfuerzos de compresión, la convención es que el signo es positivo.

El estado de esfuerzos del pozo están definidas por las ecuaciones 47, 48, 49, 1 y finalmente la ecuación 2 que es modificada al agregarse el efecto osmótico, quedando de la siguiente manera:

$$\sigma_r = P_w \quad \text{--- (60a)}$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y - P_w) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta \quad \text{--- (60b)}$$

$$\sigma_z = \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\nu \tau_{xy} \sin 2\theta \quad \text{--- (60c)}$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad \text{--- (60d)}$$

$$\tau_{rz} = 0 \quad \text{--- (60e)}$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \quad \text{--- (60f)}$$

$$\sigma_x = (\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \sin^2\beta) \cos^2\gamma + \sigma_{vert} \sin^2\gamma \quad \text{--- (60g)}$$

$$\sigma_y = (\sigma_{H1} \sin^2\beta + \sigma_{H2} \cos^2\beta) \quad \text{--- (60h)}$$

$$\sigma_z = (\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \sin^2\beta) \sin^2\gamma + \sigma_{vert} \cos^2\gamma \quad \text{--- (60i)}$$

$$\tau_{yz} = 0.5(\sigma_{H2} - \sigma_{H1}) \sin 2\beta \sin \gamma \quad \text{--- (60j)}$$

$$\tau_{xz} = 0.5(\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \sin^2\beta - \sigma_{vert}) \sin 2\gamma \quad \text{--- (60k)}$$

$$\tau_{xy} = 0.5(\sigma_{H2} - \sigma_{H1}) \sin 2\beta \cos \gamma \quad \text{--- (60l)}$$

Y

$$\sigma_{H1} = \sigma_{H2} = \frac{\nu}{1 - \nu} (\sigma_{vert} - (P_p + \Delta P)) + (P_p + \Delta P) \quad \text{--- (61a)}$$

$$\sigma_{vert} = \int_0^z \rho_b \cdot g \cdot dz \quad \text{--- (61b)}$$

donde:

σ_r , σ_θ , σ_z son los esfuerzos efectivos normales en las paredes del pozo, en coordenadas cilíndricas. Estas se definieron para considerar la falla del agujero, como un total de esfuerzos, al ser afectados los esfuerzos principales horizontales in-situ (σ_{H1} , σ_{H2}), por la alteración de la presión de poro p_p por ósmosis, en la formación inmediatamente adyacente al agujero.

$\tau_{r\theta}$, $\tau_{\theta z}$ y τ_{zr} son los esfuerzos de corte en la pared del agujero en coordenadas cilíndricas.

σ_x , σ_y y σ_x son los esfuerzos totales normales de la tierra in-situ referidos a un sistema cartesiano xyz , definidos en la Figura 7 y 8.

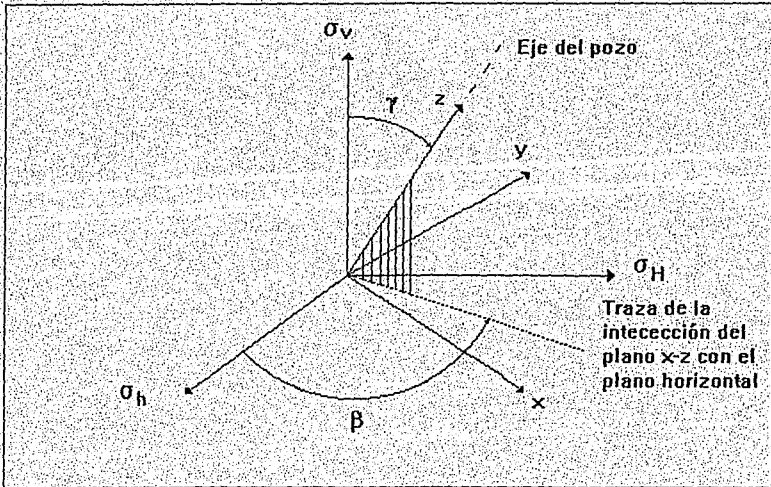


Figura 7 - Sistema coordenado del pozo
(Coordenadas cartesianas)

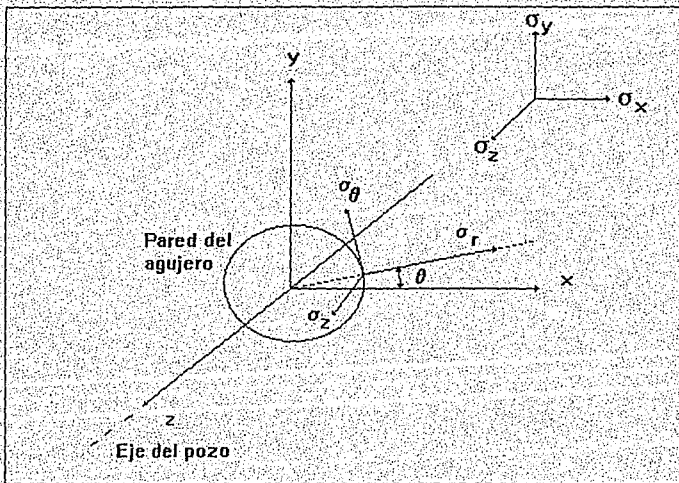


Figura 8 - Sistema coordenado del pozo
(Coordenadas cilíndricas)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Comportamiento de las lutitas en las paredes del pozo.

τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} son los esfuerzos de corte en coordenadas cartesianas. El eje z es coincidente con el eje del pozo, y para pozos desviados la azimuth del eje x es equivalente a la dirección del pozo (proyección del pozo en la horizontal). El ángulo β es medido en el plano horizontal; esto es el ángulo entre σ_h y la azimuth del pozo medido en forma contraria a las manecillas del reloj, γ es ángulo de desviación de la vertical. Por convención, para pozos verticales γ es cero así que θ es el ángulo medido positivamente con respecto σ_h , p_w es la presión del pozo, y $\Delta p = p_{nw} - p_{pf}$, donde p_{pf} es la presión de la formación lejos de la pared del pozo, y p_{nw} es la presión cerca de la pared, ν es la relación de Poisson de la matriz de la roca. Y la constante poro-elástica A, esta definida por:

$$A = (1 - 2\nu)/(1 - \nu) \quad - - - - - (62)$$

5.- Propiedades de las formaciones y límites de falla.

Físicamente, las arcillas se describen como una mezcla heterogénea de minerales finamente divididos (2 micrones o menos), formado por minerales de cuarzo, feldespato, calcita, pirita y otros materiales sedimentarios, como el sílice, aluminio y agua.

Los minerales de arcilla, son cristalinos en su naturaleza, y la estructura atómica de estos cristales es un factor primordial en la determinación de sus propiedades. La mayoría de las arcillas, tienen una estructura semejante a las micas, es decir, se hallan formadas por láminas de cristales dispuestos cara a cara, como un mazo de barajas. Una placa individual, se halla compuesta por átomos dispuestos de forma tetraedral u octaedral. Estos paquetes, pueden presentar diferentes configuraciones, y éstas unidades fundamentales son unidas para formar una lámina de átomos de oxígeno compartidos. Normalmente, las hojas tetraedrales, envuelven una hoja octaedral.

Como es sabido, las lutitas se hidratan fácilmente en la presencia de agua, en este trabajo no se considera este fenómeno, porque altera las propiedades físicas de la roca y su estudio es muy complejo, pero los mecanismos de absorción de agua, están acompañados por el aumento de volumen del mineral de arcilla. Esto puede ocurrir por dos diferentes causas:

a) Hinchamiento Cristalino. Este mecanismo también es conocido como hidratación de superficie, y resulta de la absorción de capas mono nucleares de agua en la superficie basal de los cristales. El agua, es atraída y retenida por el ion hidrógeno, y queda unido al átomo de oxígeno. La

fuerza de atracción disminuye a medida que se aleja de la superficie del mineral.

b) Hinchamiento Osmótico. Esto ocurre por la diferencial de concentraciones de sales minerales en el agua, como se vio anteriormente. El mecanismo de este fenómeno, es osmótico, ya que se halla gobernado por una diferencia de concentraciones de los electrolitos del medio. El fenómeno osmótico involucra un aumento de volumen más significativo que el hinchamiento cristalino.

La alteración de la presión de poro en las cercanías del agujero, (debido a la combinación del potencial químico entre los fluidos de la formación y del fluido de perforación y/o la presión diferencial hidráulica, entre el pozo y la formación), está integrada en las ecuaciones (61). Esta ecuación deberá aplicarse para determinar el perfil completo del estado de esfuerzos alrededor del agujero, para datos de campo dados. Estos datos de campo, incluyen parámetros de la actividad del fluido de perforación, actividad de las lutitas, coeficiente de deflexión (coeficiente de membrana o factor de eficiencia), esfuerzos in-situ, presión de poro, profundidad, azimut, ángulo del pozo, constante poro elástica, propiedades de la roca, etc. Si se conoce el desarrollo de las fallas en la formación, utilizando este análisis, no sólo se puede estimar la falla, sino también el tipo de falla, examinando la relación entre los tres esfuerzos principales (radial, axial y tangencial), afectados por el diferencial químico.

5.1 Criterios de falla de la roca.

Los problemas de mecánica, que se consideran en la estabilidad de suelos, son la capacidad de soporte y la presión que estos retienen. Estos problemas son tratados como problemas de plasticidad. El suelo es considerado un

material ideal, que se comporta elásticamente en algunos estados de esfuerzos. En este material ideal el resbalamiento o la cedencia ocurren y, de acuerdo a las expresiones de Lamé¹⁹, los esfuerzos máximos ocurren en la superficie del agujero. Los esfuerzos de corte requeridos para que un resbalamiento simple ocurra, son a menudo considerados dependientes de la cohesión y linealmente dependientes de la presión normal sobre la superficie deslizada. En todos los planos de investigación, se utiliza la regla de Coulomb²⁰:

$$R = C_0 \cos \phi - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi \quad \text{--- (63)}$$

donde R, es el radio del círculo de Mohr, $C_0 \cos \phi$, es el radio del círculo de Mohr deslizado cuando los esfuerzos normales $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ en el plano son cero, y ϕ es el ángulo entre la tangente a los círculos de Mohr y el eje negativo σ .

La relación esfuerzos-resistencias en un punto P, se muestra en el círculo del modelo de Mohr-Coulomb (Figura 9). El método es gráfico, y determina los límites de falla, si los esfuerzos de corte y normal son conocidos.

Se utilizará el criterio de Mohr-Coulomb, con las ecuaciones normales de falla, para calcular la densidad y la salinidad óptima para perforar un intervalo.

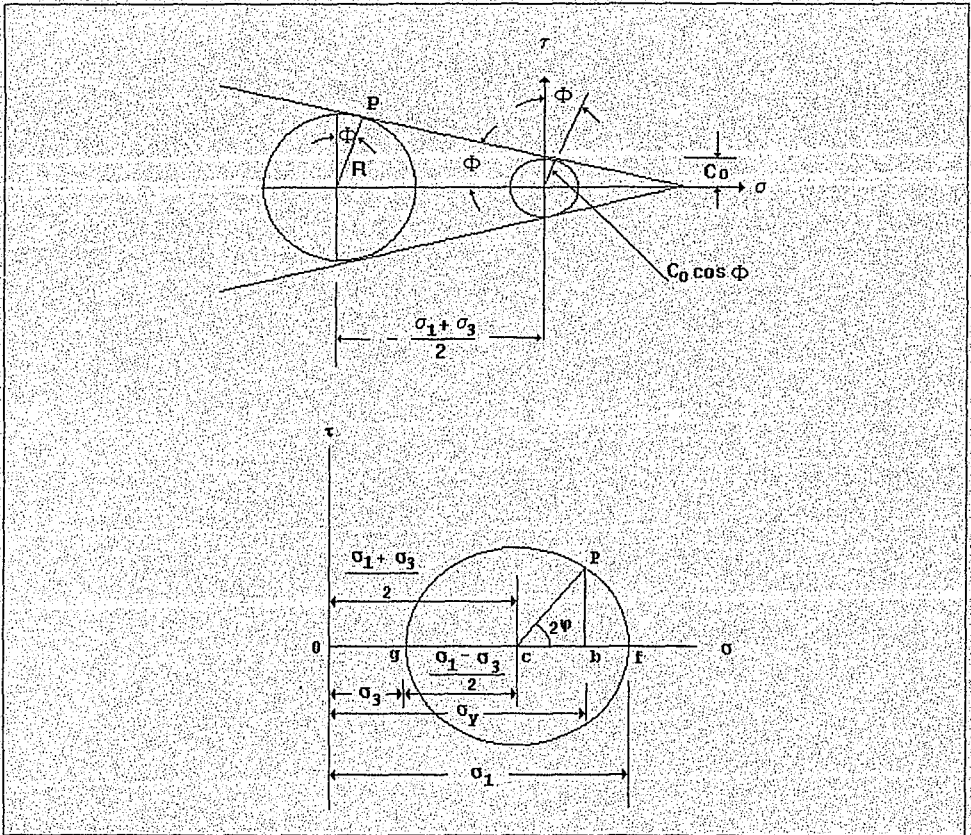


Figura 9. Círculo Mohr-Coulomb

El criterio de Mohr-Coulomb, considera los esfuerzos principales máximo y mínimo (σ_1 , σ_3), para el cálculo del esfuerzo normal efectivo sobre el plano de falla, y se determina con la siguiente relación:

$$\sigma' = 0.5 (\sigma_1 + \sigma_3) - 0.5 (\sigma_1 - \sigma_3) \operatorname{sen}\phi - p \operatorname{poro} \quad (64)$$

donde ϕ , es el coeficiente de fricción interna de la roca, que en forma general se ha visto²⁰ que toma el valor de

30°²¹, en las rocas que no son arcillosas, y para las arcillosas, toma el valor promedio de 15°²¹. La ecuación de la recta que representa la resistencia límite de la roca a la falla es:

$$\tau_{Líml} = C_o + \sigma' \tan \phi \quad - - - - - (65)$$

donde C_o, es la ordenada al origen, y representa la cohesión de la roca. El esfuerzo de corte para este mismo punto, se obtiene con la siguiente expresión:

$$\tau_{Real} = 0.5 (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi \quad - - - - - (66)$$

Las ecuaciones 60, 61, 64, 65 y 66, son las utilizadas para determinar el estado de esfuerzos críticos, al variar la densidad del lodo y el ángulo de desviación del pozo.

Para el cálculo de salinidades, utilizamos la ecuación 64 modificada por la alteración en la presión de poro, quedando:

$$\sigma' = 0.5 (\sigma_1 + \sigma_3) - 0.5 (\sigma_1 - \sigma_3) \operatorname{sen} \phi - (p_{poro} + \Delta P) \quad - - - - - (67)$$

Las ecuaciones 60, 61, 65, 66 y 67 son las utilizadas para el cálculo de esfuerzos críticos, al variar la salinidad del lodo.

El método utilizado para el cálculo de densidades y salinidades, consiste en hacer un balance de esfuerzos, hasta que el esfuerzo real de corte (ecuación 65), alcance los límites de falla (ecuación 66), primero es variada la densidad del fluido de perforación, y una vez elegida una densidad óptima, se calculan los esfuerzos límites variando la salinidad del fluido de perforación.

Tomando en cuenta que los valores de ϕ y C_0 , son parámetros constantes del material¹⁴, el desarrollo de la falla de la roca está ilustrada en la figura 10. Para establecer la falla de un material, son necesarias pruebas de laboratorio, hechas al material exponiéndolo a diferentes fuerzas, arriba de su resistencia. El perfil de esfuerzos a los que está sometida la roca, en la vecindad del pozo, bajo ciertos parámetros, y variando la salinidad (actividad) del fluido de perforación es calculado, y se grafica, como esta ilustrado en la figura 11, con la falla desarrollada. Comparando el perfil de esfuerzos con la falla desarrollada, se puede esperar condiciones de falla (esto no necesariamente significa inestabilidad del pozo) a ocurrir, cuando los esfuerzos en la vecindad de la pared del pozo, exceden la resistencia de la formación.

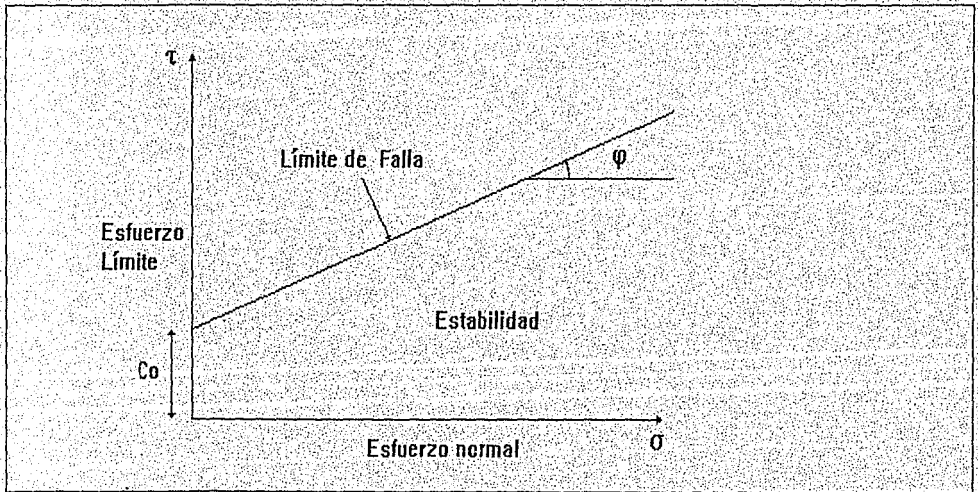


Figura 10. Criterio de falla.

El significado físico, de reducir los esfuerzos de corte (fuerzas desviatorias), pueden explicarse basados en

el análisis de esfuerzos fundamentales. La simetría del tensor de esfuerzos $[\Sigma]$, puede ser descompuesto en dos tensores; el tensor desviatorio $[\tau_{Real}]$ y el tensor hidrostático $[\tau_{Lími}]$. El esfuerzo del tensor desviatorio $[\tau_{Real}]$ es parte del estado de esfuerzos el cual representa el corte o el estado de desviación de esfuerzos. El esfuerzo desviatorio es la causa de la falla de la roca, si ésta se excede, la falla se desarrolla. Si se mantiene este esfuerzo bajo, ayudará a la estabilidad del agujero.

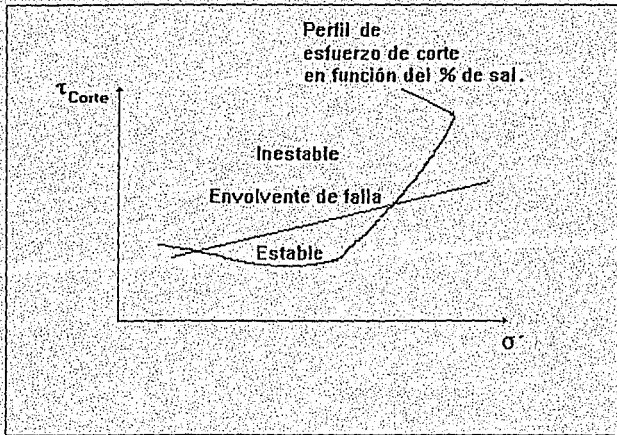


Figura 11. Comparación del perfil de falla con el perfil de esfuerzos normales

De la figura 11, se observa que existe un rango de salinidad del fluido de perforación, para que los esfuerzos sean mínimos. Entonces un análisis, puede conducir no sólo a determinar el peso del lodo óptimo en base a la presión de poro y el gradiente de fractura, sino también la salinidad óptima, para combatir la inestabilidad del pozo.

El perfil de esfuerzos, dependen del lugar y también de las condiciones de operación. Los parámetros in-situ, esfuerzos, presión de poro, actividad del agua de formación

(A_{ws}), etc., no pueden ser alterados, y son inherentes al sistema. Pero los parámetros de operación, como el peso del lodo, la actividad de agua del fluido de perforación (A_{wf}), el ángulo del pozo y el azimut o rumbo del pozo, son parámetros que pueden ser controlados en el campo, con limitaciones razonables. Con este método, se pueden analizar los esfuerzos en la vecindad del pozo, y conocer el comportamiento de la estabilidad de las paredes, al reducir o aumentar los parámetros operacionales, para mejorar las condiciones de estabilidad.

5.2 Desarrollo para la solución del problema.

Los datos de campo necesarios para los cálculos, son los siguientes:

Profundidad, (m)
Temperatura, ($^{\circ}\text{C}$)
Ángulo del pozo, ($^{\circ}$ grados)
Rumbo ó Azimut, ($^{\circ}$ grados)
Densidad de la roca, (gr/cm^3)
Lectura sónica compresional, (mms/p)
Lectura sónica de corte, (mms/p)
Lectura de rayos gamma, (API)
Presión de poro, (gr/cm^2)
Actividad de la lutita, a_{ws} .

Las constantes elásticas, se determinan por medio de la velocidad de propagación de una onda elástica, dentro de material. A partir del registro sónico, se calculan las propiedades mecánicas de la roca, con las siguientes relaciones²⁰:

Relación de Poisson.

$$v = \frac{0.5(dts/dtc)^2 - 1}{(dts/dtc)^2 - 1} \quad \text{--- (68)}$$

Módulo de Elasticidad o de Young.

$$E = 2 \frac{\rho_b}{dts^2} (1 + v) m \quad \text{--- (69)}$$

m = Constante de conversión = 1.34 E10 si ρ_b gr/cm³ y dts en mms/pie

Módulo de rigidez o de corte.

$$G = \frac{\rho_b}{dts^2} m \quad \text{--- (70)}$$

Módulo de volumen.

$$K_b = \rho_b \left(\frac{1}{dts^2} - \frac{4}{3 dts^2} \right) \quad \text{--- (71)}$$

Módulo de compresibilidad.

$$C_b = \frac{1}{K_b} \quad \text{--- (72)}$$

Resistencia a la compresión.

$$C_o = \frac{0.026 a E m}{C_b \times 10^6} (0.008 V_{arc.} + 0.0045(1 - V_{arc.}))$$

$$a = \frac{2 \cos \varphi}{1 - \text{sen } \varphi}$$

$$V_{arc.} = \frac{GR - GR_1}{GR_2 - GR_1} \quad \text{--- (73)}$$

donde:

φ = Ángulo de fricción interna, característico de cada roca.

GR = Lectura de rayos gamma en la zona de interés.

GR₁ = Lectura de rayos gamma en la zona limpia.

GR₂ = Lectura de rayos gamma en zonas opuestas.

Resistencia a la tensión.

$$T_e = \frac{C_o}{12} \quad \text{--- (74)}$$

Actividad del fluido de perforación. La actividad química de una solución, es aproximadamente proporcional a su contenido de sal²².

Cloruro de Calcio:

$$a_{wf} = 1 - 0.00065 (\% \text{ sal}) - 0.000438 (\% \text{ sal})^2 + 0.00000281 (\% \text{ sal})^3 - 0.0000000265 (\% \text{ sal})^4$$

Cloruro de Sodio:

$$a_{wf} = 1 - 0.00451 (\% \text{ sal}) - 0.000199 (\% \text{ sal})^2$$

Cloruro de Potasio:

$$a_{wf} = 0.99999 - 0.003443 (\% \text{ sal}) - 0.00009691 (\% \text{ sal})^2$$

*Cálculos a 20° C

----- (75)

La actividad del fluido que contiene la roca, se puede obtener a partir de la curva del SP. La curva del SP registra el potencial eléctrico (voltaje), producido por la interacción del agua de formación, el fluido de perforación y las lutitas. La dirección de la corriente, corresponden en el caso más común, de el fluido de mayor salinidad al de menor, que en la mayoría de los casos, corresponde al fluido de perforación, en el caso contrario, la corriente fluirá en forma inversa. La curva del SP, es la deflexión de potencial que existe enfrente a una formación, y se mide en base a una línea de lutitas, y su magnitud obedece la siguiente relación²³:

$$SP = -K \log \frac{a_{ws}}{a_{wf}} \text{----- (76)}$$

$$SP = -K \log \frac{R_{wf}}{R_{we}} \quad (77)$$

donde K, es un coeficiente de proporcionalidad a la temperatura absoluta. Para el NaCl es igual a 71 a 25 °C. Y varía en proporción directa a la temperatura de acuerdo a la siguiente relación:

$$K = 65 + 0.24 T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (78)$$

R_{wf} , es la resistividad del agua del filtrado del lodo y R_{we} , es la resistividad del agua que contiene la formación. La relación que define a R_{we} es:

$$R_{we} = 0.075/a_{ws} \quad (79)$$

De la ecuación 73, 75 y 77, se puede obtener la actividad del fluido que contienen las formaciones, donde ΔSP , es la lectura del registro SP en alguna arena cerca del cuerpo de lutitas, quedando la siguiente expresión:

$$a_{ws} = \frac{e^{\Delta SP/K}}{\left(\frac{R_{mf}}{0.075} - \frac{1}{a_{wf}} \right)} \quad (80)$$

Volumen molar²⁴:

$$V = \sum \frac{x_i V_{Mi}}{\rho_i} \quad (81)$$

donde:

x_i es la fracción del componente.

V_{M_i} es el volumen molar del componente.

ρ_i es la densidad del componente.

Para ilustrar el uso de las ecuaciones y como son obtenidos los diferentes parámetros se presenta el siguiente ejemplo, que es hecho para un ciclo iterativo, los siguientes cálculos se hicieron con el auxilio de un programa de cómputo. Los resultados del programa se graficaron en la figura 12, en el ejemplo se hace el cálculo para el primer punto.

Ejemplo:

Calcular la salinidad mínima y máxima del pozo Caan-201, a la profundidad de 1225 m., para mantener las paredes del pozo estables, con los siguientes datos:

Profundidad:	1225 metros vert.
Densidad:	1.15 gr/cm ³
Angulo del pozo:	0°
Azimut:	0°
Grad. sobrecarga:	0.1920 kg/cm ² /m
dtc:	120 mms/pie
dts:	216 mms/pie
GR	30 API
GR zona limpia:	30 API
GR Zona sucia:	50 API
Presión de poro:	131 Kg/cm ²
Aws (lutitas):	0.889
Ángulo fricción interna:	30 °
Cohesión Co:	28 kg/cm ²

Cálculo del incremento de presión por ósmosis, iniciando para una concentración de 1% de NaCl:

$$\Delta p = A \frac{RT}{V} \ln(a_{ws}) / (a_{wf})$$

$$R = 84.767 \text{ Kg-cm/gr-mol } ^\circ\text{k}$$

Temperatura como gradiente:

$$T = 28 + 1225/30 + 273$$

$$T = 341.83 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$V_i = \sum \frac{x_i V_{M_i}}{\rho_i}$$

Componente	Fracción	V _{Mi}	x _i V _{Mi}	ρ _i	x _i V _{Mi} / ρ _i
H ₂ O	.99	18	7.82	1.00	17.82
CaCl	.01	58.44	.5844	2.16	.27
	1.00				18.09

$$V_i = 18.09 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

$$a_{wf} = 1 - 0.00451 (\% \text{ sal}) - 0.000199 (\% \text{ sal})^2$$

$$a_{wf}(i) = 1 - 0.00451(x_i) - 0.000199(x_i)^2$$

$$a_{wf}(1) = 1 - 0.00451(1) - 0.000199(1)^2$$

$$a_{wf} = 0.995291$$

Δp' incremento de presión por ósmosis sin corrección.

$$\Delta p' = (84.76798 \times 341.83/18.09) (\ln(0.995291/.889))$$

$$\Delta p' = 180.89 \text{ Kg/cm}^2$$

Coefficiente de Poisson:

$$v = \frac{0.5(dts/dtc)^2 - 1}{(dts/dtc)^2 - 1}$$

$$v = \frac{0.5(216/120)^2 - 1}{(216/120)^2 - 1}$$

$$v = 0.27678$$

Corrección por efecto de granulo:

$$A = (1 - 2v)/(1 - v)$$

$$A = (1 - 2 \times 0.27678)/(1 - 0.27678)$$

$$A = 0.6172948$$

Δp corregido será:

$$\Delta p = (A) \Delta p'$$

$$\Delta p = 0.6172948 \times 180.89$$

$$\Delta p = 111.66 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

Cálculo de los esfuerzos en la formación.

$$\sigma_{H1} = \sigma_{H2} = \frac{v}{1 - v} (\sigma_{\text{vert}} - (P_p + \Delta P)) + (P_p + \Delta P)$$

$$\sigma_{\text{vert}} = \text{Gradiente sobrecarga} \times \text{profundidad}$$

$$\sigma_{\text{vert}} = 0.1920 \times 1225$$

$$\sigma_{\text{vert}} = 235.25 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{H1} = \frac{0.27678}{1 - 0.27678} (235.25 - (131 + 111.66)) + (131 + 111.66)$$

$$\sigma_{H1} = 239.80 \text{ Kg/cm}^2$$

Esfuerzos al rotar los ejes:

$$\sigma_x = (\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \text{sen}^2\beta) \cos^2\gamma + \sigma_{\text{vert}} \text{sen}^2\gamma$$

$$\sigma_y = (\sigma_{H1} \text{sen}^2\beta + \sigma_{H2} \cos^2\beta)$$

$$\sigma_z = (\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \text{sen}^2\beta) \text{sen}^2\gamma + \sigma_{\text{vert}} \cos^2\gamma$$

$$\tau_{yz} = 0.5(\sigma_{H2} - \sigma_{H1}) \text{sen } 2\beta \text{sen } \gamma$$

$$\tau_{xz} = 0.5(\sigma_{H1} \cos^2\beta + \sigma_{H2} \text{sen}^2\beta - \sigma_{\text{vert}}) \text{sen } 2\gamma$$

$$\tau_{xy} = 0.5(\sigma_{H2} - \sigma_{H1}) \text{sen } 2\beta \cos \gamma$$

Sustituyendo los valores queda:

$$\sigma_x = 239.80 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_y = 239.80 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_z = 235.25 \text{ Kg/cm}^2$$

Esfuerzos en la pared del pozo:

$$\sigma_r = P_w$$

$$\sigma_{\theta} = (\sigma_x + \sigma_y - p_w) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\nu \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

$$\tau_{rz} = 0$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta)$$

Sustituyendo valores:

$$\sigma_r = 140.87 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\theta} = 338.74 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{zz} = 235.25 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

$$\tau_{rz} = 0$$

$$\tau_{\theta z} = 0$$

Aplicando el criterio de falla Mohr-Coulomb:

$$\sigma' = 0.5(\sigma_1 + \sigma_3) - 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi - (p_{\text{poro}} + \Delta P)$$

$$\tau_{\text{Lim1}} = C_0 + \sigma' \tan \varphi$$

$$\tau_{\text{Real}} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi$$

$$\sigma_1 = 338.74 \text{ Kg/cm}^2 \text{ (valor máximo).}$$

$$\sigma_3 = 140.87 \text{ Kg/cm}^2 \text{ (valor mínimo)}$$

$$\sigma' = -52.32 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\tau_{\text{Lim1}} = -2.209 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\tau_{\text{Real}} = 85.67 \text{ Kg/cm}^2$$

Para cada valor de esfuerzo normal (σ'), tenemos dos valores de esfuerzos límites (τ_{Lim1} y τ_{Real}), estos son gráficamente como se muestra en la figura 12. Haciendo los cálculos para las demás concentraciones, y gráficamente el esfuerzo normal con los esfuerzos límites, resulta:

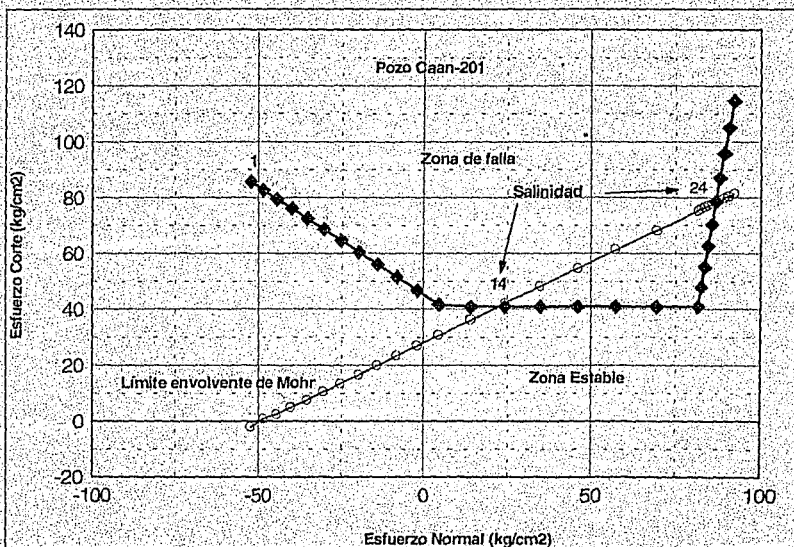


Figura 12. Ejemplo. Esfuerzo normal vs esfuerzos corte.

De la figura 12 se obtienen los siguientes resultados:

Salinidad mínima: 14 % de NaCl

Salinidad máxima: 24 % de NaCl

5.3 Desarrollo de un programa de cómputo para determinar la estabilidad del pozo.

Las computadoras, han sido una herramienta indispensable para el desarrollo de los avances tecnológicos, los cálculos se vuelven sencillos, se cuenta con una gran precisión en los resultados, se pueden hacer evaluaciones de alternativas y toma de decisiones. Por lo tanto, se desarrolló un programa para ser utilizado con datos de campo, incorporando los conceptos hidráulicos y químicos.

El programa, aplica el lenguaje Q-Basic, y se enlista en el Apéndice A. Se divide en dos partes principales: la primera parte tiene como objetivo la determinación de las densidades del fluido de perforación máximas y mínimas, para mantener el agujero bajo condiciones de estabilidad y en la segunda parte, se determinan las salinidades máximas y mínimas, para que el agujero tenga las condiciones necesarias para evitar problemas mecánicos.

En conjunto, por medio de este programa, podemos establecer las condiciones de densidad y contenido de sal que se necesitan para perforar un intervalo. Con esta herramienta el Ingeniero de perforación, podrá conocer las condiciones óptimas que requiere en el fluido de perforación para evitar problemas de derrumbe o inestabilidad del agujero.

El desarrollo, establece primero los esfuerzos a los que están sometidas las rocas in-situ, al perforarse el pozo, y dependerá de los valores de densidad y salinidad que tenga el fluido de perforación, y a continuación se determinan las propiedades mecánicas de las roca, es decir los límites de falla, estableciendo los criterios de falla.

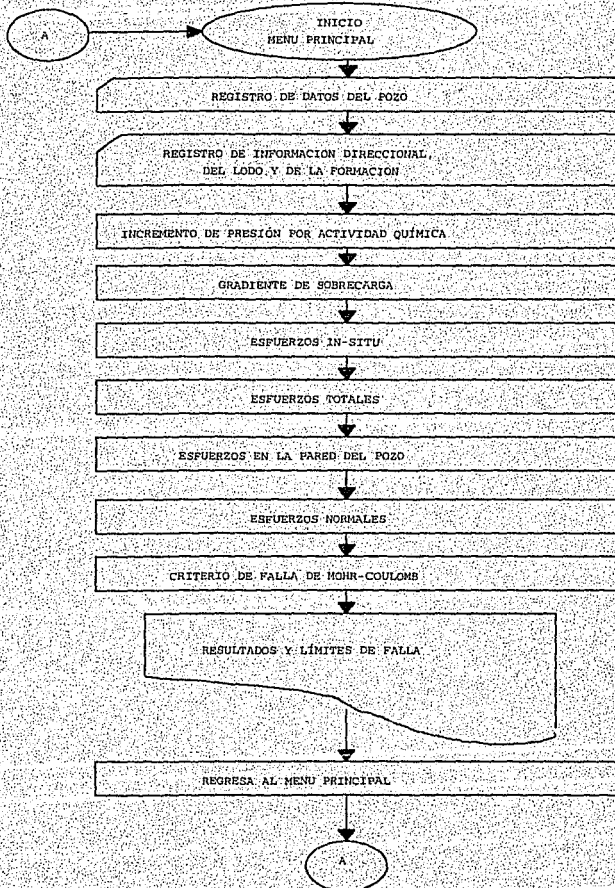
Los cálculos son efectuados en cada una de las estaciones es decir en cada profundidad, esto dará la ventaja que se puede trazar un perfil de densidades y salinidades contra profundidad, determinando los intervalos más inestables.

El límite de falla, es una comparación de los valores de los esfuerzos in-situ y los valores de resistencia de la roca, haciendo que esta falle ya sea por tensión o compresión. El programa hace variar la densidad y la salinidad del fluido de perforación, sabiendo que los esfuerzos en el pozo son función de estos dos parámetros, y estos son incrementados hasta alcanzar los límites de falla de la formación.

En el apéndice A se detalla el procedimiento de uso del programa y la codificación.

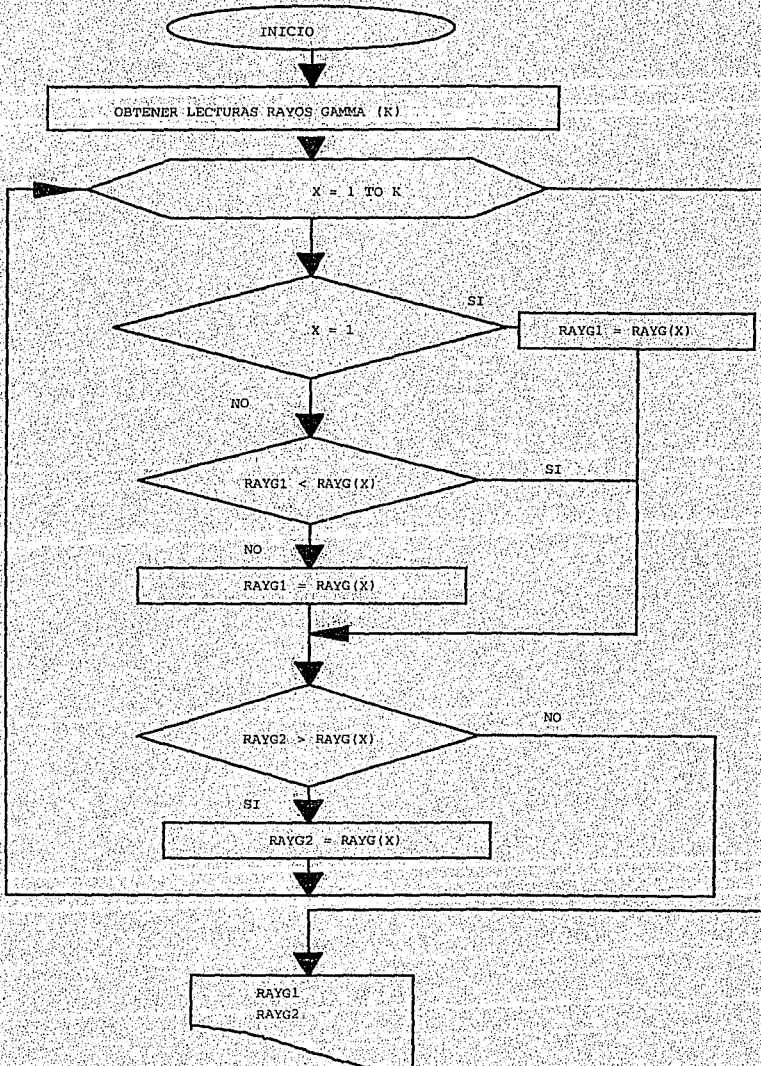
La secuencia de pasos en los cálculos son expresados en el siguiente diagrama de flujo:

PROGRAMA PRINCIPAL
DIAGRAMA DE FLUJO

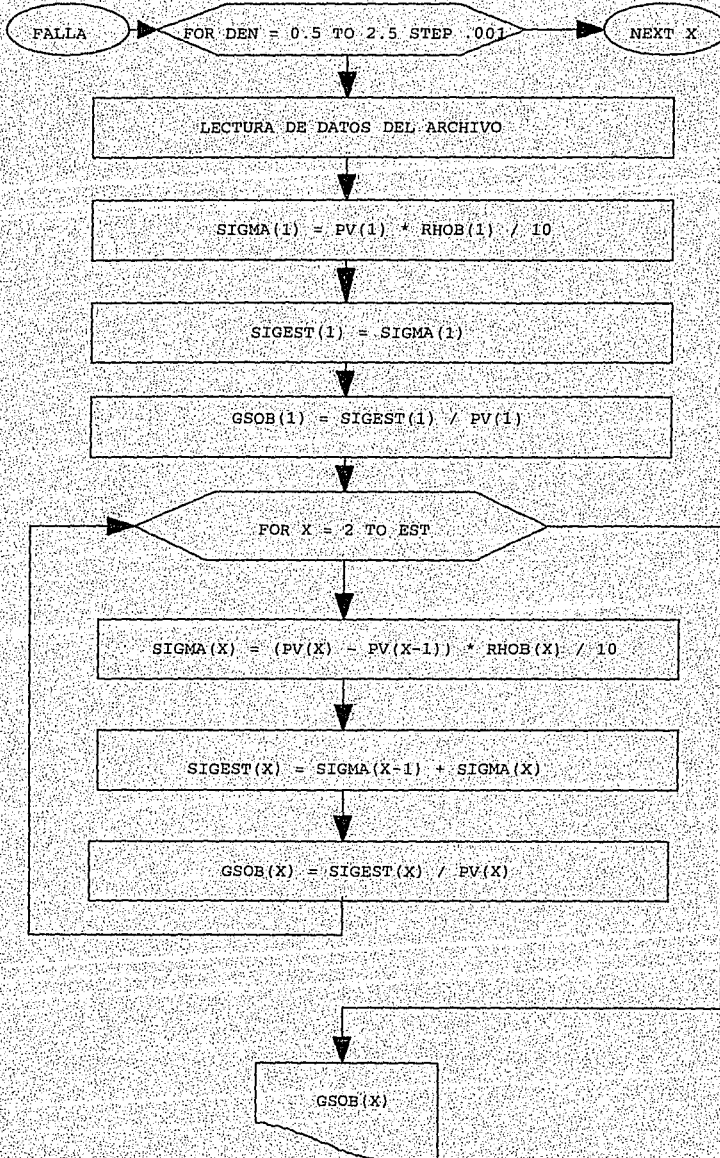


BLOQUE B

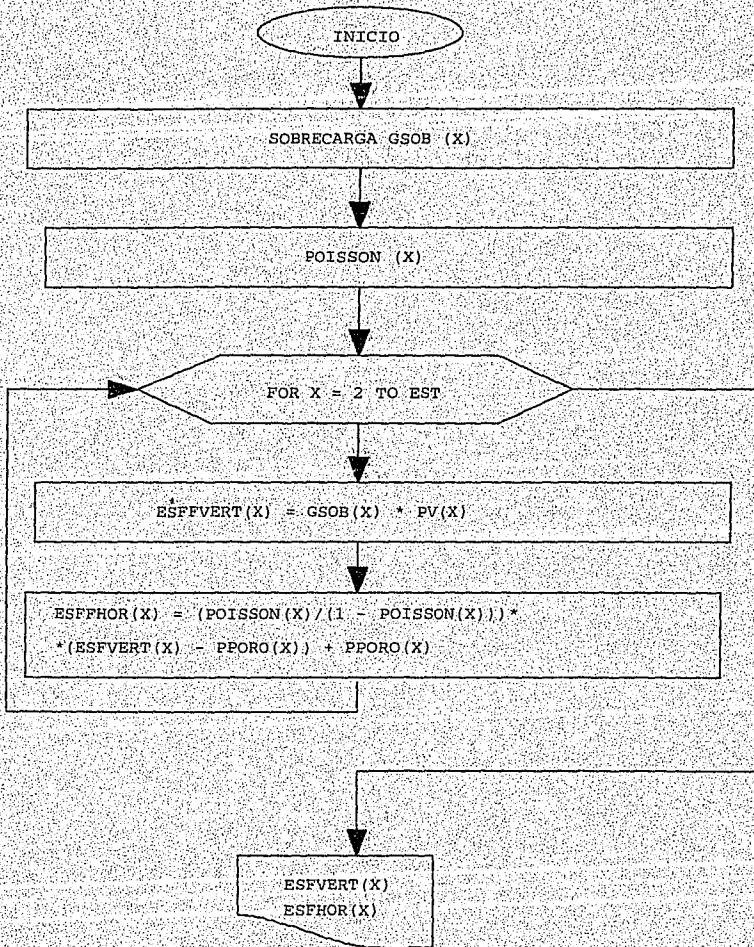
SELECCIÓN DE RAYOS GAMMA MÁXIMO Y MÍNIMO



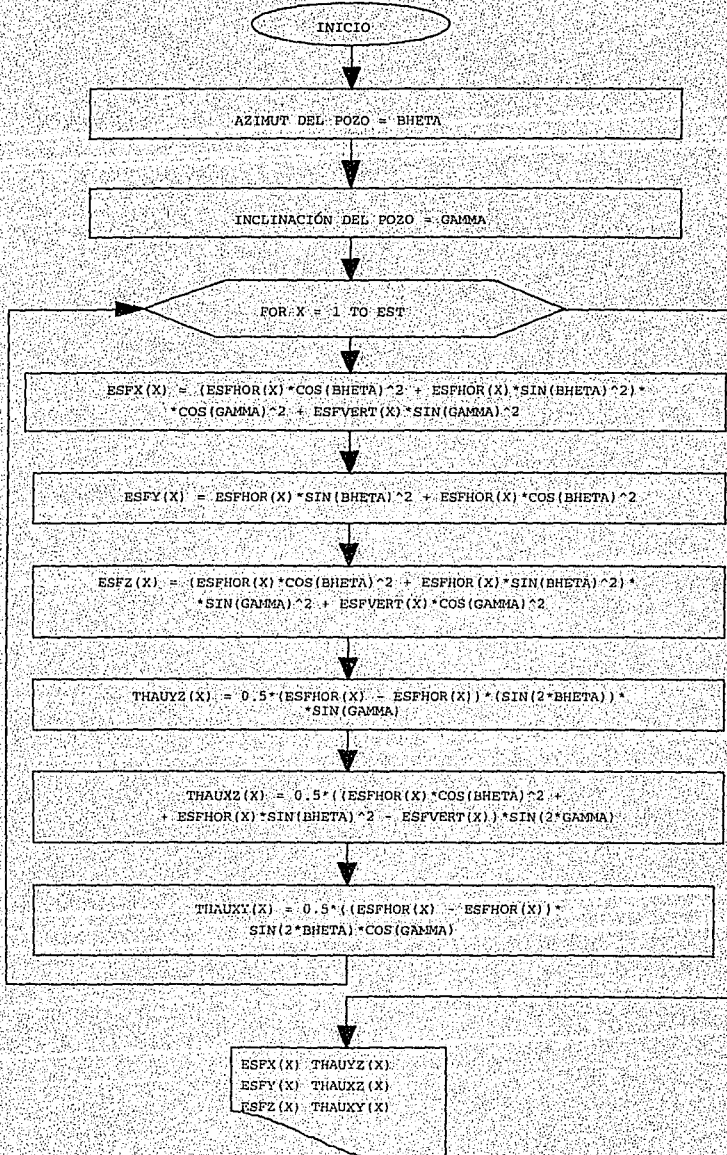
GRADIENTE DE SOBRECARGA



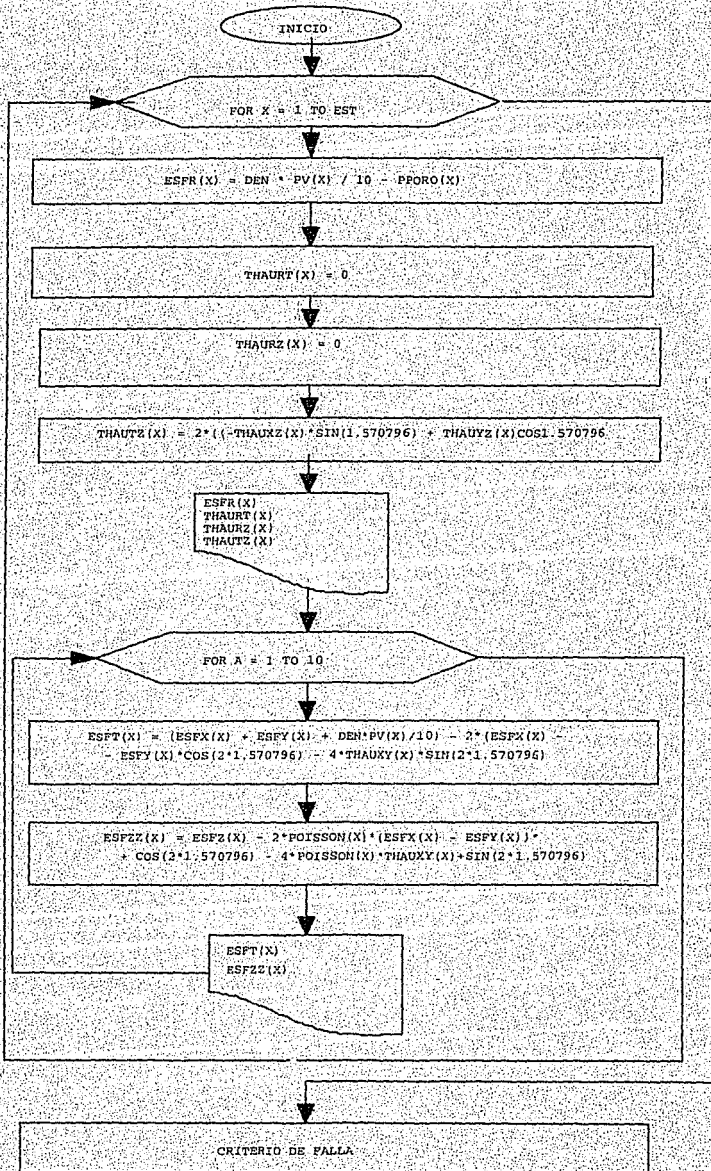
ESFUERZOS IN-SITU



ESFUERZOS TOTALES

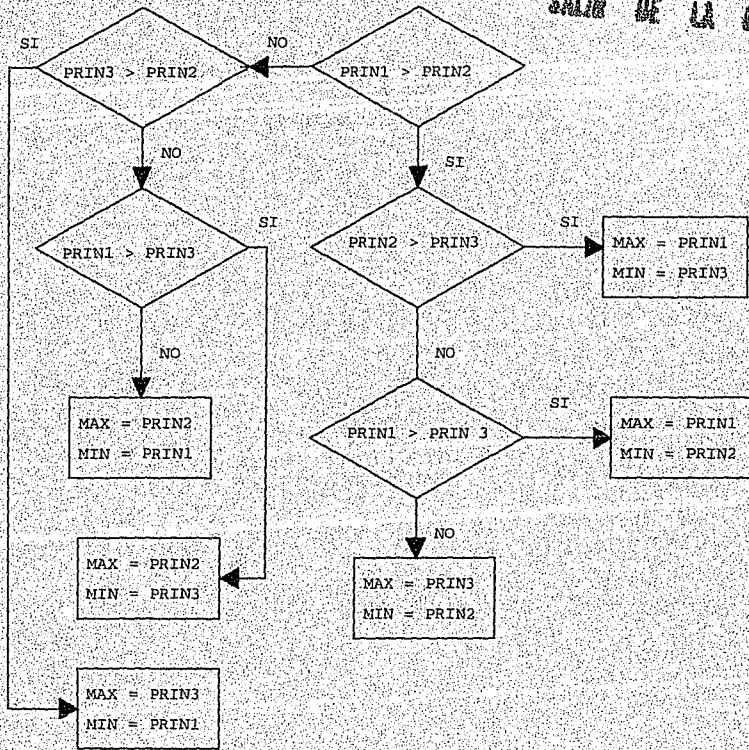


ESFUERZOS ALREDEDOR DEL POZO

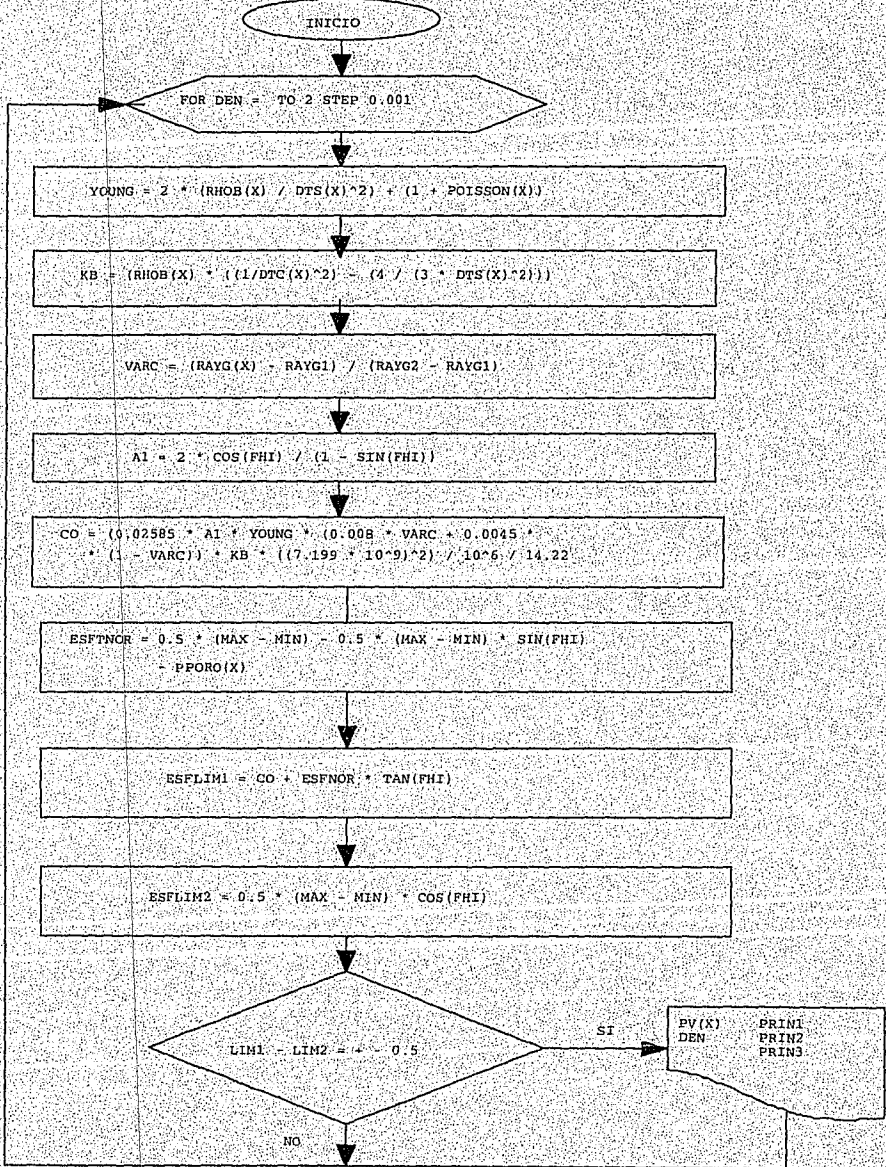


ESFUERZO MÁXIMO Y MÍNIMO

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

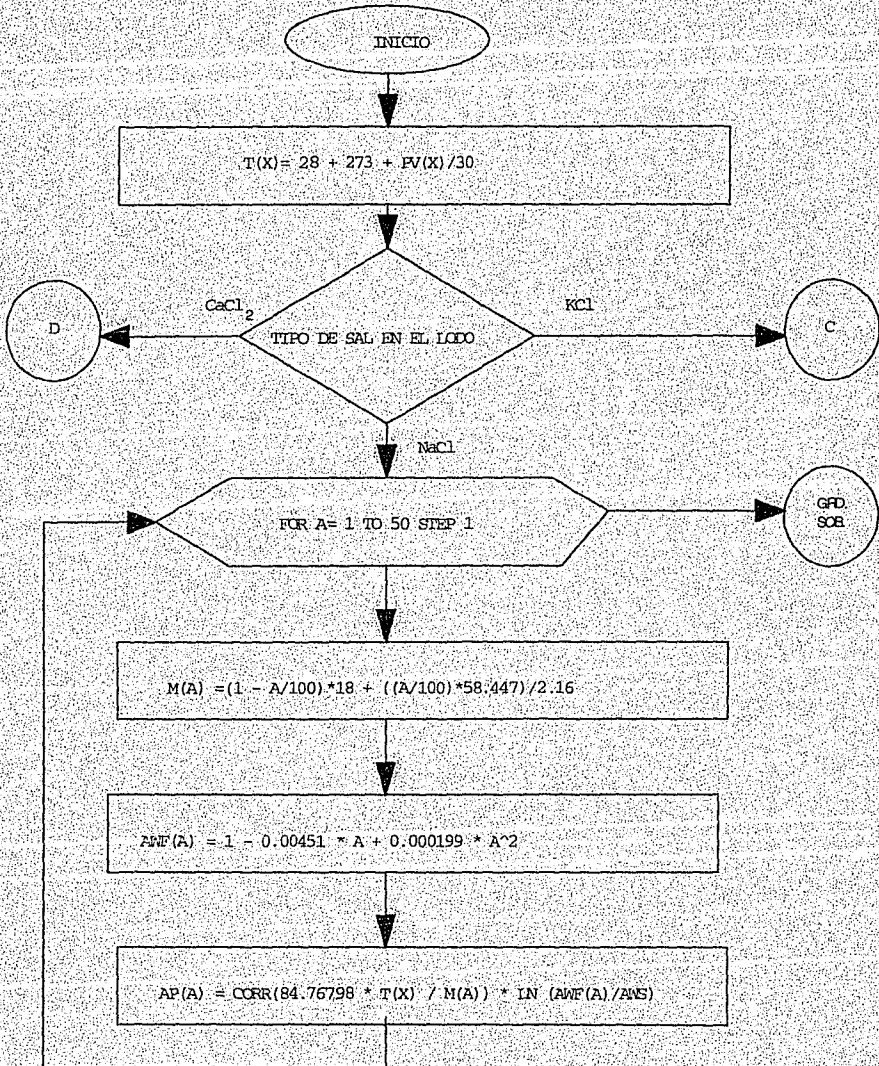


CRITERIO DE FALLA

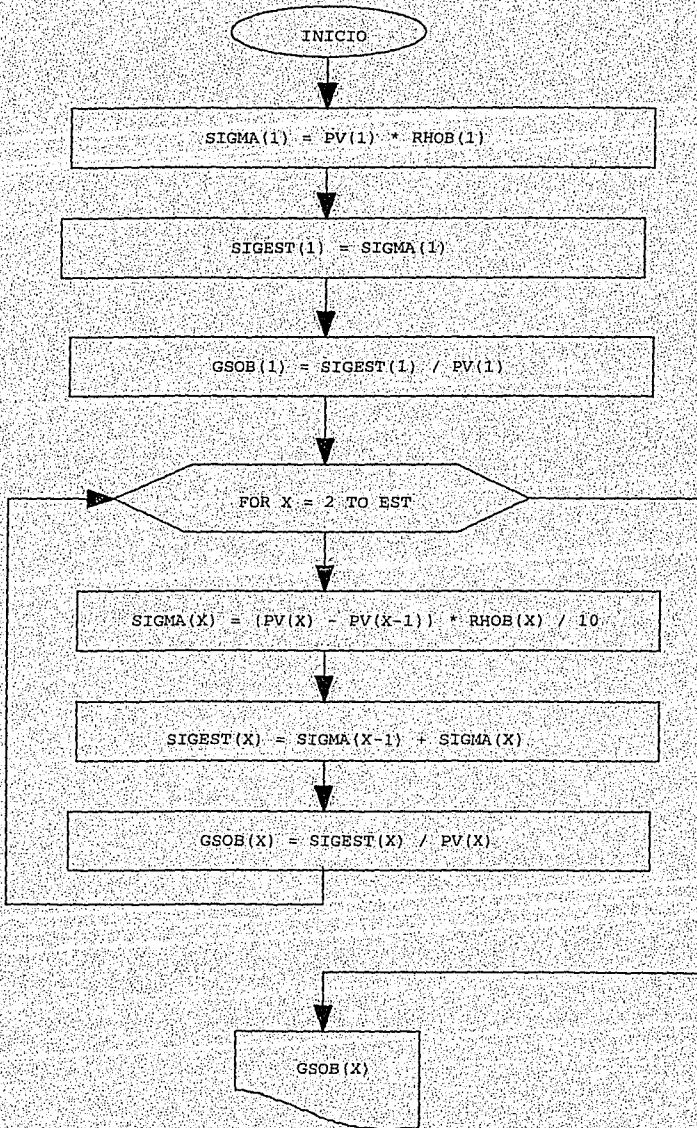


BLOQUE C

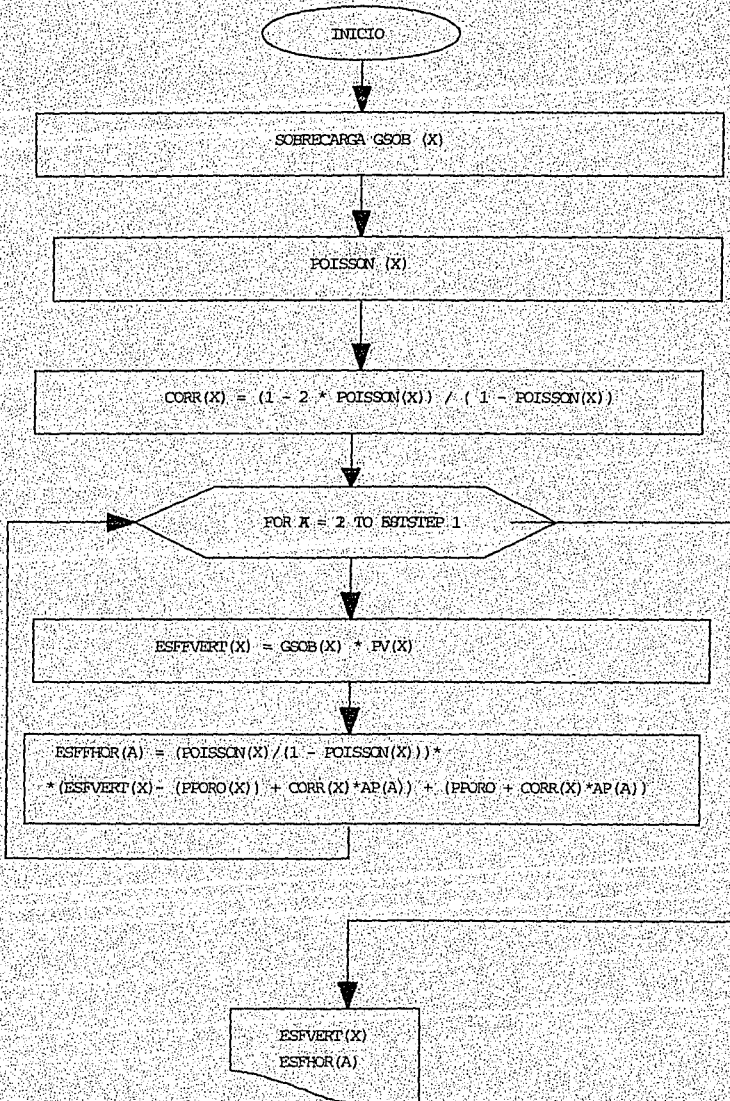
INCREMENTO DE PRESIÓN POR ACTIVIDAD QUÍMICA.



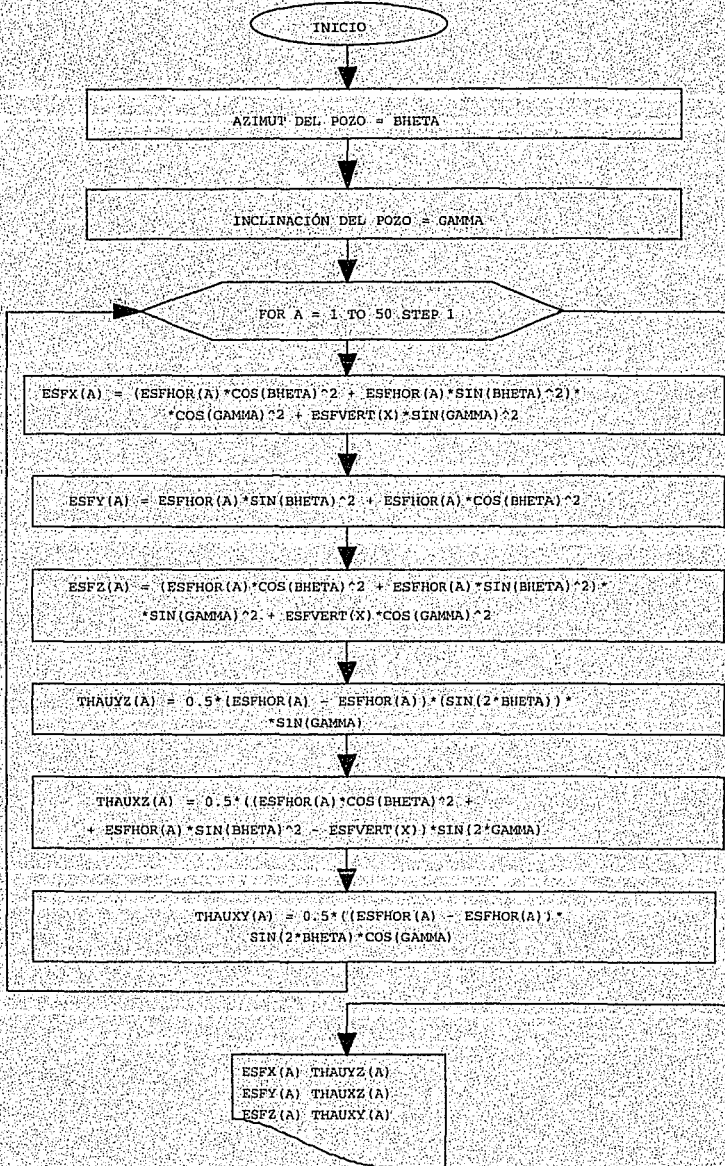
GRADIENTE DE SOBRECARGA



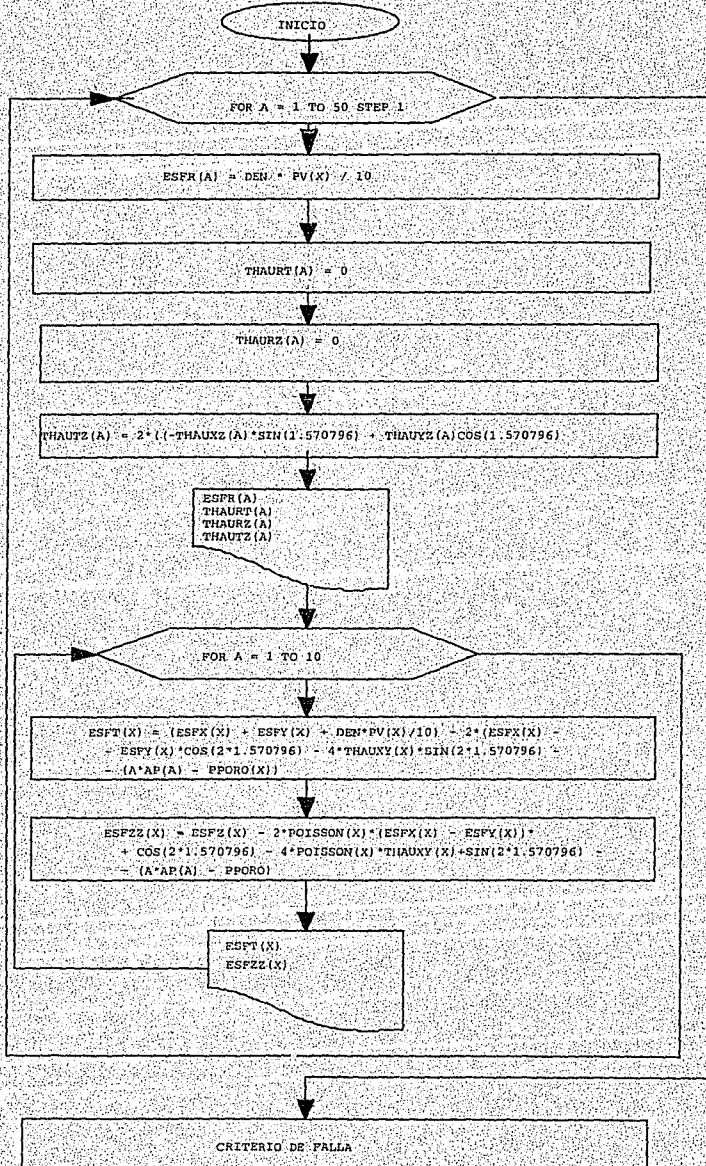
ESFUERZOS IN-SITU



ESFUERZOS TOTALES



ESFUERZOS ALREDEDOR DEL POZO



6. Aplicación del programa a pozos de la Zona Marina de PEMEX Exploración Producción.

A medida que las profundidades de perforación se han incrementado para la búsqueda de hidrocarburos, las arenas de los horizontes del Jurásico Inferior, han tenido especial interés en la Sonda de Campeche, de la Zona Marina. Antes de encontrar las arenas, existe una zona muy inestable de arcillas, que han presentado muchos problemas durante la perforación, causando la mayoría de pérdidas de agujeros e incremento en los tiempos de perforación.

En este estudio, es considerado el campo Balam, por ser uno de los más importantes y en donde los problemas de inestabilidad en las arcillas del Jurásico, siguen presentándose, este análisis, podrá contribuir a un mejor diseño del lodo, lo cual reflejará en la estabilidad del pozo.

Para la aplicación del programa de cómputo, se analizará el pozo Balam 13, en su quinta etapa, que fue perforado por la Plataforma Grijalva. Esta zona ha sido estudiada por muchas compañías petroleras, sin llegar a un entendimiento total de los fenómenos ocurridos. Existen núcleos representativos de las zonas arcillosas del campo Balam, que fueron cortados en el pozo Balam-45, y la Compañía Chevron analizó los núcleos en sus laboratorios, presentando los resultados mostrados en la tabla 4:

Tabla 4. Resultados del análisis de núcleos.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Mineralogía, % en peso			
Cuarzo	22	23	20
Calcita	10	6	14
Feldespató	3	2	2
Dolomita	0	0	0

Pirita	2	2	4
Siderita	0	0	2
Total	56	61	54
Arcillas			

Fracción de Arcillas en % de peso.

Illita	49	53	56
Caolinita	10	10	10
Clorita	6	8	9
Mezclas	34	29	25

Los avances de perforación, se presentan en la figura 13:

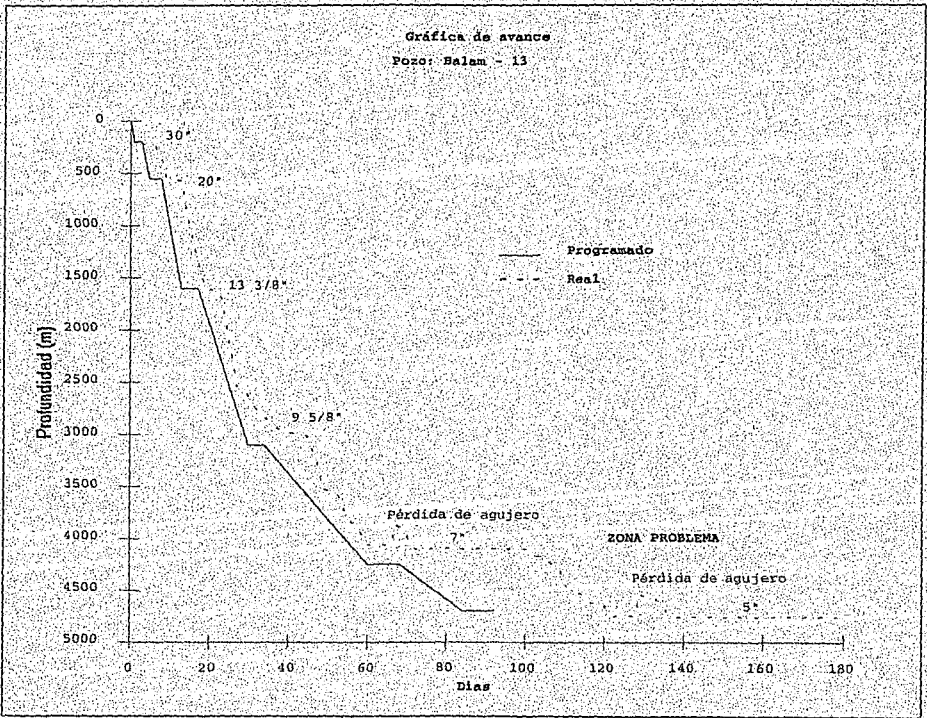


Figura 13. Avance diario de perforación del pozo Balam-13.

La columna Geológica del pozo es la siguiente:

Columna Geológica	Prof Vert. (m)	Prof Des. (m)
Reciente Pleistoceno	F.M.	F.M.
Mioceno Superior	515	515
Mioceno Medio	1948	1948
Mioceno Inferior	2387	2388
Oligoceno Superior	2598	2600
Oligoceno Medio	2642	2643
Oligoceno Inferior	2672	2673
Eoceno Medio	2775	2777
Eoceno Inferior	2825	2827
Paleoceno Superior	2963	2972
Paleoceno Inferior	3018	3030
Brecha Pal. Cret. Sup.	3050	3065
Cretácico Medio	3417	3467
Cretácico Inferior	3527	3585
Jur. Sup. Tithoniano	3649	3725
Jur. Sup. Kimmeridgiano	3744	3827

La zona que se analizará, corresponde a la quinta etapa, que es una zona problemática, como se puede identificar en la figura 13. Con los siguientes antecedentes:

Quinta etapa:

Con agua de mar y bombeo de baches de lodo, con barrena de 8 1/2" perfora a 4065 m, con pérdida parcial de fluido de perforación de 7 barriles por hora, observa atrapamiento de la sarta de perforación, intentando despegarla con tensión, sin tener éxito, desconecta la tubería con torsión izquierda y con detonación de carga explosiva, dejando 138 m de tubería en el pozo, con la boca de pescado a 3927 m, coloca un tapón de cemento por circulación y desvía el pozo a 3871 m. Con lodo bentonítico-polimérico de densidad de 1.08 gr/cm³, salinidad de 11,000 ppm de NaCl, filtrado de

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Aplicación del programa a pozos de la Zona Marina.

35.5 cc, enjarre 2mm, perfora a 4103 m, observando fricciones y resistencias en los intervalos 3833 - 3945 m, repasa liberando la tubería y mete T.R. de 7".

Del registro de calibración del pozo, se observa que la zona de 3825 m a 3925 m, tiene un diámetro mucho mayor que el de la barrena (8 1/2") , llegando a diámetros mayores de 16". De esta zona problema, de los registros tomados se obtuvo la información presentada en la tabla 5.

Tabla 5. Información Balam 13

Profundidad		Lect. Sónica		Den. roca	R.G.	Presión poro (kg/cm ²)	Caliper (pg)
Des. (m)	Vert. (m)	DTC (µs/ft)	DTS (µs/ft)	RHOB (gr/cm ³)			
3825	3741	50	87	2.75	130	400	8.8"
3830	3746	52	94	2.80	60	401	9.4"
3835	3750	53	92	2.80	30	401	9.6"
3840	3755	47	115	2.05	100	401	16"
3845	3759	95	155	2.15	80	402	14"
3850	3764	115	160	2.15	80	402	15"
3855	3770	57	95	2.65	83	403	10.2"
3860	3775	50	85	2.80	79	403	11"
3865	3779	45	90	2.55	83	404	12"
3870	3784	43	85	2.35	62	404	17"
3875	3788	75	110	2.45	68	405	9.5"
3880	3793	80	120	2.65	20	405	9.1"
3885	3798	43	85	2.35	70	406	9.2"
3890	3800	80	138	2.50	83	406	9.5"
3895	3805	75	118	2.65	85	407	12"
3900	3810	90	118	2.40	100	407	14"
3905	3814	55	125	2.40	85	408	14.5"
3910	3819	60	90	2.70	83	408	11"
3915	3823	85	150	2.65	79	409	9.3"
3920	3828	76	84	2.70	110	409	9.5"
3925	3832	93	134	2.55	130	410	10"

Ángulo de fricción interna: 15°
Azimut promedio en el intervalo: 38.90°
Ángulo promedio en el intervalo: 24.5°

Los resultados son mostrados en la figura 14, con los límites máximo y mínimo, de densidad y salinidad, es apreciable que la densidad utilizada fue la apropiada, pero no fue suficiente para estabilizar el agujero e impedir que se derrumbaran la paredes. Del perfil de salinidades se observar que existe un desequilibrio en las paredes y que el límite de salinidad para mantener las paredes estables es de 160,000 ppm en el fluido de perforación, con esto se contrarresta los efectos de inestabilidad.

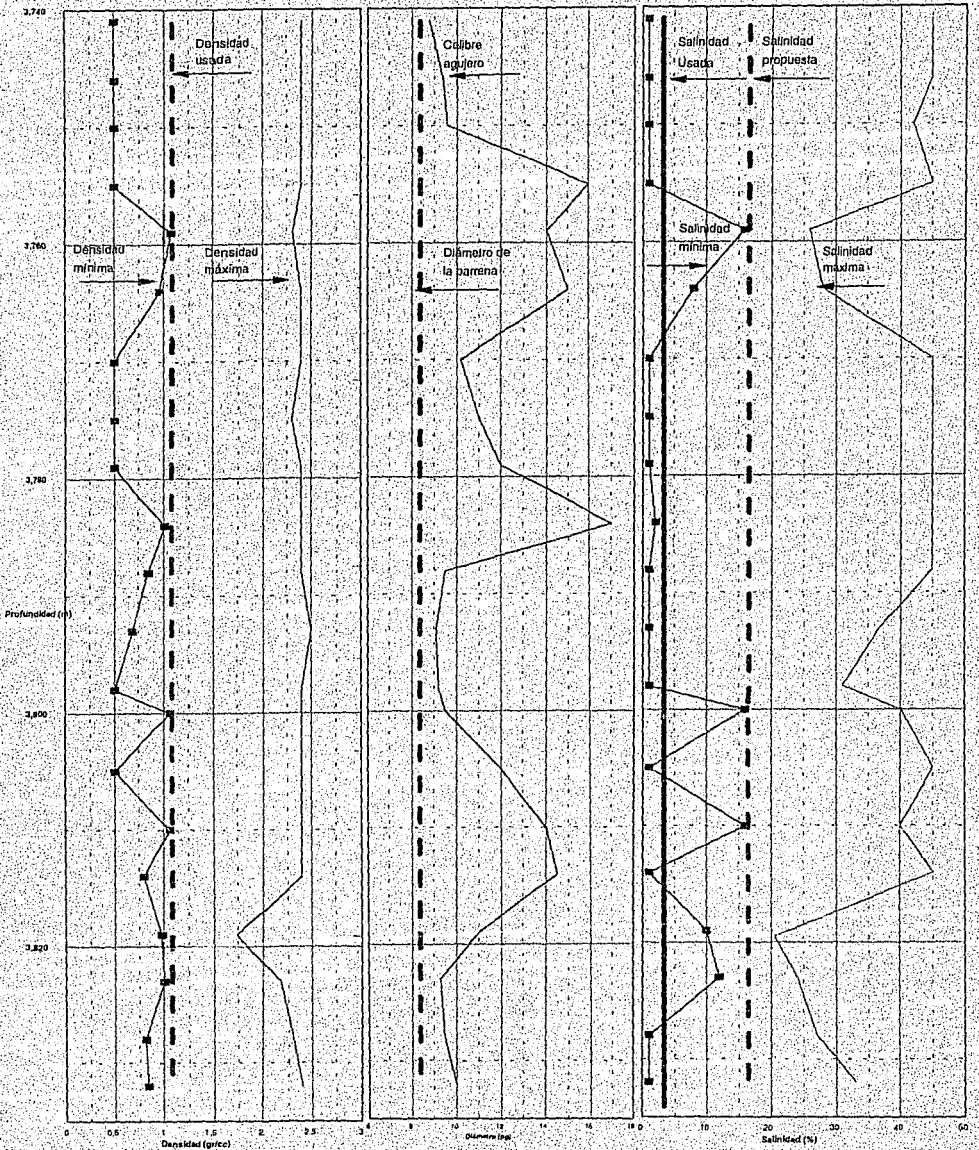


Figura 14. Resultados pozo Balam-13

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Aplicación del programa a pozos de la Zona Marina.

Los esfuerzos en la pared del pozo, con una densidad de fluido de 1.08 gr/cm² son los mostrados en la tabla 6:

Tabla 6. Esfuerzos normales, de corte y principales.

Prof.	G.Sob.	Poissom	Esf. r	Esf. 0	Esf. z	Corte	Corte	Corte	Prin1	Prin2	Prin3
m	kg/cm ² /m		kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	RT	RZ	TZ	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²
3741	27500	25340	404.2	1037.0	993.5	0	0	313.4	404.0	1329.5	701.8
3746	27500	2795	404.5	1084.2	1000.9	0	0	290.6	404.5	1336.2	749.0
3750	2750	2516	405.0	1036.7	995.5	0	0	315.7	405.1	1332.5	699.7
3755	2748	3379	405.5	1200.4	1015.0	0	0	233.2	405.5	1358.7	856.7
3759	2748	2019	405.9	960.7	984.8	0	0	355.7	405.9	1328.7	616.7
3764	2747	2019	406.5	961.1	985.84	0	0	356.4	406.5	1330.1	616.8
3770	2747	2831	407.1	1096.3	1007.2	0	0	288.9	407.1	1344.1	759.4
3775	2747	2831	407.7	1097.3	1008.6	0	0	289.5	407.7	1345.9	760.0
3779	2747	2613	408.1	1060.1	1004.6	0	0	309.3	408.1	1342.9	721.7
3784	2746	3109	408.6	1152.7	1016.7	0	0	263.1	408.6	1356.5	812.9
3788	2746	3109	409.1	1154.2	1017.7	0	0	263.1	409.1	1357.8	814.1
3793	2746	2220	409.6	998.6	998.6	0	0	343.3	409.6	1341.8	655.1
3798	2745	1512	410.1	898.8	980.1	0	0	395.0	410.1	1336.6	542.3
3800	2745	2882	410.4	1112.5	1015.7	0	0	286.2	410.4	1355.0	774.2
3805	2745	2941	410.9	1126.5	1018.4	0	0	280.7	410.9	1358.3	786.6
3810	2745	2882	411.4	1116.1	1018.2	0	0	286.9	411.4	1358.2	776.1
3814	2744	2831	411.9	1108.2	1018.0	0	0	291.7	411.9	1358.3	767.9
3819	2744	1000	412.4	839.4	969.9	0	0	429.5	412.4	1339.1	470.2
3823	2744	1682	412.8	927.6	991.0	0	0	385.5	412.8	1346.1	572.4
3828	2744	1682	413.4	928.1	992.2	0	0	386.3	413.4	1347.8	572.5
3832	2744	2187	413.8	1003.8	1006.9	0	0	348.6	413.8	1354.1	656.7

Los esfuerzos en la pared del pozo, con una densidad de fluido de 1.08 gr/cm², a la profundidad de 3819 m verticales, variando la salinidad del fluido de perforación, son los mostrados en la tabla 7:

Tabla 7. Esfuerzos al variar la salinidad

Salinidad % Co (Kg/cm ²)	ΔP (Kg/cm ²)	σ' (Kg/cm ²)	τ_{Lim1} (Kg/cm ²)	τ_{Real} (Kg/cm ²)	
1	387.74	201.47	202.98	442.13	462.54
2	387.74	191.30	210.57	444.16	462.19
3	387.74	180.54	218.69	446.34	461.84
4	387.74	169.08	227.34	448.65	461.52
5	387.74	156.90	236.53	451.12	461.23
3	387.74	144.16	246.26	453.72	460.97
7	387.74	130.68	256.55	456.48	460.74
8	387.74	116.52	267.40	459.39	460.56
9	387.74	101.67	278.82	462.45	460.42
10	387.74	86.11	290.83	465.66	460.33
11	387.74	69.84	303.43	469.04	460.29
12	387.74	52.84	316.64	472.58	460.31
13	387.74	35.10	330.48	476.29	460.39
14	387.74	16.60	344.95	480.17	460.54
15	387.74	-2.67	360.07	484.22	460.75
16	387.74	-22.74	375.87	488.45	461.03
17	387.74	-43.63	392.36	492.87	461.39
18	387.74	-65.38	399.66	494.83	469.42
19	387.74	-87.97	401.01	495.19	482.65
20	387.74	-111.47	402.39	495.56	496.53
21	387.74	-135.90	403.79	495.93	511.08
22	387.74	-161.29	405.21	496.31	526.32
23	387.74	-187.69	406.65	496.70	542.29
24	387.74	-215.13	408.12	497.09	559.00

El comportamiento de los esfuerzos, al variar la salinidad del fluido de perforación a la profundidad de 3819 m, es el que se muestra en la figura 14.

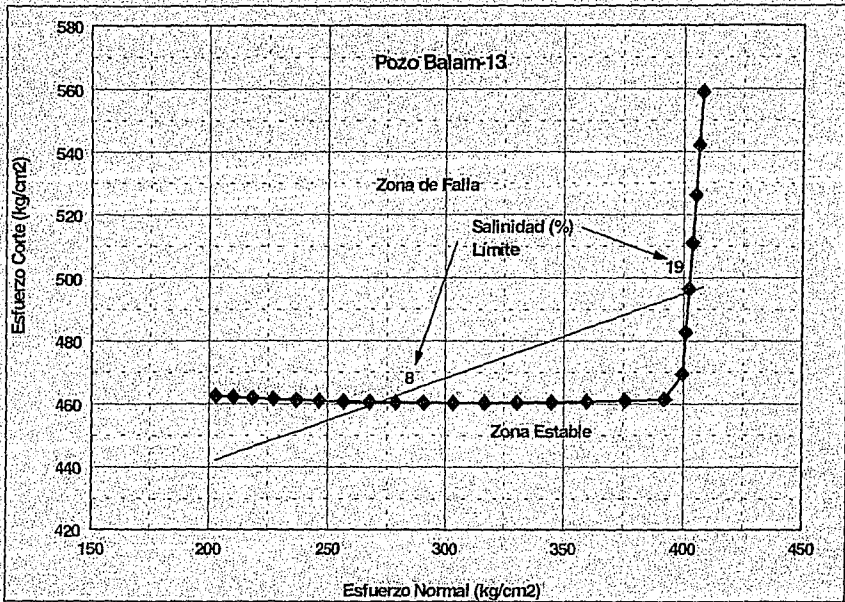


Figura 15. Esfuerzos al variar la salinidad.
 Pozo Balam 13. Profundidad 3819 m. Vert.

De pruebas efectuadas a muestras de recortes, en el laboratorio de fluidos de perforación en Ciudad del Carmen, indican que la arcilla es poco activa, esto quiere decir, que casi no reacciona con el agua. La baja actividad de la arcilla indica que los cambios de presión de poro se deben principalmente a efectos osmóticos.

El campo Balam, es de los más complicados de perforar en la Zona Marina, y podemos ver que el trabajo aquí presentado, es una herramienta muy útil para la toma de decisiones y para entender el comportamiento de las arcillas, y los efectos que tiene la salinidad sobre ellas.

En efecto, el análisis indica que el campo Balam en el intervalo presentado en este estudio, los problemas podrían ser reducidos usando los siguientes parámetros del lodo:

Densidad = 1.08 gr/cm³

Salinidad = 100,000 ppm

7. Conclusiones y recomendaciones.

1. El modelo calcula, para una densidad del lodo, el rango de salinidad aceptable que mantiene la pared del agujero estable. Si la densidad es menor a la presión de poro, se puede equilibrar el efecto de sobrebalance con la presión osmótica, dada por la salinidad.
2. El modelo determina, para una salinidad del lodo, la densidad necesaria que mantiene la estabilidad de la pared del agujero.
3. El modelo proporciona la factibilidad de seleccionar fluidos de perforación base agua. En caso de que la salinidad sobrepase los límites tolerables de saturación, para un fluido base agua, se debe considerar otro tipo de fluido.
4. La diferencial entre el potencial químico del agua del fluido de perforación y el de la formación, es una de las principales fuerzas que manejan el movimiento de agua, entrando y saliendo de la lutita.
5. El movimiento de agua entrando o saliendo de las lutitas, altera la presión en el interior del poro, cambiando a su vez los esfuerzos in-situ en la vecindad del pozo.
6. El modelo es aplicable para pozos verticales y direccionales.
7. Los parámetros más importantes, que definen la estabilidad de las paredes del pozo, son los siguientes:

Parámetro	Origen	Sensibilidad
Azimut	Dato de campo	Poco ($\sigma_{H1} = \sigma_{H2}$)
ángulo del pozo	Dato de campo	Muy sensible
Peso del lodo	Dato de campo	Muy sensible
Presión de poro	Reg. Resistividad	Muy sensible
σ_{vert}	Reg. Densidad	Muy sensible
σ_{H1}	Pruebas goteo	Muy sensible
σ_{H2}	Estimada	Muy sensible
Densidad de roca	Reg. densidad	Muy sensible
Poisson	Medido o calculado	Poco
Modulo Young	Medido o calculado	Poco
Salinidad del lodo	Medida	Muy sensible
Salinidad de la lutita	Medida o calculada	Muy sensible

Recomendaciones:

1. El análisis de los esfuerzos en los pozos de desarrollo, calculados con esta herramienta, es de utilidad para la programación de los pozos próximos a perforarse. La programación no sólo incluye la densidad del fluido de perforación y el ángulo de inclinación del pozo, sino también la salinidad que debe tener el fluido de perforación.
2. Se recomienda usar el programa presentado en este trabajo como una herramienta adicional en la toma de decisiones, relacionadas con la estabilidad del pozo.
3. Se recomienda mejorar el presente modelo incluyendo el efecto del tiempo en la estabilidad de las lutitas.

N O M E N C L A T U R A :

A	Constante poro-elástica (Ref. pag. 53).
a_w	Actividad química del agua.
a	Distancia radial del círculo de un agujero hecho en una placa.
a_{wf}	Actividad química del fluido de perforación.
a_{ws}	Actividad química de fluido que contiene la lutita.
b	Distancia radial de un círculo en una placa.
C_1, C_2, C_3	Constantes de integración.
C_b	Compresibilidad (kg/cm^2).
C_o	Resistencia uniaxial a la compresión, cohesión (kg/cm^2).
d_{tc}, d_{ts}	Tiempo de tránsito de la onda compresional y de corte (Microseg/pie).
$dr, d\theta, dz$	Diferenciales de longitud del volumen de control.
E	Módulo de elasticidad de Young (kg/cm^2).
$F_1, F_2, F_3,$ $F_4, F_5.$	Fuerzas aplicadas en el volumen de control en dirección r (kg).
F_{rr}	Fuerza en dirección r (kg).

G	Módulo de compresibilidad (kg/cm^2).
GR	Lectura del registro de Rayos Gamma.
g	Factor gravitacional.
H	Altura.
Jv	Flujo neto de materia a través de una membrana semi-impermeable.
K	Coefficiente de proporcionalidad a la temperatura absoluta.
Kb	Módulo de volumen (kg/cm^2).
Kg	Módulo de grano (kg/cm^2).
Km	Módulo de matriz (kg/cm^2).
k	Constante que depende de las propiedades de la roca.
M	Volumen molar.
m	Constante de conversión, 1.34 E10 si ρ_b es en gr/cm^3 y d_{tc} en mms/pie .
p	Presión hidráulica (kg/cm^2).
P_{nw}	Presión en la cercanía del pozo (kg/cm^2).
P_o	Presión de un fluido con sales disueltas.
P_p	Presión de poro (kg/cm^2).

P_{pf}	Presión alejada del pozo (kg/cm^2).
ppm	Partes por millón de sales disueltas en una solución.
P_w	Presión hidrostática del fluido de perforación (Kg/cm^2).
ΔPh	Presión diferencial entre el fluido de perforación y la presión de poro (kg/cm^2).
$q_{h_{pg}}$	Flujo neto de presión en el poro.
$q\Phi_{cg}$	Flujo neto de potencial químico dentro del poro.
q_n	Flujo neto total dentro del poro de la roca.
R	Constante universal de los gases ($82.060 \text{ cm}^3/\text{mol-g } ^\circ k$).
R	Radio del círculo de mohr.
R, Θ, Z	Componentes de la fuerza másica del volumen de control (kg).
R_{we}	Resistividad de la lutita (mmhos).
R_{wf}	Resistividad del fluido de perforación (mmhos).
r	Radio.
T	Temperatura ($^\circ K$) (Ref. pag. 66).

T_e	Tensión (kg/cm ²) (Ref. pag. 62).
u_x, u_y, u_z	Desplazamiento en dirección x, y, z .
u_x, u_θ, u_z	Desplazamiento en dirección x, θ, z .
x, y, z	Ejes de coordenadas cartesianas.
x', y', z'	Ejes de coordenadas cartesianas, referidas en un marco local.
x_i	Fracción del componente.
V	Volumen molar (cm ³ /mol).
V_{arc}	Factor de proporción del volumen de arcilla.
V_{Mw}	Volumen molar del componente (cm ³ /mol).
V_{Mi}	Volumen molar del componente i (cm ³ /mol).
α	Constante de proporcionalidad. Constante que depende de las propiedades de la roca.
β	Rumbo del pozo en azimuth (°).
γ	Ángulo de inclinación del pozo (°).
ϵ	Deformación (Longitud).
$\epsilon_{rr}, \epsilon_{r\theta}, \epsilon_{rz}$ $\epsilon_{\theta\theta}, \epsilon_{\theta z}, \epsilon_{zz}$	Componentes de deformación en coordenadas cilíndricas.

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$	Componentes de deformación en coordenadas cartesianas
$\epsilon_{xy}, \epsilon_{zy}, \epsilon_{xz}$	
θ	Posición angular alrededor del pozo ($^{\circ}$).
μ	Potencial químico del disolvente (Cal/mol).
μ^0	Potencial químico del disolvente puro (Cal/mol).
ν	Relación de Poisson (Adimensional).
ρ_b	Densidad de la roca (gr/cm^3).
ρ_i	Densidad del componente i (gr/cm^3).
σ	Esfuerzo normal.
$\sigma_x, \sigma_{\theta}, \sigma_z$	Esfuerzos normales en coordenadas cilíndricas (Kg/cm^2).
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Esfuerzos normales en coordenadas cartesianas (Kg/cm^2).
σ'	Esfuerzos normal del criterio de falla de Mohr-Coulomb (Kg/cm^2).
σ_{vert}	Esfuerzo principal vertical (Kg/cm^2).
σ_{H1}, σ_{H2}	Esfuerzos principales horizontales (Kg/cm^2).
σ_1	Esfuerzo principal máximo (Kg/cm^2).
σ_2	Esfuerzo principal intermedio (Kg/cm^2).

σ_3	Esfuerzo principal mínimo (Kg/cm ²).
τ	Esfuerzo tangencial.
$\tau_{Límit}$	Esfuerzo Límite del círculo de Mohr (Kg/cm ²).
τ_{Real}	Esfuerzo real debido a las condiciones (Kg/cm ²).
τ_{ij}	Tensor de esfuerzos.
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Esfuerzos de corte en coordenadas cartesianas (Kg/cm ²).
$\tau_{r\theta}, \tau_{rz}, \tau_{\theta z}$	Esfuerzos de corte en coordenadas cilíndricas (Kg/cm ²).
ϕ	Angulo de fricción interna, característico de cada roca.
ϕ	Función de Airy.
Φ_{csh}	Potencial químico del fluido dentro de la lutita (Cal/mol).
Φ_{cm}	Potencial químico del fluido de perforación (Cal/mol).
$\Delta\Phi$	Diferencial entre el potencial químico del fluido de perforación y el fluido que contiene la roca (Cal/mol).
Σ	Tensor de esfuerzos (Kg/cm ²).

REFERENCIAS:

1. Garcia Valenzuela Carlos Etzael, "Estabilidad Mecánica de pozos Direccionales y Horizontales," Tesis, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1992.
2. Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., "Theory of Elasticity," McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 2nd ed., 1951.
3. Aadnoy, Bent S., "Modeling of the Stability of Highly Inclined Boreholes in Anisotropic Rock Formations", SPE Drilling Engineering, Rogaland U., September 1988, pg. 261.
4. Fairhurst, C., "Methods of Determining In-Situ Rocks Stress at Great Depths," Technical Report No. 1-68 (Missouri River Division, Corps. of Engineers), Minneapolis, Minnesota, February 1968.
5. Aadnoy, B.S., "A Complete Elastic Model for Fluid-Induced and In-Situ Generated Stresses with the Presence of Borehole," Work Paper No. 33, 1987, Rogaland University, Norway., Energy Sources, Vol. 9, pg. 239-259.
6. Fung, Y.C., "A first Course in Continuum Mechanics," Prentice-Hall, Inc., 2nd Edition, Englewood Cliffs, New Jersey, 1977.
7. Bradley, W.B., "Failure of Inclined Borehole," Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, Vol. 101, December 1979, pg. 232-239.
8. Aadnoy, B.S. and Chenevert, M.E., "Stability of Highly Inclined Boreholes," IADC/SPE 16052 Drilling Conference held in New Orleans, LA., March 15-18, 1987, pg. 25-41

9. Mody, F.K. and Hale, A.H., "Borehole-Stability Model to Couple Tehe Mechanics and Chemistry of Drilling-Fluid/Shale Interactions," Shell Development Co. JPT, November 1993.
10. Castellan Gilbert W. "Fisicoquímica," Segunda Edición, Addison-Wesley Iberoamericana, 1987.
11. Kemper, W.D., "Movement of Water as Affected by Free Energy and Pressure Gradients. I. Experimental Analysis of Porous Systems in Which Free Energy and Pressure Gradients Act in Opposite Directions," Proc., Soil Sci. Soc. Amer. (1961) 1141.
12. Hanshaw, B.B. and Zen, E.A., "Osmotic Equilibrium and Overthrust Faulting," GSA Bull. (1965) 76, 1379.
13. Olsen, H.W., "Liquid Movement Through Kaolinite under Hydraulic, Electric, and Osmotic Gradients," AAPG Bull. (1972) 56, No. 10, 2122.
14. Chenevert M.E., "Shale Control With Balanced-Activity Oil-Continuous Muds," SPE 2559, SPE-AIME, Esso Productions Research Co. October 1970.
15. "Manual of Drilling Fluids Technology," NL Baroid/ NL Industries, Inc. 1979.
16. George R. Gray, "Composition and Property of Drilling and Completion Fluid," H.C.H. Darley. V Edition, Cap. 8 página 391.
17. Staverman, A.J., "The Theory of Measurement of Osmotic Pressure," Rec. Trav. Chim. (1951) 70, 344.

18. Bradley, W.B., "Mathematical Concept-Stress Cloud-Can predict Borehole Failure," Oil & Gas J. 72, February 1979.
19. Lamé and Clapeyron, "Memoire Sur L'Equilibre interieur des Corp Solides Homogenes Memoirs Presents par Divers Savans"
20. Bruce, S., Schlumberguer Cambrige Research., "A Mechanical Stability Log", IADC/SPE 19942 Drilling Conference Held Houston, Texas, February 27-March 2, 1990.
21. Goodman, R.E., "Introduction to Rock Machanics," Second Edition, University of California at Berkeley, 1989.
22. Hale, A.H., and Mody, F.K., Shell Development Co., and Salisbury, D.P., O'Brien-Goins-Simpson & Assocs. IADC/SPE 23885, 1992.
23. Schlumberguer, "Principios/Aplicaciones de la interpretación de registros".
24. William D. McCain, Jr., "The Properties of Petroleum Fluids," PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1973.

Apéndice A

Es necesario al iniciar el programa, renombrar el archivo con el nombre del pozo, para tenerlo como referencia.

Al ejecutar el programa, aparece primeramente el "Menú principal", en el cual se tienen 6 opciones. Al usar el programa por primera vez, se introducen los datos seleccionando la alternativa "Agregar Información", y aparecerá la pregunta: "Número de estaciones:", en esta opción se introduce el número de profundidades que se tienen con información, y a continuación aparecerán en la pantalla los siguientes datos que deben de introducirse:

Profundidad vertical(m):
Lectura Sónica Compresional:
Lectura Sónica de Corte:
Densidad de la roca(gr/cm³):
Rayos gamma:
Presión de poro:
Resistividad:

Esta información es guardada en un archivo, y cada vez que se quiera utilizar es necesario llamar al programa con el nombre del archivo.

En caso de modificar ó borrar algún dato, tendrá que hacer referencia a la profundidad vertical, y aparecerán en la pantalla los datos contenidos en dicha profundidad, y preguntará nuevamente los valores, en el mismo orden antes descrito.

Para borrar, también hace referencia a la profundidad vertical, poniendo en pantalla los datos de dicha profundidad, aparecerá la siguiente pregunta:

¿Deseas borrar esta información s/n?

Se tendrá que escoger una de estas dos alternativas. La alternativa "N" ó "n" el programa regresa al menú principal.

La alternativa "Consultar información", mostrará en pantalla toda la información que se introdujo en el archivo de datos. Una vez terminada la consulta se tendrá que oprimir cualquier tecla para regresar al menú principal.

La alternativa "Salir del programa", hará que la sesión se terminé, pero los datos quedarán guardados.

La alternativa "Correr el programa" iniciará la corrida del programa. El programa está dividido en tres partes, una que corresponde al archivo, la siguiente calcula la densidad máxima y mínima y la última parte dará los resultados de las concentraciones máximas y mínimas de sal, para mantener el pozo en condiciones estables.

La primera parte, requiere tener toda la información de registros mencionadas anteriormente. Para la segunda, el programa requerirá la siguiente información:

Datos direccionales:

Azimut del pozo (°).

Ángulo del pozo (°).

Datos de la formación:

Ángulo de fricción interna ($^{\circ}$).

A continuación, aparecen las profundidades junto con las densidades calculadas y otros parámetros, como son el módulo de Young, Cohesión, etc., esta información también saldrá por la impresora.

A continuación, correrá la tercera parte, en la que se requieren los siguientes datos:

Datos del fluido de la formación:

Actividad química del fluido de perforación.

Datos del fluido de perforación:

Densidad del lodo.

Tipo de salmuera, elige una opción:

- 1.- Base Cloruro de Sodio.
- 2.- Base Cloruro de Calcio.
- 3.- Base cloruro de Potasio

Aparecerán en la pantalla los resultados de salinidad máxima y mínima, con referencia a cada estación o profundidad, también dicha información se mandará a la impresora.

A continuación, se tiene el listado del programa de cómputo escrito en el lenguaje Q-Basic.

ENTRADA AL BLOQUE A

INTRODUCCIÓN DE DATOS AL ARCHIVO PRINCIPAL

```
OPEN "R", #1, "NOMBRE.DAT", 22
FIELD #1, 2 AS EST$, 2 AS PV$, 2 AS DTC$, 2 AS DTSS$, 4
      AS RHOBS$, 2 AS RAYG$, 2 AS PPOROS$, 4 AS RES$
CLS
10 CLS

DIM EST(200), PV(200), DTC(200), DTS(200), RHOB(200),
      RAYG(200), PPORO(200), RES(200)

LOCATE 2, 20: COLOR 2, 0: PRINT "MENU PRINCIPAL"
LOCATE 4, 20: COLOR 0, 2: PRINT "A"; : COLOR 7, 0:
      PRINT "AGREGAR INFORMACIÓN"
LOCATE 6, 20: COLOR 0, 2: PRINT "C"; : COLOR 7, 0:
      PRINT "CONSULTAR ARCHIVO DE DATOS"
LOCATE 8, 20: COLOR 0, 2: PRINT "B"; : COLOR 7, 0:
      PRINT "BORRAR INFORMACIÓN"
LOCATE 10, 20: COLOR 0, 2: PRINT "M"; : COLOR 7, 0:
      PRINT "MODIFICAR INFORMACIÓN"
LOCATE 12, 20: COLOR 0, 2: PRINT "R"; : COLOR 7, 0:
      PRINT "CORRER EL PROGRAMA"
LOCATE 14, 20: COLOR 0, 2: PRINT "F"; : COLOR 7, 0:
      PRINT "FIN SALIR DEL PROGRAMA"
LOCATE 18, 20: INPUT "OPCIÓN:"; QS

IF QS = "A" OR QS = "a" THEN 300
IF QS = "C" OR QS = "c" THEN 500
IF QS = "M" OR QS = "m" THEN 700
IF QS = "B" OR QS = "b" THEN 900
IF QS = "R" OR QS = "r" THEN 1200
IF QS = "F" OR QS = "f" THEN CLOSE #1: END
```

GOTO 10

300 'AGREGAR INFORMACIÓN

INPUT "DAME EL NÚMERO DE ESTACIONES:"; EST

FOR X = 1 TO EST

INPUT "PROFUNDIDAD VERTICAL (m):"; PV(X)

INPUT "LECTURA SÓNICA COMPRESIONAL:"; DTC(X)

INPUT "LECTURA SÓNICA DE CORTE:"; DTS(X)

INPUT "DENSIDAD DE LA ROCA:"; RHOB(X)

INPUT "RAYOS GAMMA:"; RAYG(X)

INPUT "PRESIÓN DE PORO:"; PPRO(X)

INPUT "RESISTIVIDAD:"; RES(X)

LSET EST\$ = MKI\$(EST)

LSET PV\$ = MKI\$(PV)

LSET DTC\$ = MKI\$(DTC)

LSET DTSS\$ = MKI\$(DTS)

LSET RHOB\$ = MKS\$(RHOB)

LSET RAYG\$ = MKI\$(RAYG)

LSET PPRO\$ = MKI\$(PPRO)

LSET RES\$ = MKS\$(RES)

U = LOT(1) / 22 + 1

PUT #1, U

NEXT X

GOTO 10

500 'CONSULTAR INFORMACIÓN

CLS

LOCATE 1, 10: PRINT "EST. PROF. DTS DTC RHOB RAYG
PPRO RES"

U = LOF(1) / 22

FOR B = 1 TO U

GET #1, B

LOCATE 1 + B, 10 PRINT B

LOCATE 1 + B, 14 PRINT CVI(PV\$)

LOCATE 1 + B, 20 PRINT CVI(DTSS\$)


```

LOCATE 1 + B, 24 PRINT CVI(DTC$)
LOCATE 1 + B, 28 PRINT CVS(RHOBS)
LOCATE 1 + B, 34 PRINT CVI(RAYGS)
LOCATE 1 + B, 39 PRINT CVI(PPOROS)
LOCATE 1 + B, 46 PRINT CVI(RESS)
NEX B
INPUT "OPRIME CUALQUIER TECLA:"; Z$
GOTO 10

700 'MODIFICAR INFORMACIÓN
INPUT "PROFUNDIDAD A MODIFICAR:"; D
U = LOF(1) / 22
FOR B = 1 TO U
  GET #1, B
  IF D = CVI(PVS) THEN GOSUB 1000
NEXT B
GOTO 10

1000 'SUBPROGRAMA DE CAMBIOS
PRINT B; CVI(PVS); CVI(DTSS); CVI(DTC$); CVS(RHOBS);
  CVI(RAYGS); CVI(PPOROS); CVS(RESS)
INPUT "PROFUNDIDAD VERTICAL (m):"; PV1
INPUT "LECTURA SÓNICA COMPRESIONAL:"; DTC1
INPUT "LECTURA SÓNICA DE CORTE:"; DTS1
INPUT "DENSIDAD DE LA ROCA:"; RHO1
INPUT "RAYOS GAMMA:"; RAY1
INPUT "PRESIÓN DE PORO:"; PPO1
INPUT "RESISTIVIDAD:"; RES1
LSET PVS = MKIS(PV1)
LSET DTC$ = MKIS(DTC1)
LSET DTSS = MKIS(DTS1)
LSET RHOBS = MKSS(RHO1)
LSET RAYGS = MKIS(RAY1)
LSET PPOROS = MKIS(PPO1)
LSET RESS = MKSS(RES1)

```

```

PUT #1, B
RETURN

```

```

900 MARCA DE BORRAR *
INPUT "PROFUNDIDAD DEL REGISTRO A BORRAR:"; D
U = LOF(1) / 22
FOR Y = 1 TO U
    GET #1, Y
    IF D = CVI(PV$) THEN GOSUB 1500
NEXT Y
GOTO 100

```

```

1500 SUBPROGRAMA DE BORRADO LÓGICO CON *
PRINT CVI(PV$); CVI(DTSS); CVI(DTCS); CVS(RHOB$);
CVI(RAYG$); CVI(PPOROS); CVS(RESS)
INPUT "DESEAS BORRAR ESTOS DATOS:"; RRS$
IF RRS$ = "N" OR "n" THEN GOTO 10
W$ = "*" + PV$
LSET PV$ = W$
PUT #1, Y
RETURN

```

```

100 BORRADO DEFINITIVO
CREACIÓN DE UN ARCHIVO TEMPORAL.DAT PARA COPIAR LOS
REGISTROS BUENOS
OPEN "R", #2, "TEMPORAL.DAT", 22
FIELD #2, 2 AS EST2$, 2 AS PV2$, 2 AS DTC2$, 2 AS
DTS2$, 4 AS RHOB2$, 2 AS RAYG2$, 2 AS PPOR2$, 2 AS
RES2$
U = LOF(1) / 22
FOR T = 1 TO U
    GET #1, T
    IF LEFT$(PV$, 1) = "*" THEN 410 NO LO GRAVES
    E = CVI(EST$)
    F = CVI(PV$)

```

```
G = CVI (DTC$)
H = CVI (DTSS$)
I = CVS (RHOB$)
J = CVI (RAYG$)
K = CVI (PPORO$)
L = CVS (RES$)
```

```
PRINT "ESPERA UNOS SEGUNDOS....."
```

```
'PASA LOS DATOS DE LAS VARIABLES A MEMORIA INTERMEDIA PARA
'EL ARCHIVO 2
```

```
LSET EST2$ = MKI$(E)
LSET PV2$ = MKI$(F)
LSET DTC2$ = MKI$(G)
LSET DTS2$ = MKI$(H)
LSET RHOB2$ = MKS$(I)
LSET RAYG2$ = MKI$(J)
LSET PPORO2$ = MKI$(K)
LSET RES2$ = MKS$(L)
U = LOT(2) / 22 + 1
PUT #2, P
```

```
410 'BRINCO
```

```
NEXT T
```

```
CLOSE
```

```
'BORRA EL ARCHIVO ORIGINAL
```

```
KILL "NOMBRE.DAT"
```

```
'RENOMBRA EL ARCHIVO TEMPORAL CON EL NOMBRE ORIGINAL
```

```
NAME "TEMPORAL.DAT" AS "NOMBRE.DAT"
```

```
OPEN "R", 1, "ESTAB1.DAT", 22
```

```
FIELD #1, 2 AS EST$, 2 AS PV$, 2 AS DTC$, 2 AS DTSS$, 4
AS RHOB$, 2 AS RAYG$, 2 AS PPORO$, 4 AS RES$
```

```
CLS
```

```
GOTO 10
```

ENTRADA AL BLOQUE B

1200 CLS

PRINT

PRINT "DATOS DIRECCIONALES"

INPUT "RUMBO DEL POZO EN AZIMUT:"; AZIMUT

INPUT "ANGULO DEL POZO:"; ANG

PRINT

PRINT "DATOS DE LA FORMACIÓN"

INPUT "ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LA LUTITA:"; FHI1

FHI = FHI1 * 3.1416 / 180

GAMMA = ANG * 3.1416 / 180

BHETA = AZIMUT * 3.1416 / 180

DIM RAYG1(100), RAY2(100), SIGMA(100), SIGEST(100),
 GSOB(100), POISSON(100), ESFVERT(100), ESFHOR(100),
 ESFX(100), ESFY(100), ESFZ(100), THAUZY(100),
 THAUZX(100), THAUXY(100), ESFR(100), ESFT(100),
 ESFZZ(10), THAURT(100), THAURZ(100), THAUTZ(100),
 PRIN1(100), PRIN2(100), PRIN3(100), MAX(100),
 MIN(100), T(100), AWF(100), AP(100), YOUNG(100),
 RIG(100), KB(100), CB(100), CO(100), VARC(100),
 A1(100), M(100), ESFNOR(100), ESFLIM1(100),
 CORR(100), ESFLIM2(100), YOUNG1(100)

155 CONTINUA CON EL PROGRAMA

CLS

SELECCIÓN DE EL VALOR MÁXIMO Y MÍNIMO DE LAS LECTURAS DE
 RAYOS GAMMA

K = LOF(1) / 22

FOR X = 1 TO K

```

GET #1, X
RAYG(X) = CVI(RAYG$)
IF X = 1 THEN THEN RAYG1 = RAYG(X)
IF RAYG1 < RAYG(X) THEN GOTO 30
RAYG1 = RAYG(X)
30 CONTINUA
IF RAYG(X) > RAYG2 THEN RAYG2 = RAYG(X)

```

```

NEXT X

```

```

PRINT "ÁNGULO DEL POZO:"; ANG: PRINT "AZIMUT:"; AZIMUT:
PRINT "ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA:"; PHI1
LPRINT "ÁNGULO DEL POZO:"; ANG: PRINT "AZIMUT:"; AZIMUT:
PLPRINT "ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA:"; PHI1

```

```

PRINT "PROF. DEN PRIN1 PRIN2 PRIN3 YOUNG KB CO"
LPRINT "PROF. DEN PRIN1 PRIN2 PRIN3 YOUNG KB CO"

```

CÁLCULOS

```

K = LOF(1) / 22
FOR X = 1 TO K
  GET #1, X
  EST(X) = CVI(EST$)
  PV(X) = CVI(PV$)
  DTC(X) = CVI(DTC$)
  DTS(X) = CVI(DTS$)
  RHOB(X) = CVS(RHOB$)
  RAYG(X) = CV(RAYG$)
  PPRO(X) = CVI(PPRO$)

  POISSON(X) = (0.5 + (DTS(X) / DTC(X))^2 - 1) / ((DTS(X)
    / DTC(X))^2 - 1)

```

CICLO PARA CÁLCULAR LA DENSIDAD ÓPTIMA

FOR DEN = 0.5 TO 2.5 STEP 0.001

GRADIENTE DE SOBRECARGA

SIGMA(1) = PV(1) * RHOB(X) / 10

SIGEST(1) = SIGMA(1)

GSOB(1) = SIGEST(1) / PV(1)

IF X = 1 THEN GOTO 25

SIGMA(X) = ((PV(X) - PV(X - 1)) * RHOB(X) / 10)

SIGEST(X) = SIGEST(X - 1) + SIGMA(X)

GSOB(X) = SIGEST(X) / PV(X)

25 BRINCO

ESFUERZO VERTICAL

ESFVERT(X) = GSOB(X) * PV(X)

ESFUERZO HORIZONTAL

$$\text{ESFHOR}(X) = (\text{POISSON}(X) / (1 - \text{POISSON}(X))) * (\text{ESFVERT}(X) - \text{PPORO}(X)) + \text{PPORO}(X)$$

ESFUERZOS TOTALES

$$\text{ESFX}(X) = (\text{ESFHOR}(X) * (\cos(\text{BHETA}))^2 + \text{ESFHOR}(X) * (\sin(\text{BHETA}))^2 * (\cos(\text{GAMMA}))^2 + \text{ESFVERT}(X) * (\sin(\text{GAMMA}))^2$$

$$\text{ESFY}(X) = \text{ESFHOR}(X) * (\sin(\text{BHETA}))^2 + \text{ESFHOR}(X) * (\cos(\text{BHETA}))^2$$

$$\text{ESFZ}(X) = (\text{ESFHOR}(X) * (\cos(\text{BHETA}))^2 + \text{ESFHOR}(X) * (\sin(\text{BHETA}))^2 * (\sin(\text{GAMMA}))^2 + \text{ESFVERT}(X) * (\cos(\text{GAMMA}))^2$$

$$\text{THAUZY}(X) = 0.5 * (\text{ESFHOR}(X) - \text{ESFHOR}(X)) * \\ (\text{SIN}(2 * \text{BHETA})) * \text{SIN}(\text{GAMMA})$$

$$\text{THAUZX}(X) = 0.5 * (\text{ESFHOR}(X) * (\text{COS}(\text{BHETA}))^2 + \\ \text{ESFHOR}(X) * (\text{SIN}(\text{BHETA}))^2 - \text{ESFVERT}(X)) * \\ \text{SIN}(2 * \text{GAMMA})$$

$$\text{THAUXY}(X) = 0.5 * (\text{ESFHOR}(X) - \text{ESFHOR}(X)) * \\ (\text{SIN}(2 * \text{BHETA})) * \text{COS}(\text{GAMMA})$$

ESFUERZOS EN LA PARED DEL POZO

$$\text{ESFR}(X) = \text{DEN} * \text{PV}(X) / 10$$

$$\text{ESFT}(X) = (\text{ESFX}(X) + \text{ESFY}(X) - \text{DEN} * \text{PV}(X) / 10) - \\ 2 * (\text{ESFX}(X) - \text{ESFY}(X)) * \text{COS}(2 * 1.5707963) - \\ 4 * \text{THAUXY}(X) * \text{SIN}(2 * 1.5707963)$$

$$\text{ESFZZ}(X) = \text{ESFZ}(X) - 2 * \text{POISSON}(X) * (\text{ESFX}(X) - \\ \text{ESFY}(X)) * \text{COS}(2 * 1.5707963) - 4 * \text{POISSON}(X) \\ * \text{THAUXY}(X) * \text{SIN}(2 * 1.5707963)$$

$$\text{THAURT}(X) = 0$$

$$\text{THAURZ}(X) = 0$$

$$\text{THAUTZ}(X) = 2 * (\text{THAUZY}(X) * \text{COS}(1.5707963) - \text{THAUZX}(X) \\ * \text{SIN}(1.5707963))$$

ESFUERZOS PRINCIPALES EN LA PARED DEL POZO

$$\text{PRIN1} = \text{ESFR}(X)$$

$$\text{PRIN2} = 0.5 * (\text{ESFT}(X) + \text{ESFZZ}(X)) + 0.5 * ((\text{ESFT}(X) -$$

$$ESFZZ(X)^2 + 4 * THAUTZ(X)^2)^{(1 / 2)}$$

$$PRIN3 = 0.5 * (ESF(X) + ESFZZ(X)) - 0.5 * ((ESFT(X) - ESFZZ(X))^2 + 4 * THAUTZ(X)^2)^{(1 / 2)}$$

SELECCIÓN DEL ESFUERZO MÁXIMO Y MÍNIMO

```

IF PRIN1 > PRIN2 THEN 4000 ELSE 4100
4000 IF PRIN2 > PRIN3 THEN MAX = PRIN1: MIN = PRIN3:
GOTO 4300
IF PRIN1 > PRIN3 THEN THEN MAX = PRIN1: MIN = PRIN2:
GOTO 4300
MAX = PRIN3
MIN = PRIN2
GOTO 4300

4100 IF PRIN3 > PRIN2 THEN MAX = PRIN3: MIN = PRIN1:
GOTO 4300
IF PRIN1 > PRIN3 THEN MAX = PRIN2: MIN = PRIN3:
GOTO 4300
MAX = PRIN2
MIN = PRIN1
GOTO 4300
4300 CONTINUAR

```

CRITERIO DE FALLA

$$YOUNG = 2 * (RHOB(X) / DTS(X)^2) * (1 + POISSON(X))$$

$$RIG = (RHOB(X) / DTS(X)^2)$$

$$KB = RHOB(X) * ((1 / DTS(X)^2) - (4 / (3 * DTS(X)^2)))$$

$$CB = (1 / KB)$$

$$\text{VARC} = (\text{RAYG}(X) - \text{RAYG1}) / (\text{RAYG2} - \text{RAYG1})$$

$$\text{A1} = 2 * \text{COS}(\text{FHI}) / (1 - \text{SIN}(\text{FHI}))$$

$$\text{CO} = ((0.02585 * \text{A1} * \text{YOUNG} * (0.008 * \text{VARC} + 0.0045 * (1 - \text{VARC})) * \text{KB} * ((7.1 * 10^9)^2) / (10^6)) / 14.223$$

$$\text{ESFNOR} = 0.5 * (\text{MAX} + \text{MIN}) - 0.5 * (\text{MAX} - \text{MIN}) * \text{SIN}(\text{FHI}) - \text{PPORO}(X)$$

$$\text{ESFLIM1} = \text{CO} + \text{ESFNOR} * \text{TAN}(\text{FHI})$$

$$\text{ESFLIM2} = 0.5 * (\text{MAX} - \text{MIN}) * \text{COS}(\text{FHI})$$

$$\text{YOUNG1} = \text{YOUNG} * 1.34 * 10^{10}$$

$$\text{KB1} = \text{KB} * 1.34 * 10^{10}$$

```
IF ESFLIM2 - ESFLIM1 > - 0.5 AND ESFLIM2 - ESFLIM1 <
    0.5 THEN PRINT PV(X); DEN; YOUNG1; KB1; LPRINT
    PV(X); DEN; YOUNG1; KB1
```

```
NEXT DEN
```

```
PRINT
```

```
NEXT X
```

```
INPUT "QUIERES REGRESAR AL MENÚ PRINCIPAL (S) O
CONTINUAR (ENTER)."; GS
```

```
IF GS = "S" OR GS = "s" THEN GOTO 10
```

```
PRINT
```

```
PRINT
```

ENTRADA AL BLOQUE C

```
PRINT "DATOS DEL FLUIDO DE LA FORMACIÓN  
INPUT "ACTIVIDAD QUÍMICA DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN:";
```

```
  AWS
```

```
PRINT
```

```
PRINT "DATOS DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN"
```

```
INPUT "DENSIDAD DEL LODO:"; DEN
```

```
PRINT
```

```
PRINT "TIPO DE SALMUERA, ELIGE UNA OPCIÓN:"
```

```
PRINT "1.- BASE CLORURO DE SODIO:"
```

```
PRINT "2.- BASE CLORURO DE CALCIO:"
```

```
PRINT "3.- BASE CLORURO DE POTASIO:"
```

```
INPUT "¿CUAL ES EL TIPO DE SAL?"; OPC
```

```
IF OPC = 1 THEN GOTO 110
```

```
IF OPC = 2 THEN GOSUB 210
```

```
IF OPC = 3 THEN GOSUB 310
```

```
GOTO 400
```

```
PRINT
```

```
400 INPUT "QUIERES REGRESAR AL MENÚ PRINCIPAL (S) O  
CONTINUAR (ENTER):"; G$
```

```
IF G$ = "S" OR G$ = "s" THEN GOTO 10
```

```
GOTO 10
```

110 CÁLCULOS PARA CLORURO DE SODIO

```
K = LOF(1) / 22
```

```
FOR X = 1 TO K
```

```
  GET #1, X
```

$$EST(X) = CVI(EST\$)$$

$$PV(X) = CVI(PV\$)$$

$$DTC(X) = CVI(DTC\$)$$

$$DTS(X) = CVI(DTS\$)$$

$$RHOB(X) = CVS(RHOB\$)$$

$$RAYG(X) = CV(RAYG\$)$$

$$PPORO(X) = CVI(PPORO\$)$$

$$POISSON(X) = (0.5 * (DTS(X) / DTC(X))^2 - 1) / ((DTS(X) / DTC(X))^2 - 1)$$

^CALCULO DE CORRECCIÓN

$$CORR = (1 - 2 * POISSON(X)) / (1 - POISSON(X))$$

^CALCULO DE LA PRESIÓN POR EFECTOS DE ÓSMOSIS

$$R = 84.76798 \text{ "CONSTANTE UNIVERSAL DE LOS GASES}$$

$$T(X) = 28 + PV(X) / 30 + 273$$

$$MNACL = 58.4427$$

FOR A = 1 TO 50 STEP 1

$$AWF(A) = 1 - 0.00451 * A - 0.000199 * (A ^2)$$

$$M(A) = (1 - A / 100) * 18 + (A / 100) * MNACL / 2.16$$

$$AP(A) = CORR * (R * T(X) / M(A)) * LOG(AWF(A) / AWS)$$

^GRADIENTE DE SOBRECARGA

$$SIGMA(1) = PV(1) * RHOB(X) / 10$$

$$SIGEST(1) = SIGMA(1)$$

$$GSOB(1) = SIGEST(1) / PV(1)$$

IF X = 1 THEN GOTO 26

$$SIGMA(X) = ((PV(X) - PV(X - 1)) * RHOB(X) / 10)$$

$$SIGEST(X) = SIGEST(X - 1) + SIGMA(X)$$

$$GSOB(X) = SIGEST(X) / PV(X)$$

26 BRINCO

ESFUERZO VERTICAL

$$ESFVERT(X) = GSOB(X) * PV(X)$$

ESFUERZO HORIZONTAL

$$ESFHOR(A) = (POISSON(X) / (1 - POISSON(X))) * \\ (ESFVERT(X) - (PPORO(X) + AP(A))) + \\ + (PPORO(X) + AP(A))$$

ESFUERZOS TOTALES

$$ESFX(A) = (ESFHOR(A) * (COS(BHETA))^2 + ESFHOR(A) * \\ (SIN(BHETA))^2) * (COS(GAMMA))^2 + \\ ESFVERT(X) * (SIN(GAMMA))^2$$

$$ESFY(A) = ESFHOR(A) * (SIN(BHETA))^2 + ESFHOR(A) \\ * (COS(BHETA))^2$$

$$ESFZ(A) = (ESFHOR(A) * (COS(BHETA))^2 + ESFHOR(A) * \\ (SIN(BHETA))^2) * (SIN(GAMMA))^2 + \\ ESFVERT(X) * (COS(GAMMA))^2$$

$$THAUZY(A) = 0.5 * (ESFHOR(A) - ESFHOR(A)) * \\ (SIN(2 * BHETA)) * SIN(GAMMA)$$

$$THAUZX(A) = 0.5 * (ESFHOR(A) * (COS(BHETA))^2 + \\ ESFHOR(A) * (SIN(BHETA))^2 - ESFVERT(X)) * SIN(2 \\ * GAMMA)$$

$$THAUXY(A) = 0.5 * (ESFHOR(A) - ESFHOR(A)) * \\ (SIN(2 * BHETA)) * COS(GAMMA)$$

ESFUERZOS EN LA PARED DEL POZO

$$ESFR(A) = DEN * PV(X) / 10$$

$$ESFFT(A) = (ESFX(A) + ESFY(A) - DEN * PV(X) / 10) \\ - 2 * (ESFX(A) - ESFY(A)) * COS(2 * 1.5707963) \\ - 4 * THAUXY(A) * SIN(2 * 1.5707963)$$

$$ESFZZ(A) = ESFZ(A) - 2 * POISSON(X) * (ESFX(A) - \\ ESFY(A)) * COS(2 * 1.5707963) - 4 * POISSON(X) \\ * THAUXY(A) * SIN(2 * 1.570796)$$

$$THAURT(A) = 0$$

$$THAURZ(A) = 0$$

$$THAUTZ(A) = 2 * (THAUYZ(A) * COS(1.5707963) -$$

$$THAUXZ(A) * SIN(1.5707963))$$

ESFUERZOS PRINCIPALES EN LA PARED DEL POZO

$$PRIN1 = ESFR(A)$$

$$PRIN2 = 0.5 * (ESFT(A) + ESFZZ(A)) + 0.5 * ((ESFT(A) - \\ ESFZZ(A))^2 + 4 * THAUTZ(A)^2)^(1 / 2)$$

$$PRIN3 = 0.5 * (ESF(A) + ESFZZ(A)) - 0.5 * ((ESFT(A) - \\ ESFZZ(A))^2 + 4 * THAUTZ(A)^2)^(1 / 2)$$

SELECCIÓN DEL ESFUERZO MÁXIMO Y MÍNIMO

```
IF PRIN1 > PRIN2 THEN 4001 ELSE 4101
4001 IF PRIN2 > PRIN3 THEN MAX = PRIN1: MIN = PRIN3:
```

GOTO 4301

IF PRIN1 > PRIN3 THEN THEN MAX = PRIN1: MIN = PRIN2:

GOTO 4301

MAX = PRIN3

MIN = PRIN2

GOTO 4301

4101 IF PRIN3 > PRIN2 THEN MAX = PRIN3: MIN = PRIN1:

GOTO 4301

IF PRIN1 > PRIN3 THEN MAX = PRIN2: MIN = PRIN3:

GOTO 4301

MAX = PRIN2

MIN = PRIN1

GOTO 4301

4301 CONTINUAR

CRITERIO DE FALLA

$$YOUNG = 2 * (RHOB(X) / DTS(X)^2) * (1 + POISSON(X))$$

$$RIG = (RHOB(X) / DTS(X)^2)$$

$$KB = RHOB(X) * ((1 / DTS(X)^2) - (4 / (3 * DTS(X)^2)))$$

$$VARC = (RAYG(X) - RAYG1) / (RAYG2 - RAYG1)$$

$$A1 = 2 * COS(FHI) / (1 - SIN(FHI))$$

$$CO = (0.12585 * A1 + YOUNG * (0.008 * VARC + 0.0045 * (1 - VARC))) * KB * ((7.1 * 10^9)^2) / (10^6) / 14.223$$

CRITERIO DE FALLA DE MOHR-COULOMB

$$ESFNOR = 0.5 * (MAX + MIN) - 0.5 * (MAX - MIN) * \sin(FHI) - PPORO(X)$$

$$ESFLIM1 = CO + ESFNOR * \tan(FHI)$$

$$ESFLIM2 = 0.5 * (MAX - MIN) * \cos(FHI)$$

$$YOUNG1 = YOUNG * 1.34 * 10^{10}$$

$$KB1 = KB * 1.34 * 10^{10}$$

```
IF ESFLIM2 - ESFLIM1 > - 10 AND ESFLIM2 - ESFLIM1 <
10 THEN PRINT PV(X); DEN; YOUNG1; KB1: LPRINT
PV(X); DEN; ESFNOR; ESFLIM1; ESFLIM2
```

```
NEXT A
```

```
NEXT X
```

```
RETURN
```

210 CÁLCULOS PARA CLORURO DE CALCIO

$$K = LOF(1) / 22$$

```
FOR X = 1 TO K
```

```
  GET #1, X
```

$$EST(X) = CVI(EST\$)$$

$$PV(X) = CVI(PV\$)$$

$$DTC(X) = CVI(DTC\$)$$

$$DTS(X) = CVI(DTS\$)$$

$$RHOB(X) = CVS(RHOB\$)$$

$$RAYG(X) = CV(RAYG\$)$$

$$PPORO(X) = CVI(PPORO\$)$$

$$POISSON(X) = (0.5 * (DTS(X) / DTC(X))^{2 - 1}) / ((DTS(X)$$

$$/ DTC(X))^2 - 1)$$

CALCULO DE CORRECCIÓN

$$CORR = (1 - 2 * POISSON(X)) / (1 - POISSON(X))$$

$$R = 84.76798 \text{ CONSTANTE UNIVERSAL DE LOS GASES}$$

$$T(X) = 28 + PV(X) / 30 + 273$$

$$MNAEL = 58.4427$$

FOR A = 1 TO 50 STEP 1

$$AWF(A) = 1 - 0.00065 * A - 0.000438 * (A ^ 2) + \\ + 0.00000281 * (A ^ 3) - 0.0000000268 * \\ * (A ^ 4)$$

$$M(A) = (1 - A / 100) * 18 + (A / 100) * MCACL / \\ 2.16$$

$$AP(A) = CORR * (R * T(X) / M(A)) * LOG(AWF(A) / AWS)$$

GRADIENTE DE SOBRECARGA

$$SIGMA(1) = PV(1) * RHOB(X) / 10$$

$$SIGEST(1) = SIGMA(1)$$

$$GSOB(1) = SIGEST(1) / PV(1)$$

IF X = 1 THEN GOTO 27

$$SIGMA(X) = ((PV(X) - PV(X - 1)) * RHOB(X) / 10)$$

$$SIGEST(X) = SIGEST(X - 1) + SIGMA(X)$$

$$GSOB(X) = SIGEST(X) / PV(X)$$

27 BRINCO

ESFUERZO VERTICAL

$$ESFVERT(X) = GSOB(X) * PV(X)$$

ESFUERZO HORIZONTAL

$$\begin{aligned} \text{ESFHOR}(A) = & (\text{POISSON}(X) / (1 - \text{POISSON}(X))) * \\ & (\text{ESFVERT}(X) - (\text{PPORO}(X) + \text{AP}(A))) + \\ & + (\text{PPORO}(X) + \text{AP}(A)) \end{aligned}$$

ESFUERZOS TOTALES

$$\begin{aligned} \text{ESFX}(A) = & (\text{ESFHOR}(A) * (\text{COS}(\text{BHETA}))^2 + \text{ESFHOR}(A) * \\ & (\text{SIN}(\text{BHETA}))^2) * (\text{COS}(\text{GAMMA}))^2 + \\ & \text{ESFVERT}(X) * (\text{SIN}(\text{GAMMA}))^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ESFY}(A) = & \text{ESFHOR}(A) * (\text{SIN}(\text{BHETA}))^2 + \text{ESFHOR}(A) \\ & * (\text{COS}(\text{BHETA}))^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ESFZ}(A) = & (\text{ESFHOR}(A) * (\text{COS}(\text{BHETA}))^2 + \text{ESFHOR}(A) * \\ & (\text{SIN}(\text{BHETA}))^2) * (\text{SIN}(\text{GAMMA}))^2 + \\ & \text{ESFVERT}(X) * (\text{COS}(\text{GAMMA}))^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{THAUZY}(A) = & 0.5 * (\text{ESFHOR}(A) - \text{ESFHOR}(A)) * \\ & (\text{SIN}(2 * \text{BHETA})) * \text{SIN}(\text{GAMMA}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{THAUZX}(A) = & 0.5 * (\text{ESFHOR}(A) * (\text{COS}(\text{BHETA}))^2 + \\ & \text{ESFHOR}(A) * (\text{SIN}(\text{BHETA}))^2 - \text{ESFVERT}(X)) * \text{SIN}(2 \\ & * \text{GAMMA}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{THAUXY}(A) = & 0.5 * (\text{ESFHOR}(A) - \text{ESFHOR}(A)) * \\ & (\text{SIN}(2 * \text{BHETA})) * \text{COS}(\text{GAMMA}) \end{aligned}$$

ESFUERZOS EN LA PARED DEL POZO

$$\text{ESFR}(A) = \text{DEN} * \text{PV}(X) / 10$$

$$\begin{aligned} \text{ESFPT}(A) = & (\text{ESFX}(A) + \text{ESFY}(A) - \text{DEN} * \text{PV}(X) / 10) \\ & - 2 * (\text{ESFX}(A) - \text{ESFY}(A)) * \text{COS}(2 * 1.5707963) \\ & - 4 * \text{THAUXY}(A) * \text{SIN}(2 * 1.5707963) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ESFZZ}(A) = & \text{ESFZ}(A) - 2 * \text{POISSON}(X) * (\text{ESFX}(A) - \\ & \text{ESFY}(A)) * \text{COS}(2 * 1.5707963) - 4 * \text{POISSON}(X) \\ & * \text{THAUXY}(A) * \text{SIN}(2 * 1.570796) \end{aligned}$$

$$\text{THAURT}(A) = 0$$

$$\text{THAURZ}(A) = 0$$

$$\text{THAUTZ}(A) = 2 * (\text{THAUYZ}(A) * \text{COS}(1.5707963) -$$

$$\text{THAUXZ}(A) * \text{SIN}(1.5707963))$$

ESFUERZOS PRINCIPALES EN LA PARED DEL POZO

$$\text{PRIN1} = \text{ESFR}(A)$$

$$\text{PRIN2} = 0.5 * (\text{ESFT}(A) + \text{ESFZZ}(A)) + 0.5 * ((\text{ESFT}(A) - \text{ESFZZ}(A))^2 + 4 * \text{THAUTZ}(A)^2)^{(1 / 2)}$$

$$\text{PRIN3} = 0.5 * (\text{ESF}(A) + \text{ESFZZ}(A)) - 0.5 * ((\text{ESFT}(A) - \text{ESFZZ}(A))^2 + 4 * \text{THAUTZ}(A)^2)^{(1 / 2)}$$

SELECCIÓN DEL ESFUERZO MÁXIMO Y MÍNIMO

```
IF PRIN1 > PRIN2 THEN 5001 ELSE 5101
```

```
5001 IF PRIN2 > PRIN3 THEN MAX = PRIN1: MIN = PRIN3:
```

```
GOTO 5301
```

```
IF PRIN1 > PRIN3 THEN THEN MAX = PRIN1: MIN = PRIN2:
```

```
GOTO 5301
```

```
MAX = PRIN3
```

```
MIN = PRIN2
```

```
GOTO 5301
```

```
5101 IF PRIN3 > PRIN2 THEN MAX = PRIN3: MIN = PRIN1:
```

```
GOTO 5301
```

```

IF PRIN1 > PRIN3 THEN MAX = PRIN2: MIN = PRIN3:
GOTO 5301
MAX = PRIN2
MIN = PRIN1
GOTO 5301
5301 CONTINUAR

```

CRITERIO DE FALLA

$$YOUNG = 2 * (RHOB(X) / DTS(X)^2) * (1 + POISSON(X))$$

$$RIG = (RHOB(X) / DTS(X)^2)$$

$$KB = RHOB(X) * (((1 / DTS(X)^2) - (4 / (3 * DTS(X)^2))))$$

$$VARC = (RAYG(X) - RAYG1) / (RAYG2 - RAYG1)$$

$$A1 = 2 * COS(FHI) / (1 - SIN(FHI))$$

$$CO = (0.12585 * A1 * YOUNG * (0.008 * VARC + 0.0045 * (1 - VARC)) * KB * ((7.1 * 10^9)^2) / (10^6) / 14.223$$

CRITERIO DE FALLA DE MOHR-COULOMB

$$ESFNOR = 0.5 * (MAX + MIN) - 0.5 * (MAX - MIN) * SIN(FHI) - PPORO(X)$$

$$ESFLIM1 = CO + ESFNOR * TAN(FHI)$$

$$ESFLIM2 = 0.5 * (MAX - MIN) * COS(FHI)$$

$$YOUNG1 = YOUNG * 1.34 * 10^10$$

KB1 = KB * 1.34 * 10¹⁰

IF ESFLIM2 - ESFLIM1 > - 10 AND ESFLIM2 - ESFLIM1 <
10 THEN PRINT PV(X); DEN; YOUNG1; KB1; LPRINT
PV(X); DEN; ESFNOR; ESFLIM1; ESFLIM2

NEXT A

NEXT X

RETURN

310 CALCULOS PARA CLORURO DE POTASIO

K = LOF(1) / 22

FOR X = 1 TO K

GET #1, X

EST(X) = CVI(EST\$)

PV(X) = CVI(PV\$)

DTC(X) = CVI(DTC\$)

DTS(X) = CVI(DTS\$)

RHOB(X) = CVS(RHOB\$)

RAYG(X) = CV(RAYG\$)

PPORO(X) = CVI(PPORO\$)

$$\text{POISSON}(X) = (0.5 * (\text{DTS}(X) / \text{DTC}(X))^2 - 1) / ((\text{DTS}(X) / \text{DTC}(X))^2 - 1)$$

CALCULO DE CORRECCIÓN

$$\text{CORR} = (1 - 2 * \text{POISSON}(X)) / (1 - \text{POISSON}(X))$$

CALCULO DE LA PRESIÓN POR EFECTOS DE ÓSMOSIS

R = 84.76798 "CONSTANTE UNIVERSAL DE LOS GASES

T(X) = 28 + PV(X) / 30 + 273

MKCL = 58.4427

FOR A = 1 TO 50 STEP 1

AWF(A) = 0.99999 - 0.003444 * A - 0.00009691 *
 *(A ^ 2)

M(A) = (1 - A / 100) * 18 + (A / 100) * MKCL /
 2.16

AP(A) = CORR*(R * T(X) / M(A)) * LOG(AWF(A) / AWS)

GRADIENTE DE SOBRECARGA

SIGMA(1) = PV(1) * RHOB(X) / 10

SIGEST(1) = SIGMA(1)

GSOB(1) = SIGEST(1) / PV(1)

IF X = 1 THEN GOTO 28

SIGMA(X) = ((PV(X) - PV(X - 1)) * RHOB(X) / 10)

SIGEST(X) = SIGEST(X - 1) + SIGMA(X)

GSOB(X) = SIGEST(X) / PV(X)

28 BRINCO

ESFUERZO VERTICAL

ESFVERT(X) = GSOB(X) * PV(X)

ESFUERZO HORIZONTAL

ESFHOR(A) = (POISSON(X) / (1 - POISSON(X))) *
 (ESFVERT(X) - (PPORO(X) + AP(A))) +
 + (PPORO(X) + AP(A))

ESFUERZOS TOTALES

ESFPX(A) = (ESFHOR(A) * (COS(BHETA))^2 + ESFHOR(A) *
 (SIN(BHETA))^2) * (COS(GAMMA))^2 +
 ESFVERT(X) * (SIN(GAMMA))^2

$$ESFY(A) = ESFHOR(A) * (SIN(BHETA))^2 + ESFHOR(A) * (COS(BHETA))^2$$

$$ESFZ(A) = (ESFHOR(A) * (COS(BHETA))^2 + ESFHOR(A) * (SIN(BHETA))^2) * (SIN(GAMMA))^2 + ESFVERT(X) * (COS(GAMMA))^2$$

$$THAUZY(A) = 0.5 * (ESFHOR(A) - ESFHOR(A)) * (SIN(2 * BHETA)) * SIN(GAMMA)$$

$$THAUXZ(A) = 0.5 * (ESFHOR(A) * (COS(BHETA))^2 + ESFHOR(A) * (SIN(BHETA))^2 - ESFVERT(X)) * SIN(2 * GAMMA)$$

$$THAUXY(A) = 0.5 * (ESFHOR(A) - ESFHOR(A)) * (SIN(2 * BHETA)) * COS(GAMMA)$$

ESFUERZOS EN LA PARED DEL POZO

$$ESFR(A) = DEN * PV(X) / 10$$

$$ESFFT(A) = (ESFX(A) + ESFY(A) - DEN * PV(X) / 10) - 2 * (ESFX(A) - ESFY(A)) * COS(2 * 1.5707963) - 4 * THAUXY(A) * SIN(2 * 1.5707963)$$

$$ESFZZ(A) = ESFZ(A) - 2 * POISSON(X) * (ESFX(A) - ESFY(A)) * COS(2 * 1.5707963) - 4 * POISSON(X) * THAUXY(A) * SIN(2 * 1.5707963)$$

$$THAURT(A) = 0$$

$$THAURZ(A) = 0$$

$$THAUTZ(A) = 2 * (THAUZY(A) * COS(1.5707963) -$$

THAUXZ(A) * SIN(1.5707963))

ESFUERZOS PRINCIPALES EN LA PARED DEL POZO

PRIN1 = ESFR(A)

PRIN2 = 0.5 * (ESFT(A) + ESFZZ(A)) + 0.5 * ((ESFT(A) -
ESFZZ(A))^2 + 4 * THAUTZ(A)^2)^(1 / 2)

PRIN3 = 0.5 * (ESF(A) + ESFZZ(A)) - 0.5 * ((ESFT(A) -
ESFZZ(A))^2 + 4 * THAUTZ(A)^2)^(1 / 2)

SELECCIÓN DEL ESFUERZO MÁXIMO Y MÍNIMO

IF PRIN1 > PRIN2 THEN 6001 ELSE 6101

6001 IF PRIN2 > PRIN3 THEN MAX = PRIN1: MIN = PRIN3:

GOTO 6301

IF PRIN1 > PRIN3 THEN THEN MAX = PRIN1: MIN = PRIN2:

GOTO 6301

MAX = PRIN3

MIN = PRIN2

GOTO 6301

6101 IF PRIN3 > PRIN2 THEN MAX = PRIN3: MIN = PRIN1:

GOTO 6301

IF PRIN1 > PRIN3 THEN MAX = PRIN2: MIN = PRIN3:

GOTO 6301

MAX = PRIN2

MIN = PRIN1

GOTO 6301

6301 CONTINUAR

CRITERIO DE FALLA

YOUNG = 2 * (RHOB(X) / DTS(X)^2) * (1 +
POISSON(X))

$$RIG = (RHOB(X) / DTS(X)^2)$$

$$KB = RHOB(X) * ((1 / DTS(X)^2) - (4 / (3 * DTS(X)^2)))$$

$$VARC = (RAYG(X) - RAYG1) / (RAYG2 - RAYG1)$$

$$A1 = 2 * COS(FHI) / (1 - SIN(FHI))$$

$$CO = (0.12585 * A1 * YOUNG * (0.008 * VARC + 0.0045 * (1 - VARC))) * KB * ((7.1 * 10^9)^2) / (10^6) / 14.223$$

CRITERIO DE FALLA DE MOHR-COULOMB

$$ESFNOR = 0.5 * (MAX + MIN) - 0.5 * (MAX - MIN) * SIN(FHI) - PPORO(X)$$

$$ESFLIM1 = CO + ESFNOR * TAN(FHI)$$

$$ESFLIM2 = 0.5 * (MAX - MIN) * COS(FHI)$$

$$YOUNG1 = YOUNG * 1.34 * 10^10$$

$$KB1 = KB * 1.34 * 10^10$$

BLOQUE DE IMPRESIÓN

NEXT A

NEXT X

RETURN