



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

METODOLOGIA PARA ESTIMAR PROPIEDADES
MECANICAS DE LAS ROCAS A PARTIR DE
REGISTROS GEOFISICOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A
SILVIA CLEMENTE ARROYO

DIRECTOR DE TESIS: DR. DANIEL GARCIA GAVITO



MEXICO, D. F.

2000



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION
60-I-639

SRITA. SILVIA CLEMENTE ARROYO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Daniel García Gavito y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

METODOLOGIA PARA ESTIMAR PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ROCAS A PARTIR DE REGISTROS GEOFISICOS

- I INTRODUCCION**
- II ANTECEDENTES**
- III CONCEPTOS FUNDAMENTALES**
- IV DESARROLLO DEL SISTEMA PARA EL CALCULO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LAS ROCAS**
- V ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS**
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 19 de mayo de 2000
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

pp

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Metodología para estimar propiedades mecánicas de las rocas a partir de registros geofísicos

Tesis presentada por:

Silvia Clemente Arroyo

Dirigida por:

Dr. Daniel García Gavito

Jurado del examen profesional:

Presidente	Ing. Salvador Macías Herrera
Vocal	Dr. Daniel García Gavito
Secretario	M.I. Joaquín Mendiola Sánchez
1er. Suplente	Ing. Norma Araceli García Muñoz
2do. Suplente	M.I. Maximino Meza Meza

The image shows handwritten signatures of the jury members on a form with horizontal lines. From top to bottom, the signatures are: Salvador Macías Herrera, Daniel García Gavito, Joaquín Mendiola Sánchez, Norma Araceli García Muñoz, and Maximino Meza Meza. The signature of Maximino Meza Meza is circled.

CONTENIDO

CONTENIDO	i
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	3
CAPÍTULO III. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	
III.1 TRANSMISIÓN DE ONDAS	10
III.1.1 La ecuación de onda	10
III.1.2 Ondas P y S	12
III.1.3 Velocidades del sonido en la roca	14
III.2 REGISTROS GEOFÍSICOS	17
III.2.1 Registro sísmico	17
III.2.1.1 Registro dipolar de cizallamiento por imágenes	18
III.2.2 Registro de densidad	19
III.2.3 Registro neutrón	20
III.2.4 Registro de rayos gamma	21
III.3 MÓDULOS ELASTO-DINÁMICOS DE LA ROCA	21
III.3.1 Constante elástica de Lamé	21
III.3.2 Módulo de corte	21
III.3.3 Módulo volumétrico	22
III.3.4 Módulo de Young	23
III.3.5 Relación de Poisson	24
III.4 CRITERIO DE MOHR-COULOMB	25
CAPÍTULO IV. DESARROLLO DEL SISTEMA PARA EL CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS	
IV.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRÁNSITO DE CIZALLAMIENTO A PARTIR DE REGISTROS GEOFÍSICOS	30
IV.1.1 Determinación del tiempo de tránsito de cizallamiento cuando este presente una sola litología en la formación	30
IV.1.2 Determinación del tiempo de tránsito de cizallamiento cuando están presentes dos o más litologías en la formación	32

IV.2	DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS ELASTO-DINÁMICOS DE LAS ROCAS	33
IV.3	DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS DE FALLA DE LAS ROCAS	34
IV.4	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS	35
IV.5	EJEMPLO DE APLICACIÓN	38

CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

V.1	RESULTADOS DE LOS MÓDULOS ELASTO-DINÁMICOS DE LAS ROCAS	46
V.1.1	Módulo de Young y constante elástica de Lamé	46
V.1.2	Módulo de corte y módulo volumétrico	48
V.1.3	Relación de Poisson	49
V.2	RESULTADOS DE LOS MÓDULOS DE FALLA DE LAS ROCAS	61
V.2.1	Resistencia a la compresión uniaxial	61
V.2.2	Cohesión y resistencia a la tracción	61
V.2.3	Ángulo de fricción interna	63

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APÉNDICE		
APÉNDICE A		69
APÉNDICE B		72
APÉNDICE C		74
APÉNDICE D		76

BIBLIOGRAFÍA

81

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La evaluación de las propiedades mecánicas de las rocas y la magnitud de los esfuerzos que actúan sobre la formación antes y durante la perforación permite tener un mayor control del pozo para evitar los problemas que se presenten durante la perforación, tales como:

- ◆ Inestabilidad del pozo
- ◆ Falla en las tuberías de revestimiento y de perforación
- ◆ Perdidas de circulación
- ◆ Arenamiento del pozo
- ◆ Fracturamiento de la formación
- ◆ Pérdida del pozo

La evaluación de las propiedades mecánicas de las rocas se han hecho con métodos sofisticados lo que representa una gran inversión dentro de la ingeniería petrolera por lo que raramente se utilizan, por tal motivo en este trabajo se presentará una metodología práctica para determinar las propiedades mecánicas de la roca a partir de los registros geofísicos que usualmente están disponibles en el campo.

Las propiedades mecánicas de las rocas que determina la metodología, son:

- ◆ Módulos elasto-dinámicos: constante elástica de Lamé (λ), módulo de corte (G), módulo volumétrico (K), módulo de Young (E) y relación de Poisson (ν).
- ◆ Módulos de falla: resistencia a la compresión uniaxial (C_o), ángulo de fricción interna (Φ), cohesión (S_o) y resistencia a la tracción (T_o).

Esta metodología se establece a partir del método de Mason⁽⁹⁾ y la información requerida para estimar dichas propiedades es: tiempo de tránsito de compresional (Δt_c), densidad (RHO_B), volumen de roca (V_r) y porosidad (ϕ).

Con la información de la litología presente en la formación se toma el procedimiento a seguir de acuerdo con el método de Mason⁽⁹⁾ y se determina el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s), posteriormente se estiman los módulos elasto-dinámicos y con la correlación de Brie⁽⁴⁾ se calculan los módulos de falla.

En el Capítulo II se presentan algunos estudios que recientemente realizaron instituciones sobre la mecánica de rocas y las aplicaciones que han obtenido de los trabajos.

En el Capítulo III se establecen los conceptos fundamentales para la realización de este trabajo. La transmisión de ondas es el principio del funcionamiento de las herramientas de los registros sísmicos, con estos registros se estiman las propiedades físicas que se requieren para la estimación de las propiedades mecánicas. Serán descritos brevemente los módulos elasto-dinámicos y se enunciará el círculo de Mohr-Coulomb, ya que las propiedades de falla se basan en él.

Para fines de este trabajo se desarrolló y programó un sistema en una hoja de cálculo en Excel para determinar las propiedades mecánicas (módulos elasto-dinámicos y de falla) a partir de la información de los registros geofísicos mediante el método de Mason⁽⁹⁾ (Capítulo IV).

En el Capítulo V se analizan y discuten los resultados obtenidos de los gráficos que se elaboraron con los parámetros mecánicos contra la profundidad; para llevar a cabo el análisis se tomaron tablas que relacionan la litología con las propiedades mecánicas y esto se hizo con la finalidad de darle una aplicación a los resultados arrojados por la metodología.

Por último, se presentan las conclusiones que surgen del trabajo y posteriormente se hacen algunas recomendaciones para darle validez y utilidad a dicha metodología (Capítulo VI).

CAPÍTULO II ANTECEDENTES

Los estudios de mecánica de rocas aplicados a las áreas de la ingeniería petrolera han proporcionado métodos para la obtención de información referente a las propiedades mecánicas de las rocas.

La evaluación de las propiedades mecánicas permite caracterizar el comportamiento elástico de la roca, por lo que la compañía Schlumberger⁽¹⁾ desarrolló un procesado de registros llamado IMPACT (Integrated Mechanical Properties Analysis Computation Technique) para cuantificar dichas propiedades.

La información requerida en el procesado de registros IMPACT para cuantificar las propiedades mecánicas es:

- ♦ El tiempo de tránsito compresional (Δt_c) y el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s) son medidos mediante el registro dipolar de cizallamiento por imágenes (*DSI*).
- ♦ La densidad (ρ_b) la cual se obtiene a partir de las mediciones que se hacen con el registro de densidad (*LDT*).
- ♦ Volumen de arcilla (V_{ARC}) es calculado mediante la integración del registro de rayos gamma (*GR*), registro neutrón (*CNL*), registro de densidad (*LDT*) y el registro dipolar de cizallamiento por imágenes (*DSI*).

Las propiedades que determina el procesado de registros IMPACT, son:

- ♦ Módulos elasto-dinámicos: módulo de corte (G), módulo volumétrico (K), módulo de Young (E), relación de Poisson (ν) y constante elástica de Lamé (λ).
- ♦ Módulos de falla: cohesión (S_o), resistencia a la tracción (T_o), ángulo de fricción interna (Φ) y resistencia a la compresión uniaxial (C_o).
- ♦ Caracterización y determinación de los esfuerzos que actúan sobre la formación para después de la perforación evaluar los esfuerzos que se generan en la pared del pozo. Los esfuerzos son: esfuerzo vertical (σ_z), esfuerzos horizontales (σ_1, σ_2) y la presión de poro (P_p).

En la Figura 2.1 se muestra el análisis de las propiedades mecánicas con el DSI.

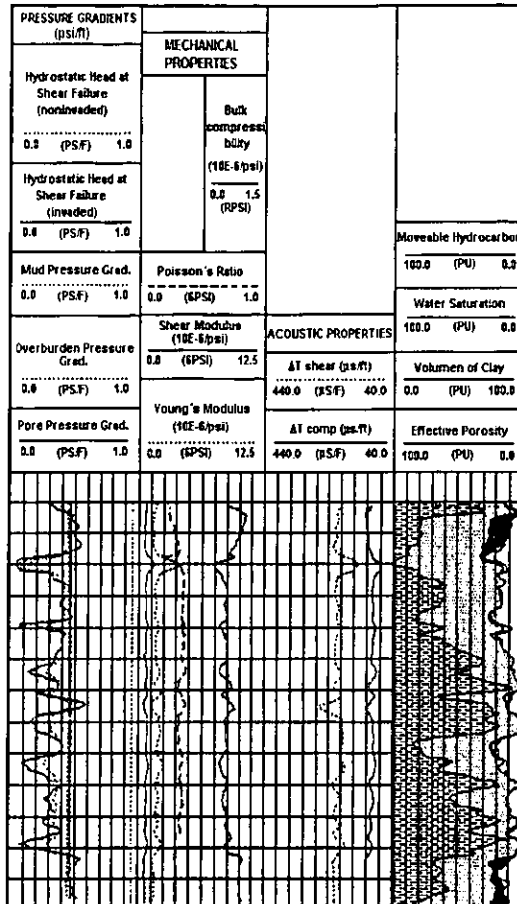


Figura 2.1. Análisis de las propiedades mecánicas con el DSI.

Aplicaciones del procesado de registros IMPACT:

- ◆ Predicción de falla por arenamientos. El procesado de registros permite estimar y predecir el potencial de arenamiento de una formación a partir de la caracterización de los esfuerzos que actúan sobre la formación y la dureza de ésta.
- ◆ Selección de barrenas en la perforación. El procesado de registros IMPACT, mide continuamente la dureza de la formación y a través de correlaciones se realiza la selección óptima de barrenas para la perforación de pozos.
- ◆ Evaluación de la estabilidad del pozo. Se determinan los módulos elasto-dinámicos y los esfuerzos in situ se incorporan al modelo de Mohr-Coulomb

donde se estiman las fallas por tensión y por corte para evaluar la estabilidad del pozo.

La metodología empleada por la compañía se muestra en la Figura 2.2.

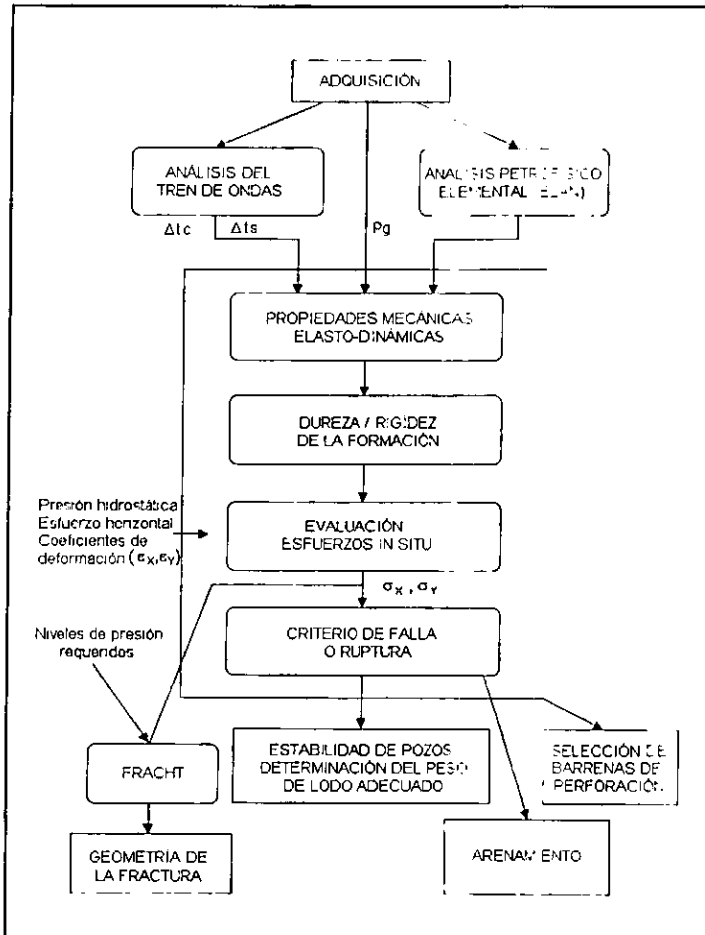


Figura 2.2. Diagrama de flujo operativo del procesado de registros IMPACT.

Las propiedades mecánicas también se obtienen a partir de ensayos experimentales, los cuales son ejecutados en el Instituto de Investigaciones Eléctricas⁽²⁾ dentro del área de Geotermia que cuenta con un laboratorio especializado. Para llevar a cabo este estudio se basó en un sistema modular llamado Simulador Físico de Yacimientos (SFY), el cual está compuesto por varios

componentes modulares que se encuentran integrados en un sistema: servocontroladores electrónicos, dos intensificadores (presión de confinamiento y presión de poro), fuente de potencia hidráulica, estructura de carga hidráulica, vaso de presión, actuador hidráulico servocontrolado, el sistema de presurización, sistema de calentamiento y controlador de temperatura, actuador hidráulico manual, el módulo de permeabilidad, sistema de controles y sistema computarizado (ver Figura 2.3).

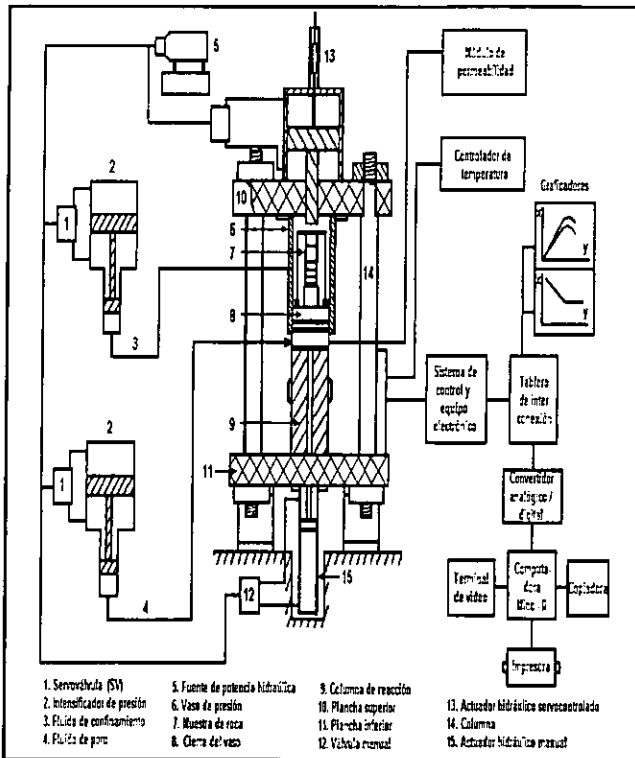


Figura 2.3. Diagrama del Simulador Físico de Yacimientos (SFY).

El SFY tiene capacidad para desarrollar varios tipos de ensayos de comportamiento mecánico, algunos de ellos son: compactación, compresión hidrostática, compresión uniaxial, compresión triaxial, consolidación, deformación biaxial, deformación uniaxial, extensión triaxial, fluencia y relajación. A partir de los datos experimentales de estos ensayos, se obtienen los parámetros que permiten definir el comportamiento mecánico de las rocas: los módulos elásticos, la resistencia mecánica, las características de falla, los volúmenes totales y de poros, la envolvente de falla, el ángulo de fricción, la cohesión, las relaciones constitutivas del material, el

comportamiento general esfuerzo-deformación antes y después de la falla de la roca y los coeficientes de compresibilidad del volumen total.

El SFY mide las velocidades de las ondas P y S, para llevar a cabo la medición de las velocidades de las ondas P y S se utiliza una técnica que se encuentra bajo la designación D 2845-90 de la American Society for Testing and Materials (ASTM, 1990), la cual mide el tiempo que tarda en viajar una onda a través de un material con un espesor conocido. A partir de las velocidades de las ondas P y S se determinan las constantes dinámicas con ecuaciones que se encuentran en función de la velocidad de las ondas P y S para un material elástica-lineal, homogéneo e isotrópico.

La compañía Chevron⁽³⁾ realizó un estudio para la determinación de las propiedades mecánicas basándose en registros geofísicos y tecnología geofísica (sísmica). En su estudio caracterizan volumétricamente las propiedades mecánicas a partir de datos sísmicos (3D), tales como: relación de Poisson, magnitud del esfuerzo horizontal, el gradiente de presión de ruptura del pozo, gradiente de presión de poro y resistencia a la compresión uniaxial. Posteriormente presentan un registro derivado de las estimaciones de las propiedades mecánicas que conducen al desarrollo y al uso mundial de las siguientes aplicaciones:

- ◆ Evaluación de la perforación de la formación para optimizar y ejecutar la predicción.
- ◆ Estabilidad del pozo para alcanzar la extensión y horizontalidad de los pozos.
- ◆ Predicciones de las zonas arcillosas para el diseño de la terminación.
- ◆ Determinación de los esfuerzos de la formación y modelación de las propiedades elásticas para el diseño de la estimulación.

La determinación de las propiedades mecánicas es utilizada para desarrollar aplicaciones dentro de las áreas de la ingeniería petrolera, por tal razón se mencionarán trabajos que fueron recientemente realizados:

La compañía Saga⁽³⁾ da a conocer un trabajo sobre los procedimientos efectivos para la perforación de pozos en un yacimiento depresionado. La hipótesis del trabajo es que un yacimiento depresionado puede ser perforado cuidando la densidad de circulación equivalente (ECD) lo más bajo que sea posible. Esto ha sido aplicado para el uso de lodos de baja densidad y la subpresión del fondo del pozo, el cual se encuentra enfocado sobre la combinación de la limpieza del agujero, bajos gastos de bombeo, evitar repasar el pozo y cuidar la ruptura de la circulación antes que las bombas operen. Adicionalmente el método para reducir el ECD es incrementar el diámetro de la columna del fluido e instalar un liner en lugar de una tubería o perforar agujeros de gran diámetro.

El Instituto Geotécnico Noruego y la Universidad de Wales⁽³⁾ presentan una discusión sobre las decisiones relacionadas para la relación entre el estudio de la mecánica de rocas y la simulación en los yacimientos de hidrocarburos deformables.

El estudio presenta la formulación y la discretización del elemento finito con las ecuaciones de Biot para flujo multifásico en medios porosos deformables. Esto argumenta que la respuesta del estudio de la mecánica de rocas y el flujo multifásico son dos procesos completamente unidos en que los cambios afectan la respuesta de la mecánica de rocas y viceversa, y que los dos procesos ocurren simultáneamente. Las ecuaciones de flujo multifásico son usadas en las simulaciones de yacimientos, demuestran que los simuladores de yacimientos descuidan o simplifican las propiedades mecánicas más importantes que tienen impacto sobre la productividad del yacimiento.

El estudio que realizó Amoco⁽³⁾ fue para improvisar la entrada de la mecánica de rocas para analizar la compactación total del campo y llevar a cabo un modelo de la predicción de la subsidencia para el campo Valhall, los modelos de análisis de la estabilidad del pozo se usan para la planeación de los pozos de alcance extendido en el campo Valhall. El uso de la caracterización de las propiedades mecánicas basándose en muestras, registros y datos sísmicos para la determinación del esfuerzo de sobrecarga es resultado de un entendimiento improvisado de la experiencia en los problemas de perforación en Valhall.

Los investigadores del Instituto de Minas y Tecnología de Nuevo México, la Universidad Nacional de Colombia y la SPE⁽³⁾ desarrollaron un modelo implícito para representar el fenómeno físico que ocurre durante la producción de yacimientos con mecánica de esfuerzos sensibles y propiedades del flujo del fluido. El yacimiento es tratado como un sistema poroelástico multifásico que consiste en una deformación del esqueleto sólido y un fluido compresible en el poro. La deformación elástica no lineal es asumida para ambos campos. Las ecuaciones describen la deformación alrededor del campo, la deformación del esqueleto sólido del yacimiento y la cantidad del fluido del poro son relacionadas completamente. Los resultados de la simulación claramente muestran que la permeabilidad de los yacimientos de sensibles esfuerzos puede tener cambios significativos alrededor de la producción del yacimiento.

Con un modelo para determinar los parámetros mecánicos, la Universidad de Texas en Austin y Mobil⁽³⁾ investigaron el proceso fundamental que controla la propagación de la fractura para explicar la variación del espaciamento y aconsejan cómo desarrollar modelos para planear el espaciamento de la fractura. Además de la discusión de la mecánica de fractura que es desarrollada, ellos discuten sobre los problemas que se presentan en la caracterización del yacimiento.

En su estudio los investigadores de la SPE y del Shell E & P⁽³⁾ presentan los resultados y la verificación del campo, así como la deformación del pozo a gran escala tomando en cuenta el material elasto-plástico; los modelos determinan las propiedades mecánicas del elemento finito de compactación del yacimiento y la relación del daño a la tubería. Los modelos fueron desarrollados en un yacimiento de rocas calcáreas que se encuentra al sur del campo Belridge cerca de Bakersfield, California por un equipo multidisciplinario. Los modelos del elemento finito bidimensional para la escala del campo, la subsidencia en la superficie y el corte

inducido al daño de la tubería, permiten que las presiones de poro sean computadas para 18 días de producción simulada.

La compañía petrolera Phillips⁽³⁾ realizó un estudio sobre el modelo del comportamiento mecánico del yacimiento Ekofisk. Hicieron estudios sobre los yacimientos de calizas en el laboratorio para entender los efectos de la invasión del agua sobre el esfuerzo de la caliza y proveer de datos para los simuladores de yacimientos y utilizan las leyes mecánicas para predecir la compactación del yacimiento y la subsidencia del nivel del mar.

CAPÍTULO III

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

III.1 TRANSMISIÓN DE ONDAS

III.1.1 Ecuación de onda⁽⁴⁾

Para analizar la propagación de onda acústica en un medio continuo, se considera el balance de fuerzas en un elemento pequeño de volumen de roca expuesta a una fuerza variable en el tiempo. Considerando la estabilidad de un elemento pequeño, la fuerza F_x (por unidad de volumen) en la dirección X , está dada como:

$$F_x = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (3.1)$$

Para simplificar, se considera una deformación unidireccional en la dirección X . Se supone que el medio que se estudia es un fluido y que no existen fuerzas de corte ($\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$), la ecuación de equilibrio demanda que la fuerza por unidad de volumen F_x sea balanceada por la fuerza de inercia (masa por aceleración).

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \quad (3.2)$$

donde u es el desplazamiento de la partícula, ρ es la densidad del material y t es el tiempo. En el caso más simple, la relación entre esfuerzo y deformación es lineal, de acuerdo con la Ley de Hooke:

$$\sigma = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.3)$$

donde λ es la constante elástica de Lamé. Combinando las ecuaciones (3.2) y (3.3) se obtiene la siguiente expresión:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

Esta es una ecuación de onda, y la solución es de la siguiente forma:

$$u = u^0 \exp j(\omega t - qx) \quad (3.5)$$

u^0 es la amplitud de la deformación. Para describir la propagación de la onda se usa la exponencial compleja en vez de las funciones seno o coseno, ya que esto es matemáticamente más simple, donde ω es la frecuencia angular relacionada con la señal de la frecuencia f por:

$$\omega = 2\pi f \quad (3.6)$$

q es el número de onda, relacionado con la longitud de la onda Λ por:

$$q = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3.7)$$

La velocidad del sonido v (fase de la velocidad) se puede obtener requiriendo una fase constante en la ecuación (3.5), y está dada por:

$$v = \frac{\omega}{q} \equiv \Lambda f \quad (3.8)$$

Insertando la ecuación (3.5) en la ecuación (3.4), la velocidad del sonido resulta ser:

$$v = \frac{\lambda}{\rho} \quad (3.9)$$

Este simple ejemplo muestra que la velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la constante elástica de Lamé e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del material, este resultado generalmente es válido y provee de bases al uso de las ondas acústicas para determinar las propiedades mecánicas.

La fase de la velocidad definida en la ecuación (3.8), es la velocidad a la cual viaja la fase de la onda. Esta definición asume que la onda acústica tiene una sola longitud de onda y una sola frecuencia, lo cual significa que el tren de onda tiene una duración infinita. En la práctica, sin embargo, las señales son transmitidas en la forma de pulsos de duración finita. La velocidad de un pulso, equivalentemente la energía de la onda, viaja a la llamada velocidad de grupo, definida como:

$$v_{grupos} = \frac{\partial \omega}{\partial q} \quad (3.10)$$

En este simple ejemplo, cuando no hay dispersión (la frecuencia no depende de la velocidad de fase), las velocidades de grupo y de fase son iguales. Sin embargo, para los materiales geológicos, éstas velocidades serán diferentes.

III.1.2 Ondas P y S⁽⁴⁾

Se procede a combinar las ecuaciones (3.1) y (3.2) con la Ley de Hooke para un sólido homogéneo e isotrópico.

Considerando sólo la ecuación para el desplazamiento de una partícula u en la dirección X , se encuentran las siguientes expresiones:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (3.11)$$

ó

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial z} \right) + G \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.12)$$

Se obtienen ecuaciones similares para desplazamientos en las direcciones Y y Z . En general las ecuaciones son acopladas en u , v y w , pero hay dos soluciones directas que pueden ser derivadas de la ecuación (3.12). Para el caso del fluido (ecuación 3.5) se asume que las ecuaciones de las ondas tienen soluciones de la siguiente forma:

$$u = u^0 \exp j(\omega t - qI \cdot \bar{x}) \quad (3.13)$$

El vector \bar{x} tiene componentes en X , Y y Z . I es un vector unitario paralelo a la dirección de la propagación de la onda. Los componentes I_x , I_y y I_z son los cosenos directores del vector de propagación. Primero se busca una solución de la ecuación (3.12) cuando la propagación de la onda es paralela al desplazamiento, esto es, una onda longitudinal (o compresional):

$$u = u^0 \exp j(\omega t - qx) \quad (3.14)$$

Esto significa que $\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0$, y la ecuación (3.12) se reduce a:

$$\rho \omega^2 = q^2 (\lambda + 2G) \quad (3.15)$$

ó

$$v_p = \frac{\lambda + 2G}{\rho} \quad (3.16)$$

donde el subíndice p indica que se trata de la velocidad de una onda compresional o una onda primaria.

Se buscan nuevas soluciones a la ecuación (3.12). Esto es posible estableciendo un modo de movimiento en el cual las partículas son desplazadas sólo en la dirección X ($u \neq 0, v = w = 0$), mientras que la onda de propagación es en la dirección Y ($\partial \partial_x = \partial \partial_z = 0$), esto es:

$$u = u^0 \exp j(\omega t - qy) \tag{3.17}$$

Insertando esta ecuación dentro de la ecuación (3.12), se obtiene:

$$\rho \omega^2 = Gq^2 \tag{3.18}$$

ó

$$v_s = \frac{G}{\rho} \tag{3.19}$$

donde el subíndice s indica que es la solución de la onda secundaria, también llamada onda de cizallamiento. El movimiento combinado de las partículas y de las ondas compresionales y de corte, es ilustrado en la Figura 3.1. Las ecuaciones (3.16) y (3.19) muestran que v_p es siempre más grande que la v_s .

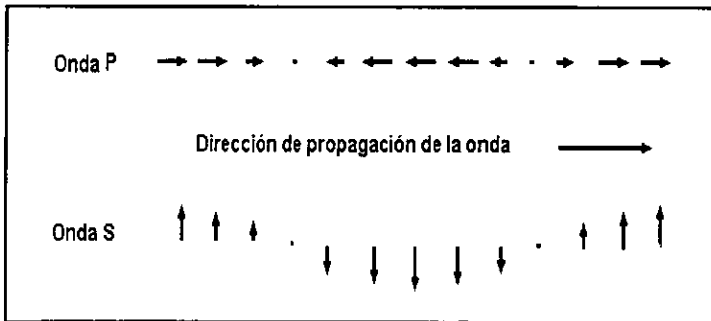


Figura 3.1. El movimiento de la partícula en la propagación de las ondas P y S.

Se pueden expresar los coeficientes elásticos en función de las velocidades del sonido:

$$G = \rho v_s^2 \tag{3.20}$$

$$\lambda = \rho v_p^2 - 2\rho v_s^2 \quad (3.21)$$

Módulo volumétrico:

$$K = \rho v_p^2 - \frac{4}{3}\rho v_s^2 \quad (3.22)$$

Módulo de Young:

$$E = \frac{\rho v_s^2(3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3.23)$$

Relación de Poisson:

$$\nu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3.24)$$

Se han encontrado dos soluciones para el problema de la propagación de la onda, y en realidad, son soluciones únicas para un sólido isotrópico. No importa hacia cuál dirección de propagación se mire, habrá una velocidad de onda P y una velocidad de onda S, las cuales están dadas por las ecuaciones (3.16 y 3.19).

Por supuesto las suposiciones no son realistas: aparentemente no hay material (natural o sintético) que cumpla los requerimientos de un material homogéneo, isotrópico y elásticamente lineal. Se puede afirmar que las rocas no son homogéneas, no son isotrópicas y sobre un rango extenso de esfuerzos se comportan de manera no lineal. Además, una roca no es un sólido ideal debido a características como la porosidad y la permeabilidad para el flujo del fluido. Sin embargo, la mayoría del trabajo hecho en acústica de roca se basa en estas realizaciones. Una razón es que tradicionalmente se obtiene sólo un valor de la velocidad de la onda P de registros sísmicos. Sólo en años recientes han obtenido datos de la velocidad de la onda S in situ.

III.1.3 Velocidad del sonido en las rocas ⁽⁴⁾

La velocidad del sonido depende del módulo de elasticidad y la densidad del material, pero esos parámetros están relacionados también con otras características de la roca, las cuales pueden ser características intrínsecas; como el tipo de roca o litología, porosidad y el grado de saturación del fluido. Las velocidades pueden también depender de parámetros extrínsecos, tales como el estado de esfuerzos, temperatura, etc.

Tradicionalmente, el registro sónico es usado como un registro de porosidad, pero en la actualidad, el desarrollo de herramientas de registros y procedimientos de interpretación, han sido dirigidos hacia la evaluación de las propiedades mecánicas.

La velocidad del sonido depende de las condiciones a las cuales se realizan las mediciones. Se considera, como ejemplo, arcilla seca próxima a la superficie. En la parte superior a un metro la velocidad de la onda P es igual a 300 m/s y la velocidad de la onda S es de 100 m/s. Con incrementos de profundidad (mayor esfuerzo sobre los granos de arena), las dos velocidades se incrementan substancialmente. A una profundidad de 100 m, el mismo sedimento tiene velocidades de onda P y S, al menos dos veces más grandes que en la parte superior. Si el mismo sedimento es depositado al nivel del mar, la saturación del fluido incrementa la v_p , significativamente (típicamente de 300 a 1500 m/s) y la salida de la v_s relativamente no es alterada o escasamente se reduce. La disminución en la v_s se debe al incremento de la densidad al añadir el fluido de saturación (ver la ecuación 3.19). G no es alterada por la inclusión del fluido, al tiempo que λ se incrementa (ecuación 3.16). Intuitivamente esto parece correcto, ya que G es una medida de la rigidez de la estructura de la roca, y un fluido no transmite fuerzas de corte. La gran diferencia entre velocidades de onda P para un medio seco y otro saturado es una herramienta para distinguir las zonas de aceite de las zonas de gas, y también para la detección acústica de gas en zonas someras. La acústica en el lecho marino es aplicada como guía para determinar la posición de plataformas o tuberías. En particular, el módulo de corte de la tierra es un parámetro importante para juzgar la estabilidad de la estructura del equipo.

La Figura 3.2 ilustra los efectos de la presión y la saturación del fluido en una arenisca consolidada. Los resultados son buenos también para una arena no consolidada. La velocidad de la onda P de una arenisca saturada de sal es de cualquier modo más extenso que de una arena saturada de sal: a un esfuerzo efectivo de 35 MPa (la diferencia entre el esfuerzo hidrostático externo y la presión de poro) la v_p , por ejemplo en una arenisca de Boise es de 3450 m/s, al mismo tiempo es de 2100 m/s en arena de Ottawa. Los valores correspondientes, respectivamente de la v_s son 1900 m/s y de 1000 m/s. Dos grandes diferencias entre la arena y la arenisca son obvias: la arenisca está cementada, esto es que los granos son pegados durante la diagénesis, además, las porosidades son diferentes, 25% en la arenisca, y 37% en la arena. Esta diferencia es el fundamento al uso clásico del registro sónico como registro de porosidad. En la práctica, el registro convencional asume que el intervalo del tiempo de tránsito (el cual es el inverso de la velocidad de la onda P) está relacionado linealmente con la porosidad, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{v_p} = \phi \frac{1}{v_{\text{fluido}}} + (1-\phi) \frac{1}{v_{\text{solido}}} \quad (3.25)$$

Ésta se conoce como la "ecuación del promedio temporal" o ecuación Wyllie (Wyllie et al 1958). Los subíndices *fluido* y *sólido* denotan las velocidades de la onda P del fluido en el poro y del grano del material sólido, respectivamente. La ecuación no tiene estrictamente bases teóricas, pero funciona con una precisión razonable para propósitos prácticos. Si la porosidad es conocida, la ecuación (3.5) puede ser usada para identificar la velocidad del sonido del material sólido. Esto indica la posibilidad de utilizar las ondas acústicas en la identificación de la litología.

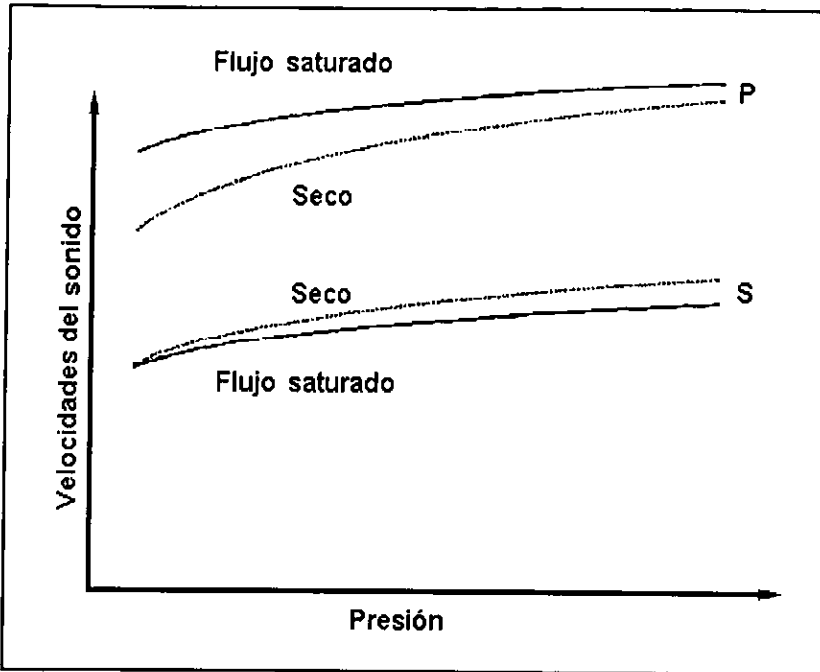


Figura 3.2. El esquema muestra las velocidades de la onda de corte y compresional arenisca (seca y saturada de fluido) como una función de presión externa.

Las velocidades acústicas dependen de la diferencia entre el peso del esqueleto de la roca y la presión de los poros, esto significa que si la presión del poro se incrementa, las velocidades del sonido decrecen. Este hecho es utilizado en la detección de las zonas sobrepresionadas de lutitas a partir de mediciones sísmicas, lo cual es de importancia, por ejemplo para prevenir los problemas de perforación. Sin embargo la naturaleza detallada de un concepto de esfuerzo efectivo para velocidades acústicas, no ha sido establecido todavía.

La Tabla 3.1 resume áreas de la ingeniería petrolera donde las mediciones acústicas en rocas juegan un importante papel.

Tabla 3.1 Áreas de la ingeniería petrolera en donde las mediciones acústicas son aplicadas (* denota la aplicación primaria del método, x denota alguna aplicación)

Áreas de la ingeniería petrolera	Sísmica / VSP	Registro del pozo
Caracterización geométrica de estructuras geológicas	*	
Detección de zonas de gas	*	X
Evaluación de la porosidad	X	*
Identificación de la litología / correlaciones geológicas	X	*
Localizaciones de operaciones EOR	X	*
Detección de presión de poro	X	
Evaluación de propiedades mecánicas	X	*
Detección y caracterización de sistemas de fractura	X	*
Evaluación de permeabilidad		X

III.2 REGISTROS GEOFÍSICOS ⁽⁵⁾

Los registros geofísicos miden las propiedades físicas de las formaciones atravesadas por un pozo. estas propiedades se detectan de una manera directa o indirecta de acuerdo con el principio de la herramienta.

La información se obtiene al introducir una sonda al pozo ésta se coloca mediante un cable conductor aislado a través del cual se recibe una señal natural de la formación (entrada) y es transmitida a través de circuitos electrónicos ocasionando una distorsión (causada por el equipo) cuando es registrada (salida). La información no deseada (ruido) es ocasionada por factores ambientales dentro del pozo o por el equipo en la superficie (calibración del equipo).

III.2.1 Registro sísmico ^(5,6)

El registro sísmico mide la velocidad de propagación del sonido en las formaciones atravesadas por el pozo.

Los registros sísmicos miden el tiempo de tránsito compresional. Para hacerlo el transmisor es activado una vez y un circuito electrónico mide el tiempo transcurrido a la primera incursión negativa del arribo compresional en el receptor cercano. El transmisor se pulsa nuevamente y el circuito mide el tiempo transcurrido al receptor lejano. La diferencia en tiempos de arribo se calcula y se divide entre la distancia (en pies) de los receptores. El resultado se presenta en el registro como tiempo de tránsito de la formación en microsegundos por pie. La exactitud de las mediciones es muy buena, aproximadamente $\pm 0.25 \mu\text{seg} / \text{pie}$.

Los tiempos de viaje compresionales varían desde $40 \mu\text{seg}/\text{pie}$ en formaciones duras o compactas, hasta $150 \mu\text{seg}/\text{pie}$ en las suaves. Las correspondientes velocidades, las cuales son el inverso del tiempo de tránsito, varían de 25000 a 6000 pie/seg . Como dato comparativo el tiempo de tránsito en el agua (o lodo de perforación) es aproximadamente $190 \mu\text{seg}/\text{pie}$. La herramienta ocasionalmente leerá este valor en agujeros extremadamente grandes, en los cuales la onda directa del lodo arriba primero a los receptores.

El registro sísmico es una herramienta de apoyo cuando el agujero es muy irregular, cuando la porosidad secundaria es muy importante o si existen minerales pesados como la pirita que afecta a la herramienta de densidad.

III.2.1.1 Registro dipolar de cizallamiento por imágenes (DSI) ⁽⁷⁾

La herramienta DSI utiliza una combinación de tecnología monopolar y dipolar que determina las medidas exactas de la propagación de las ondas en todo tipo de formaciones, desde las no consolidadas hasta las extremadamente duras. La herramienta cuenta con una programación monopolar, dos transmisores dipolares cruzados y un arreglo de ocho estaciones receptoras que son configuradas para la recepción monopolar y dipolar (ver Figura 3.3); además, trabaja en agujeros descubiertos y en pozos entubados.

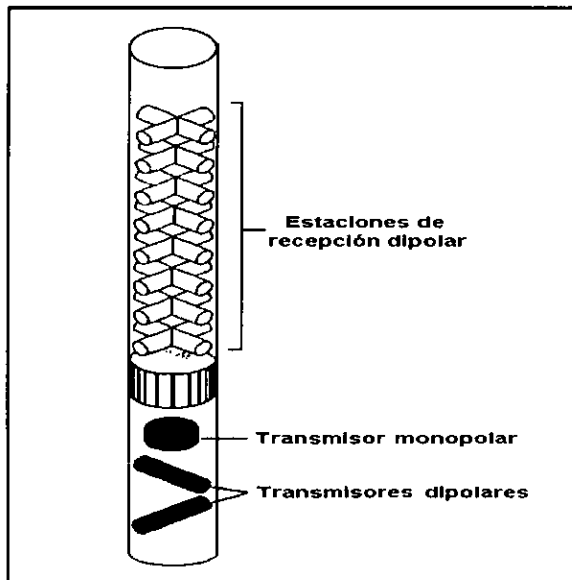


Figura 3.3. Diagrama esquemático del registro dipolar de cizallamiento por imágenes (DSI).

Las estaciones en el arreglo están espaciadas seis pulgadas en dirección vertical, y cada estación consiste de cuatro elementos de recepción agrupados circunferencialmente.

La herramienta DSI hace mediciones de la onda Stoneley para la evaluación de la fractura. Cuando una onda Stoneley cruza una fractura que intersecta el pozo, parte de la energía es doblemente reflejada debido a los contrastes de la impedancia acústica causada por la fractura. El procesamiento y la adquisición de mediciones de la onda Stoneley permite calcular los coeficientes de reflexión para determinar la apertura de la fractura.

La herramienta DSI es usada para maximizar la producción del pozo, diseño de los programas de fracturamiento hidráulico y en formaciones suaves controlar la producción evitando el arenamiento en los pozos (Figura 3.4).

Con la medición de la onda de corte, la herramienta DSI cuenta con una base sólida que permite la evaluación cuantitativa de todas las propiedades mecánicas de las rocas que junto con datos de los esfuerzos desarrollen modelos para la cuantificación de la estabilidad del pozo.

En el FracHite, esta técnica es usada para calcular la presión de fractura de la formación para diseñar programas de fracturamiento. El problema que presenta las herramientas sónicas con transmisores monopolares es que no se puede obtener frecuentemente la información de cizallamiento en las lutitas alrededor de la zona fracturada. La herramienta DSI permite ahora tener más precisión con el FracHite para mediciones de cizallamiento en lutitas.

III.2.2 Registro de densidad ^(4,5,6)

El registro de densidad mide la densidad de los electrones de la formación, la cual está relacionada con la densidad total de la formación. La densidad total de la matriz depende de la matriz de la roca, de su porosidad y de la densidad del fluido que se encuentra en los poros.

El registro de densidad de la formación se utiliza principalmente para determinar la porosidad. La medición de la densidad también permite identificar minerales en depósitos de evaporitas, evaluar las litologías complejas y determinar el volumen de arenas arcillosas, detectar zonas de gas y determinar el rendimiento en las zonas petrolíferas.

La densidad es útil en la determinación de las propiedades mecánicas, las cuales se determinan de dos formas: primero, la densidad es necesaria para convertir de velocidades acústicas a módulos elásticos, segundo, la densidad integrada sobre la profundidad vertical del pozo es usualmente considerado para dar una buena estimación del esfuerzo vertical, por lo menos en áreas de baja actividad tectónica. Cuando el registro de densidad es disponible, el problema de la

La combinación del registro neutrón, el registro sónico y el registro de densidad, permiten obtener valores más exactos de porosidad, así como identificación de la litología, incluyendo la cantidad de arcilla que se encuentra en la formación.

III.2.4 Registros de rayos gamma ^(5,6)

El registro de rayos gamma determina la radioactividad natural de las formaciones, esta radioactividad proviene de los elementos radioactivos: potasio, torio y uranio; los cuales se encuentran contenidos en la roca y emiten radiación de alta energía (rayos gamma).

El registro de rayos gamma se utiliza para detectar y evaluar minerales radioactivos, para hacer correlaciones, determinar cuantitativamente el volumen de arcilla y también sirve como conexión en las operaciones donde se usan los trazadores radioactivos.

La herramienta es efectiva en la identificación de zonas permeables, esto debido a que la mayoría de los minerales radioactivos tienden a concentrarse en la lutita (roca impermeable) y en las rocas permeables (carbonatos, arenas) su concentración es menor.

III.3 MÓDULOS ELASTO-DINÁMICOS DE LA ROCA

III.3.1 Constante elástica de Lamé (λ)⁽⁴⁾

La constante elástica relaciona el esfuerzo aplicado en una dirección con deformación volumétrica debido a ese esfuerzo.

La constante elástica de Lamé es el equivalente al módulo de Young (módulo de elasticidad) bajo condiciones de carga triaxial.

III.3.2 Módulo de corte (G)⁽⁸⁾

El esfuerzo de corte aplicado a una superficie plana en un bloque de material, causa que el plano se mueva con respecto a un plano paralelamente secundario que se encuentra lejos de algunas distancias perpendiculares que se muestran en la Figura 3.5.

La relación del esfuerzo de corte aplicado es resultado de un ángulo de deformación en una medición de la rigidez del material. Esta relación es llamada módulo de corte (G).

$$G = \frac{F A}{\theta} \quad (3.26)$$

donde:

$F A$ Esfuerzo de corte ($lb\ in^2$)
 θ Resultante de un ángulo (*radianes*)

Para un fluido $G=0$, para un sólido G es un número finito.

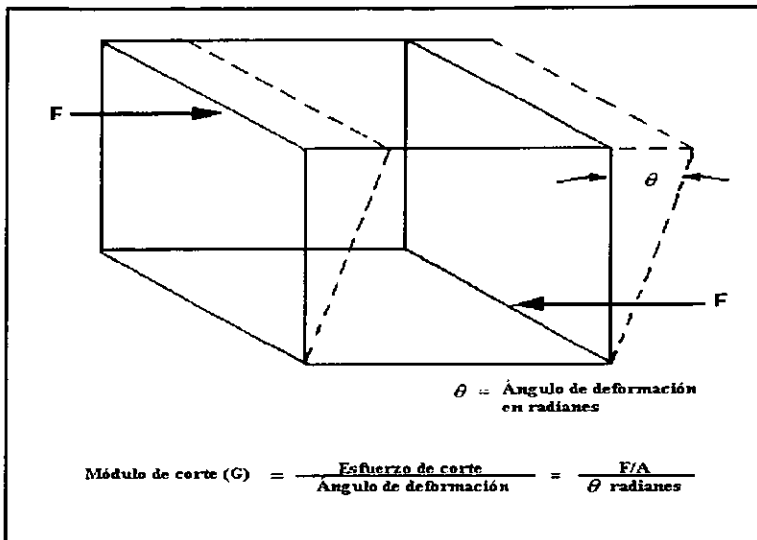


Figura 3.5. Definición del módulo de corte.

III.3.3 Módulo volumétrico (K)^(a)

El peso compresivo aplicado en todos los lados de un bloque de material ocurre en una condición hidrostática que causa una reducción en el volumen (Figura 3.6).

La relación del esfuerzo aplicado (fuerza por unidad de área). Al cambio del volumen por unidad de volumen original, es llamado módulo volumétrico (K).

$$K = \frac{F A}{v v_0} \quad (3.27)$$

donde:

- F Fuerza (lb)
- A Área (in^2)
- v Cambio en volumen (in^3)
- v_o Volumen original (in^3)

El módulo volumétrico es recíproco de la compresibilidad.

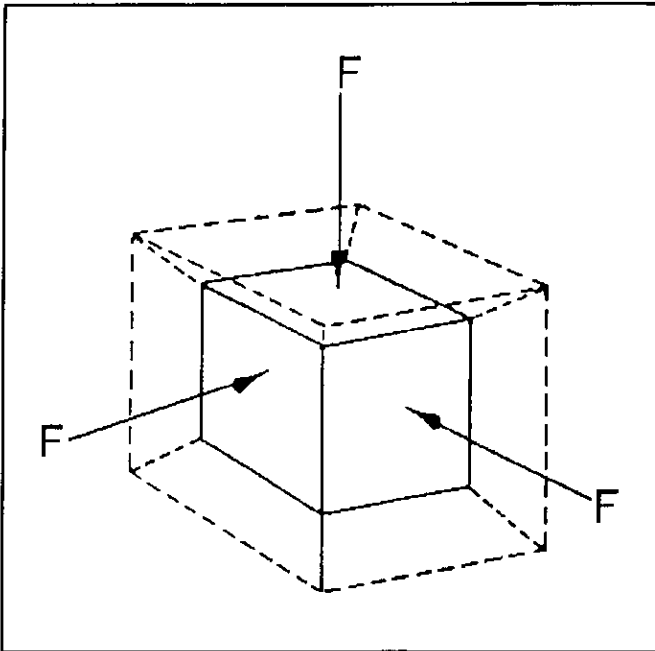


Figura 3.6. Definición del módulo volumétrico.

III.3.4 Módulo de Young (E) ^(B)

La cantidad de esfuerzos es causada por una deformación dada como función de la rigidez de un material. La rigidez puede ser presentada por el trazo de la inclinación de una tensión axial para el acero suave y se determina con el módulo de Young (E).

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} \left[\frac{lb\ in^2}{in\ in} \right] \quad (3.28)$$

El módulo de Young o módulo de elasticidad para la roca es de 30×10^6 psi, el valor de E se encuentra en un rango de 0.5 a 12×10^6 psi.

III.3.5 Relación de Poisson (ν)⁽⁸⁾

El esfuerzo compresivo aplicado a un bloque de material a lo largo de un eje particular causa un acorte por aquel eje pero también se expande en direcciones totalmente perpendiculares a aquel eje que es ilustrado en la Figura 3.7. El radio de deformación es perpendicular al esfuerzo aplicado, es determinado por la relación de Poisson (ν).

$$\nu = \frac{\text{Deformación lateral} \left[\frac{\text{in}}{\text{in}} \right]}{\text{Deformación longitudinal} \left[\frac{\text{in}}{\text{in}} \right]} \quad (3.29)$$

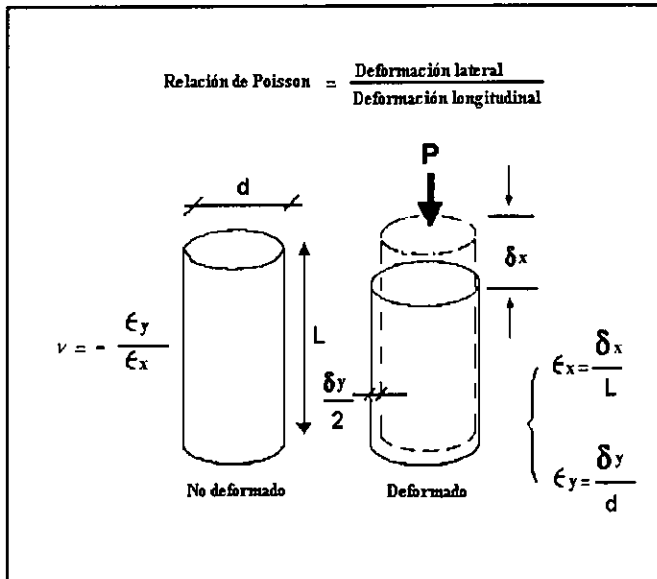


Figura 3.7. Medidas de la relación de Poisson.

III.4 CRITERIO DE MOHR-COULOMB⁽⁴⁾

El criterio de Mohr-Coulomb asume una función (f) lineal.

$$\tau = S_0 + \mu\sigma \quad (3.30)$$

donde S_0 es la cohesión del material y μ es el coeficiente de fricción interna. Claramente se escoge por analogía con el resbalamiento ordinario de una superficie, el cual para una primera aproximación se describe mediante la Ley de Amonton.

$$\tau = +\mu\sigma \quad (3.31)$$

donde σ es la fuerza normal sobre el material y μ es el coeficiente de fricción.

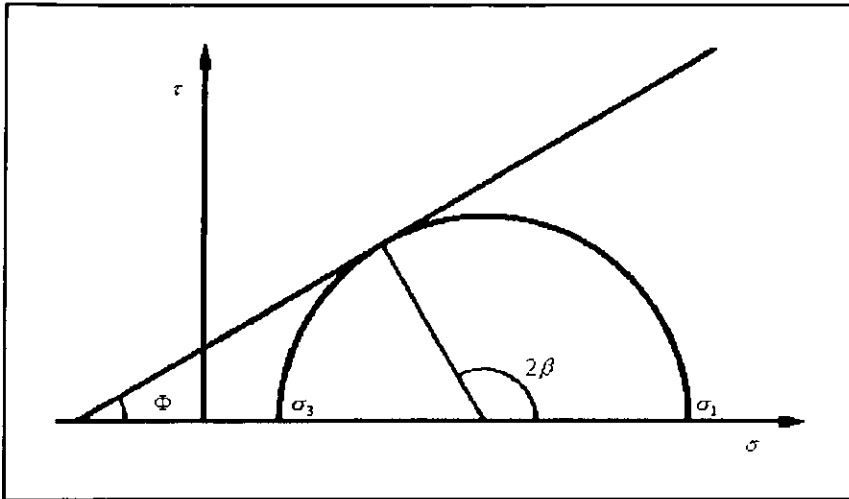


Figura 3.8. Criterio de Mohr-Coulomb en el espacio $\tau - \sigma$. También se muestra el círculo de Mohr correspondiente a un estado de esfuerzo crítico.

De la Figura 3.8 podemos definir el ángulo de fricción interna Φ relacionándolo con el coeficiente de fricción interna μ de la siguiente manera:

$$\tan\Phi = \mu \quad (3.32)$$

También se muestra en la Figura 3.8 el ángulo 2β , el cual proporciona la posición del punto de coincidencia entre el círculo de Mohr y la línea de falla. Se puede observar que los esfuerzos de corte y normal en el punto de contacto, son:

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta \quad (3.33)$$

y que β y Φ están relacionados por:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \quad (3.34)$$

$$\Phi + \frac{\pi}{2} = 2\beta \quad (3.35)$$

Los esfuerzos σ y τ dados por las ecuaciones (3.33) y (3.34), son los esfuerzos normal y de corte de un plano cuya normal está inclinada a un ángulo β con respecto a la dirección σ_1 . De la ecuación (3.35) se obtiene:

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{2} \quad (3.36)$$

Y debido a que la máxima variación permisible de β es de 0° a 90° (en la práctica el rango será menor, estando aproximadamente cerca de los 30°), es claro que β variará entre los 45° y los 90° . Debido a que β es el ángulo al cual se satisface el criterio de falla, β indica la orientación del plano de falla de lo que podemos concluir que el plano de falla está inclinado a un ángulo menor a 45° con respecto a la dirección de σ_1 . La Figura 3.9 muestra esquemáticamente la posible variación de los planos de falla de una roca descrita por el criterio de Mohr-Coulomb.

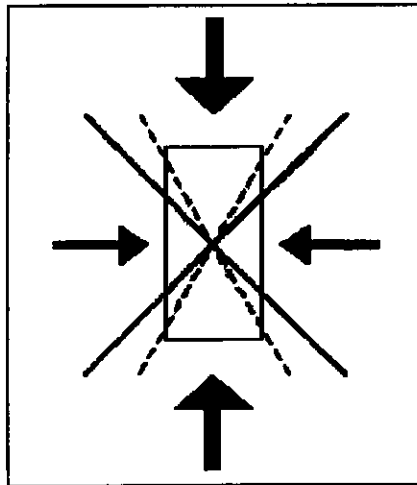


Figura 3.9. Máxima inclinación del plano de falla de acuerdo al criterio de Mohr - Coulomb (líneas continuas). También se muestra la inclinación correspondiente a un ángulo de fricción de 30° (líneas discontinuas). Se supone que el esfuerzo axial es mayor que el radial.

Otro punto importante es que β es proporcionado solamente por Φ , de tal manera que la orientación del plano de falla es independiente del esfuerzo confinante. Sustituyendo las ecuaciones (3.33) y (3.34) en el criterio de falla (ecuación (3.30)) se obtiene:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\text{sen } 2\beta = S_o + \mu \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\text{cos } 2\beta \right] \quad (3.37)$$

Reemplazando β y μ por Φ :

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\text{cos } \Phi = S_o + \frac{1}{2}\text{tan}\Phi(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}\text{tan}\Phi \text{sen } \Phi(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3.38)$$

Multiplicando por $2\text{cos } \Phi$ y reorganizando términos:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)(\text{cos}^2 \Phi + \text{sen}^2 \Phi) = 2S_o \text{cos } \Phi + (\sigma_1 + \sigma_3)\text{sen } \Phi \quad (3.39)$$

$$\sigma_1(1 - \text{sen } \Phi) = 2S_o \text{cos } \Phi + \sigma_3(1 + \text{sen } \Phi) \quad (3.40)$$

$$\sigma_1 = 2S_o \frac{\text{cos } \Phi}{1 - \text{sen } \Phi} + \sigma_3 \frac{1 + \text{sen } \Phi}{1 - \text{sen } \Phi} \quad (3.41)$$

La Figura 3.10 muestra esta relación en el plano (σ_1, σ_3) . Nuevamente tenemos una relación lineal, con una intersección positiva en el eje σ_1 , lo cual es muy similar a la gráfica mostrada en la Figura 3.8. Sin embargo, el ángulo α en el plano $\sigma_1 - \sigma_3$, no es igual a Φ , pero está relacionado Φ con éste, de la siguiente manera:

$$\text{tan } \alpha = \frac{1 + \text{sen } \Phi}{1 - \text{sen } \Phi} \quad (3.42)$$

ó

$$\text{sen } \Phi = \frac{\text{tan } \alpha - 1}{\text{tan } \alpha + 1} \quad (3.43)$$

La Figura 3.11 muestra una gráfica de α y β contra Φ .

Finalmente, se puede ver que la ecuación (3.40) puede ser escrita en términos del ángulo de falla, de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = 2S_o \text{tan } \beta + \sigma_3 \text{tan}^2 \beta \quad (3.44)$$

Resistencia a la compresión uniaxial

Sustituyendo $\sigma_3 = 0$ en la ecuación (3.41), se obtiene la resistencia a la compresión uniaxial C_o :

$$C_o = 2S_o \frac{\cos \Phi}{1 - \sin \Phi} = 2S_o \tan \beta \quad (3.45)$$

La ecuación (3.45) sólo es válida si el mecanismo de falla bajo un esfuerzo uniaxial es una falla de corte. Esto no puede suceder aún cuando la falla de corte ocurra a bajas presiones de confinamiento.

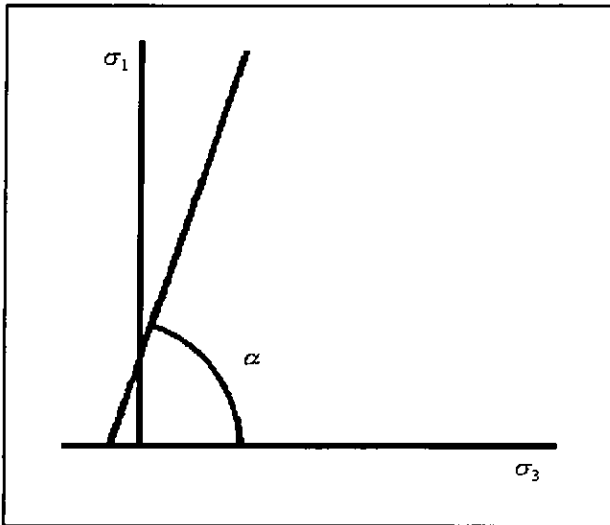


Figura 3.10. Criterio de Mohr-Coulomb en el plano (σ_1, σ_3) .

Resistencia a la tracción

Quizá se debería considerar el cálculo de la resistencia a la tracción (uniaxial) T_o , al sustituir $\sigma_1 = 0$ en la ecuación (3.41). Con esto se obtendría T_o , relacionado a C_o , dado por:

$$\frac{C_o}{T_o} = \frac{1 + \sin \Phi}{1 - \sin \Phi} \quad (3.46)$$

el cual para $\Phi = 30^\circ$ da un valor $\frac{C_o}{T_o} = 3$. Sin embargo, una falla bajo tensión no se debe al esfuerzo de corte, entonces esto no es una aproximación válida. En realidad T_o es más pequeño en relación a C_o que lo predicho en la ecuación (3.46).

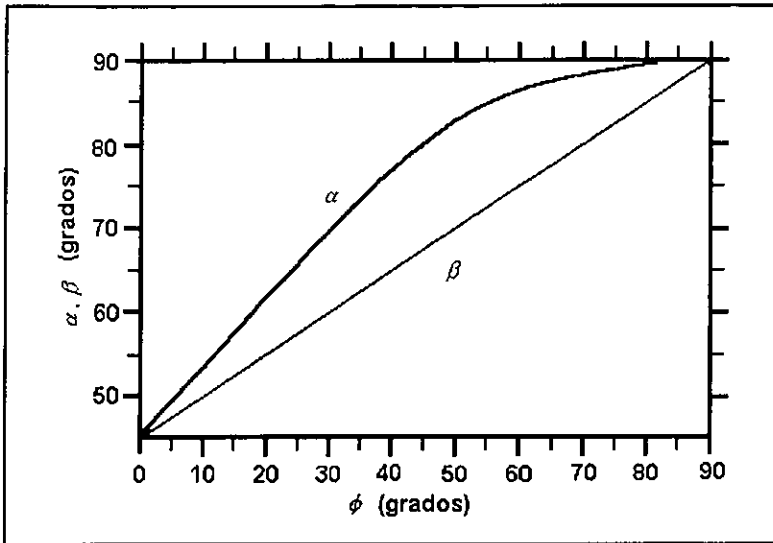


Figura 3.11. Inclinación de la línea de falla en el plano (σ_1, σ_3) y la inclinación de la normal al plano de falla β como función del ángulo de fricción (Φ) .

C A P Í T U L O I V

DESARROLLO DEL SISTEMA PARA EL CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

El objetivo de este capítulo es determinar las propiedades mecánicas de la roca con el método de Mason⁽⁹⁾, partiendo de la información de los registros geofísicos. Los registros usados son: registro sísmico, registro de densidad, registro neutrón y registro de rayos gamma.

IV.1 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRÁNSITO DE CIZALLAMIENTO A PARTIR DE REGISTROS GEOFÍSICOS

El registro dipolar de cizallamiento por imágenes determina el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s), cuando el registro no está disponible, se utiliza el método de Mason⁽⁹⁾, el cual nos permite calcular el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s) a partir del tiempo de tránsito compresional (Δt_c).

Para determinar el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s) es importante identificar las litologías perforadas, estas litologías son determinadas por análisis de muestras de roca o por registros eléctricos.

Una vez identificada la litología o las litologías de la formación se escoge el procedimiento a seguir para determinar el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s).

IV.1.1 Determinación del tiempo de tránsito de cizallamiento cuando esté presente una sola litología en la formación.

El tiempo de tránsito compresional se determina del registro sísmico, cuando no está disponible se calcula a partir de mediciones de porosidad de una muestra hechas en el laboratorio (ϕ) con la ecuación (4.1), esto no es recomendable, ya que la inconsistencia entre los registros de porosidad (dinámicas y estáticas) arroja valores con divergencia.

$$\Delta t_c = [\Delta t_{mms} (1 - \phi) + \Delta t_s (\phi)] \quad (4.1)$$

donde:

- $\Delta t_{m.}$ Tiempo de tránsito de la matriz ($\mu\text{seg ft}$)
 Δt_f Tiempo de tránsito en el fluido de la formación
 ($\mu\text{seg ft}$)

El tiempo de tránsito de la matriz se obtiene de la Tabla C.1 (ver Apéndice).

El tiempo de tránsito en el fluido se determina dependiendo del registro que se trate:

- ◆ Registro sísmico compresional. Como el registro sísmico compresional es una herramienta de investigación relativamente poco profunda (aproximadamente 40 pg) se toma la lectura del registro que refleja la zona invadida por lodo, para que las compañías de registros calculen la resistividad del filtrado de lodo con cartas de interpretación de registros y corrijan por salinidad del fluido por temperatura y presión de la formación para determinar la velocidad en el fluido y con esto conocer el tiempo de tránsito en el fluido.
- ◆ Registro sísmico de corte. La herramienta de registro sísmico de corte es una herramienta de investigación más profunda que el registro sísmico compresional, por lo que los efectos de la velocidad en el fluido de la formación deben ser tomados entre la resistividad del fluido y el tiempo de tránsito de corte; la resistividad del fluido de la formación es determinada a partir del registro potencial espontáneo que evalúa la salinidad, los efectos de la temperatura y la presión de la formación. La velocidad en el fluido de la formación debe ser calculada en diferentes lugares del pozo e informar los cambios continuos de temperatura y presión que se presenten.
- ◆ Composición de registros. Si el registro es una composición de más de un registro (en el cual el fluido de perforación es cambiado por cada intervalo corrido) el registro debe ser desarrollado desde la mejor sección, el tiempo de tránsito del fluido debe ser determinado al principio y al final de cada sección.
- ◆ Registros de porosidad o análisis de muestras. Si el tiempo de tránsito de corte es generado desde una medida de porosidad, el tiempo de tránsito del fluido debe ser un valor simulado, por lo que se considera que el tiempo de tránsito en el fluido es de 207 ($\mu\text{seg ft}$)⁽⁹⁾.

El tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s) es estimado con el tiempo de tránsito compresional (Δt_c) y con la relación ($\Delta t_s / \Delta t_c$) para cada litología, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta t_s = \Delta t_c (\Delta t_s / \Delta t_c) \quad (4.2)$$

donde:

$(\Delta t_s \Delta t_c)$ Relación entre el tiempo de tránsito de cizallamiento y el tiempo de tránsito compresional.

La relación $(\Delta t_s \Delta t_c)$ se obtiene de la Tabla C.1 (ver Apéndice).

Es notado que cuando la porosidad de una litología dada permanece el esfuerzo varia de acuerdo al cambio del tamaño de grano, ya que por lo general, el tamaño del grano grande hace débil a la roca. Una relación empírica fue desarrollada para cuantificar los efectos que causa la variación del tamaño de la roca para determinar el tiempo de tránsito de corte con la siguiente expresión:

$$\Delta t_s = \Delta t_c \left[(\Delta t_s \Delta t_c)^\alpha \right] \quad (4.3)$$

en la cual el exponente α está en función del tamaño del grano de la partícula y los valores para el factor α son mostrados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Factor α para el tamaño de grano⁽⁹⁾

Grano	Tamaño (mm)	Factor α
Cieno	< 1 16	0.90
Muy fino	1 16 a 1 8	0.95
Fino	1 8 a 1 4	1.00
Medio	1 4 a 1 2	1.05
Grande	1 2 a 1.0	1.10
Muy grande	1.0 a 2.0	1.15
Granulos	2.0 a 4.0	1.20
> Granulos	> 4.0	>1.30

IV.1.2 Determinación del tiempo de tránsito de cizallamiento cuando están presentes dos o más litologías en la formación.

Es necesario tener muestras o descripciones de las litologías para determinar el volumen fraccional de cada una de ellas que se encuentra presente en la formación. Una vez determinada la fracción de cada componente, el tiempo de tránsito de corte es calculado con las ecuaciones (de la 4.4 a la 4.8) para cada componente.

$$V_A + V_B = 1 \quad (4.4)$$

$$\Delta t_{CM} = V_A \Delta t_{CA} + V_B \Delta t_{CB} + \dots \quad (4.5)$$

donde:

V_A	Fracción de la litología A presente en la mezcla
V_B	Fracción de la litología B presente en la mezcla
Δt_{CA}	Tiempo de tránsito compresional de la litología A presente en la mezcla
Δt_{CB}	Tiempo de tránsito compresional de la litología B presente en la mezcla
Δt_{CM}	Tiempo de tránsito compresional de la mezcla

Los tiempos de tránsito compresionales para cada litología se calculan con la ecuación (4.1).

La solución para la fracción de litología A (V_A) y la fracción de litología B (V_B) es:

$$V_B = \frac{\Delta t_{CM} - \Delta t_{CA}}{\Delta t_{CB} - \Delta t_{CA}} \quad (4.6)$$

$$V_A = 1 - V_B \quad (4.7)$$

Entonces el tiempo de tránsito de cizallamiento es calculado con la siguiente expresión:

$$\Delta t_S = V_A \Delta t_{CA} [(\Delta t_S, \Delta t_C)_A] + V_B \Delta t_{CB} [(\Delta t_S, \Delta t_C)_B] + \dots \quad (4.8)$$

donde $(\Delta t_S, \Delta t_C)_A$ esta relación se obtiene de la Tabla C.1 (ver Apéndice) para la litología A y $(\Delta t_S, \Delta t_C)_B$ esta relación es obtenida de la Tabla C.1 (ver Apéndice) para la litología B.

IV.2 DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS ELASTO-DINÁMICOS DE LAS ROCAS

Con la información de los registros geofísicos y el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_S) , se lleva a cabo el cálculo de los módulos elasto-dinámico de

las rocas (módulo de corte, módulo volumétrico, relación de Poisson, módulo de Young y constante elástica de Lamé) las cuales se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$G = 1.34 \times 10^{10} \left(\frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \right) \quad (4.9)$$

$$K = 1.34 \times 10^{10} (\rho_b) \left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right) \quad (4.10)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (4.11)$$

$$\nu = \frac{[0.5(\Delta t_s \Delta t_c)^2] - 1}{(\Delta t_s \Delta t_c)^2 - 1} \quad (4.12)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (4.13)$$

$$\lambda = K - \frac{2}{3}G \quad (4.14)$$

donde:

- G Módulo de corte ($lb \text{ } pg^2$)
- ρ_b Densidad de la formación ($gr \text{ } cm^3$)
- Δt_s Tiempo de tránsito de cizallamiento ($\mu\text{seg } ft$)
- K Módulo volumétrico ($lb \text{ } pg^2$)
- ν Relación de Poisson
- Δt_c Tiempo de tránsito compresional ($\mu\text{seg } ft$)
- E Módulo de Young ($lb \text{ } pg^2$)
- λ Constante elástica de Lamé ($lb \text{ } pg^2$)

IV.3 DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS DE FALLA DE LAS ROCAS

Para determinar los módulos de falla se utilizó la correlación de Brie⁽⁴⁾, esta correlación es usada por la compañía Schlumberger en su programa IMPACT.

Los módulos elasto-dinámicos de la roca se utilizan para determinar los parámetros de falla (resistencia a la compresión uniaxial, ángulo de fricción interna, resistencia a la cohesión y resistencia a la tracción) y se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$C_o = \text{Max}[1.11 \times 10^{-3}(G - 0.85), 1.2 \times 10^{-6}(G)^{1.6}] \quad (4.15)$$

$$\Phi = 60[1 - (\nu - 1 - \nu)] \quad (4.16)$$

$$S_o = \frac{C_o(1 - \text{sen } \Phi)}{2 \cos \Phi} \quad (4.17)$$

$$T_o = C_o \cdot 12 \quad (4.18)$$

donde:

C_o	Resistencia a la compresión uniaxial ($lb \text{ } pg^2$)
G	Módulo de cizallamiento ($lb \text{ } pg^2$)
ν	Relación de Poisson
Φ	Ángulo de fricción interna ($^\circ$)
S_o	Cohesión ($lb \text{ } pg^2$)
T_o	Resistencia a la tracción ($lb \text{ } pg^2$)

Dado que la ecuación (4.15) cuenta con dos términos, se deberá calcular cada uno de los términos:

$$\text{1er término } C_o = 1.11 \times 10^{-3}(G - 0.85) \quad (4.15 \text{ a})$$

$$\text{2do término } C_o = 1.2 \times 10^{-6}(G)^{1.6} \quad (4.15 \text{ b})$$

después de hacer el cálculo, se toma el término de mayor valor.

IV.4 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

La metodología para la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas consiste en:

1. Discretización de la información de los registros geofísicos, esta discretización se realizó basándose en los rangos de precisión de la herramienta (2 a 3m), por lo

que para este caso se tomaron los intervalos de 10m en 10m y lo demás se eliminó.

2. Elaboración de gráficas con los datos de los registros para eliminar los datos negativos ya que estos se consideran información no deseada (ruido).
3. Elaboración del programa en excel para determinar las propiedades mecánicas cuando se presentan varias litologías en la formación, la hoja de cálculo está compuesta por cuatro encabezados:
 - ◆ Datos del pozo. Contiene la información requerida para determinar las propiedades mecánicas de las rocas: volumen de roca, densidad de la formación y tiempo de tránsito compresional.
 - ◆ Determinación del tiempo de tránsito de cizallamiento. Con la información del pozo se hace la corrección del volumen de roca de acuerdo con el método de Mason⁽⁹⁾ para cada litología presente y con la Tabla C.1 (ver Apéndice) se determina el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s). Se realizó un algoritmo de toma de decisión para seguir determinando los parámetros tanto elasto-dinámicos como de falla y se hace con el fin de optimizar el tiempo de cálculo.
 - ◆ Determinación de los módulos elasto-dinámicos. Los módulos elasto-dinámicos que determina el programa son: módulo de cizallamiento, módulo volumétrico, relación de Poisson, módulo de Young y constante elástica de Lamé; estas propiedades son calculadas con datos del pozo y con los datos calculados anteriormente.
 - ◆ Determinación de los módulos de falla. Los módulos de falla que se determinan: resistencia a la compresión uniaxial, ángulo de fricción interna, cohesión y resistencia a la tracción. Estas propiedades son calculadas con ecuaciones establecidas y datos del pozo.
4. Se gráfica la profundidad con cada uno de los parámetros determinados (módulo de cizallamiento, módulo volumétrico, módulo de Young, relación de Poisson, resistencia a la compresión uniaxial, cohesión, ángulo de fricción interna y resistencia a la tracción).
5. Análisis de las propiedades mecánicas de las rocas.

En la Figura 4.1 se presenta el diagrama de flujo del sistema para la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas.

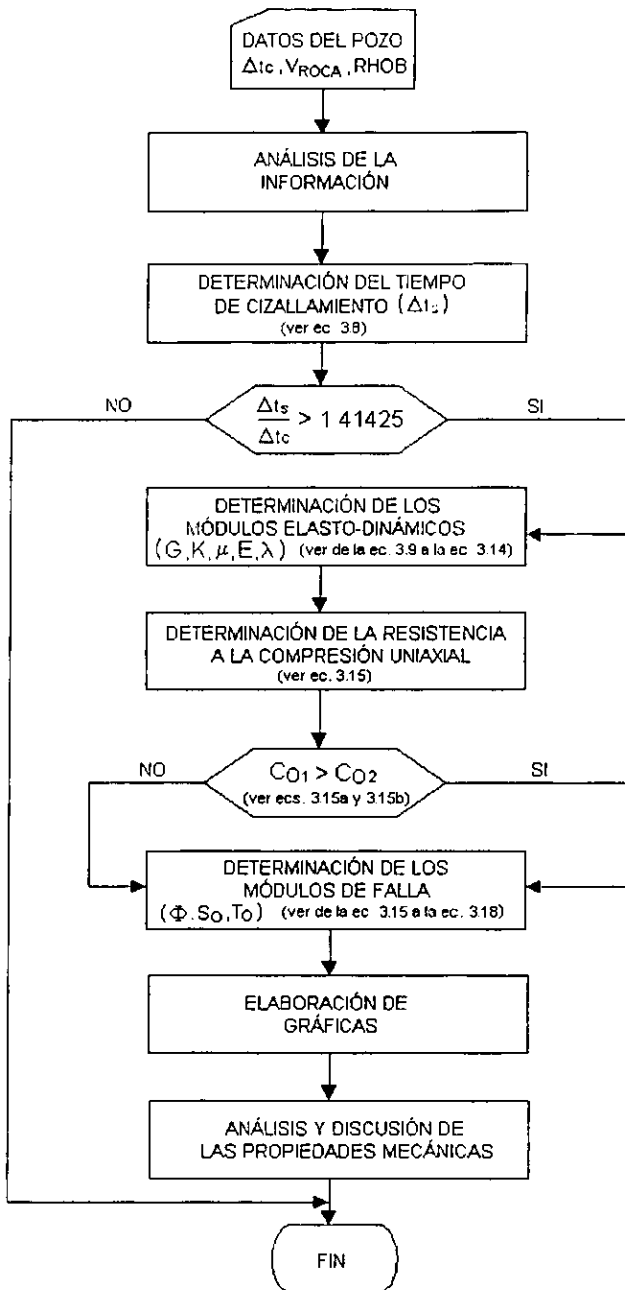


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología para determinar las propiedades mecánicas de la roca.

III. 5 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se presenta un ejemplo numérico con el fin de presentar la metodología para la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas, por lo que se seleccionó un pozo, el cual se encuentra ubicado dentro de la zona marina suroeste perteneciente al litoral de Tabasco. (ver Figura 4.2).

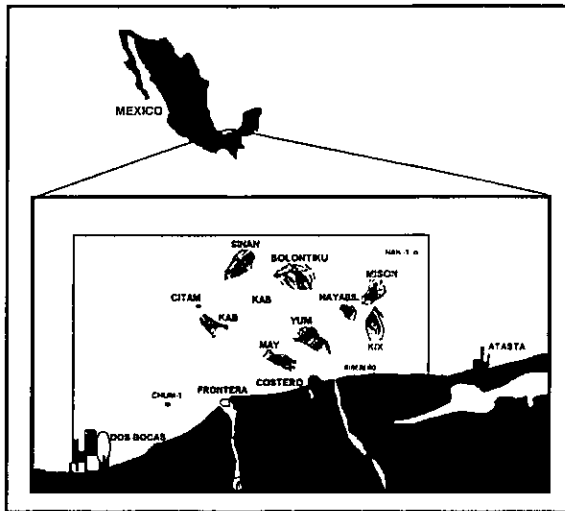


Figura 4.2 Localización del pozo en estudio.

La columna geológica del pozo comprende del Jurásico Tardío al Terciario Tardío.

ERAS	PERIODOS	EPOCAS	MILLONES DE AÑOS	
			DURACION	ANTES DEL PRESENTE
CENOZOICO	Cenozoico	Plioceno		63,000,000
		Pleistoceno	13,000,000	
		Mioceno	13,000,000	
		Oligoceno	11,000,000	
		Eoceno	27,000,000	
		Paleoceno	5,000,000	
MESOZOICO	Cretácico		72,000,000	230,000,000
PALEOZOICO	Jurásico		48,000,000	
	Triásico		49,000,000	
	Pérmico		50,000,000	
	Pennsylvánico		30,000,000	
	Misísipico		35,000,000	

Las rocas más antiguas tienen 3,300,000,000 de años

Figura 4.3 Periodo geológico.

La litología que se presenta en el pozo de acuerdo a los registros geofísicos es:

Profundidad (m)	Litología de la formación
800 - 1000	Arcilla y arenisca con presencia de caliza
1000 - 2000	Arcilla y caliza con presencia de arenisca
2000 - 3000	Arcilla y caliza con presencia de arenisca
3000 - 4000	Arcilla y caliza con presencia de arenisca
4000 - 5270	Caliza y arcilla con presencia de dolomía y arenisca

La información que se tomo del pozo son los registros geofísicos para llevar a cabo la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas (ver las Figuras A.1 y A.2 que se encuentran en el Apéndice).

Ejemplo 1: Determinación de las propiedades mecánicas de la roca para la profundidad de 800 m.

Datos tomados de los registros geofísicos:

$$V_{\text{arr}} = 0.2$$

$$V_{\text{arr}} = 0.568$$

$$V_{\text{cu}} = 0$$

$$V_{\text{con}} = 0$$

$$\Delta t_{\text{arr}} = 125.9 \text{ } \mu\text{seg ft}$$

- ♦ La litología de la formación presente a esta profundidad, es una mezcla donde predomina la arcilla y la arenisca por lo cual se toma el procedimiento 2 (ver IV.1.2). El tiempo de tránsito de cizallamiento Δt_s es calculado a partir del tiempo de tránsito compresional.

Los tiempos de tránsito fueron tomados de la Tabla C.1 (ver Apéndice) para cada litología presente en la formación:

$$\Delta t_{\text{arr}} = 166.6 \text{ } \mu\text{seg ft}$$

$$\Delta t_{\text{arr}} = 51.2 \text{ } \mu\text{seg ft}$$

$$\Delta t_{\text{cu}} = 47.6 \text{ } \mu\text{seg ft}$$

$$\Delta t_{\text{con}} = 40 \text{ } \mu\text{seg ft}$$

Las relaciones de los tiempos de tránsito fueron tomadas de la Tabla C.1 (ver Apéndice).

$$(\Delta t_s, \Delta t_c)_{ARC} = 3.20$$

$$(\Delta t_s, \Delta t_c)_{ARE} = 1.70$$

$$(\Delta t_s, \Delta t_c)_{C.H.} = 2.10$$

$$(\Delta t_s, \Delta t_c)_{D.N.H.} = 1.8$$

Para determinar el tiempo de tránsito de cizallamiento, Mason sólo considera el volumen de roca (ver ecuación 4.4). Esta consideración es debido a que las ondas de corte no se propagan en el fluido y éste se encuentra representado por la porosidad.

El volumen de roca del registro se modifica para cumplir con la condición del procedimiento y de acuerdo con la ecuación (4.4) se hace lo siguiente:

$$I'_A + V_B = 1$$

$$I'_{ARC} + V_{URE} = 0.2 + 0.568 = 0.768$$

$$I'_{ARC-CORR} = \frac{0.2}{0.768} = 0.26$$

$$I'_{URE-CORR} = \frac{0.568}{0.768} = 0.74$$

Con estos valores se toma la ecuación (4.8) para llevar a cabo el cálculo.

Tiempo de tránsito de cizallamiento de la mezcla

$$\Delta t_s = V_A \Delta t_{cA} [(\Delta t_s, \Delta t_c)_A] + V_B \Delta t_{cB} [(\Delta t_s, \Delta t_c)_B]$$

$$\Delta t_s = 0.26(166.6)(3.20) + 0.74(51.2)(1.70)$$

$$\Delta t_s = 203.20 \text{ } \mu\text{seg ft}$$

- ♦ Se determina los módulos elasto-dinámicos de la roca con las ecuaciones (de la 4.9 a la 4.14) y la densidad de la formación es tomada del registro para esta profundidad la cual es $\rho_h = 1.471 \text{ gr cm}^3$.

Módulo de cizallamiento

$$G = 1.34 \times 10^{10} [\rho_h (\Delta t_s)^2]$$

$$G = 1.34 \times 10^{10} [1.471 (203.20)^2]$$

$$G = 0.477 \times 10^6 \text{ lb pg}^2$$

Módulo volumétrico

$$K = 1.34 \times 10^{10} (\rho_s) \left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right)$$

$$K = 1.34 \times 10^{10} (1.471) \left(\frac{1}{(125.9)^2} - \frac{4}{3(203.20)^2} \right)$$

$$K = 0.607 \times 10^6 \text{ lb } pg^2$$

Relación de Poisson

$$\nu = \frac{[0.5(\Delta t_s \Delta t_c)^2] - 1}{(\Delta t_s \Delta t_c)^2 - 1}$$

$$\nu = \frac{[0.5(203.20 \ 125.9)^2] - 1}{(203.20 \ 125.9)^2 - 1}$$

$$\nu = 0.188$$

Módulo de Young

$$E = 2G(1 + \nu)$$

$$E = 2(0.477 \times 10^6)(1 + 0.188)$$

$$E = 1.134 \times 10^6 \text{ lb } pg^2$$

Constante elástica de Lamé

$$\lambda = K - \frac{2}{3} G$$

$$\lambda = 0.607 \times 10^6 - \frac{2}{3} (0.477 \times 10^6)$$

$$\lambda = 0.288 \times 10^6 \text{ lb } pg^2$$

♦ Se calculan los módulos de falla con las ecuaciones (de la 4.15 a la 4.18).

Resistencia a la compresión uniaxial

1er término

$$C_{10} = [1.11 \times 10^{-3} (G - 0.85)]$$

$$C_{10} = [1.11 \times 10^{-3} ((0.477 \times 10^6) - 0.85)]$$

$$C_{10} = 529.897 \text{ lb } pg^2$$

2do término

$$C_o = 1.2 \times 10^{-6} G^{1.6}$$

$$C_o = 1.2 \times 10^{-6} (0.477 * 10^6)^{1.6}$$

$$C_o = 1463.28 \text{ lb } pg^2$$

Se escoge el mayor valor, en este caso es de $C_o = 1427.37 \text{ lb } pg^2$.

Ángulo de fricción interna

$$\Phi = 60 \times [1 - (\nu_1 - \nu)]$$

$$\Phi = 60 \times [1 - (0.188 - 0.188)]$$

$$\Phi = 46^\circ$$

Cohesión

$$S_o = \frac{C_o (1 - \text{sen } \Phi)}{2 \cos \Phi}$$

$$S_o = \frac{(1463.28)[1 - \text{sen}(46)]}{2 \cos(46)}$$

$$S_o = 294.21 \text{ lb } pg^2$$

Resistencia a la tracción

$$T_o = C_o / 12$$

$$T_o = 1463.28 / 12$$

$$T_o = 121.94 \text{ lb } pg^2$$

Ejemplo 2: Determinación de las propiedades mecánicas de la roca para la profundidad de 4120.86 m.

Datos tomados de los registros geofísicos:

$$V_{uu} = 0.161$$

$$V_{uu} = 0.259$$

$$V_{uu} = 0.506$$

$$V_{uu} = 0$$

$$M_{uv} = 120.492 \text{ lb } pg^2$$

- ♦ La litología de la formación es una mezcla compuesta por arcilla, arenisca y caliza y se toma el procedimiento 2 (ver IV.1.2) para llevar a cabo el cálculo del tiempo de tránsito de cizallamiento.

Los tiempos de tránsito para cada litología fueron tomados de la Tabla C.1 (ver Apéndice).

$$\Delta t_{ARC} = 166.6 \text{ } \mu\text{seg } ft$$

$$\Delta t_{URI} = 51.2 \text{ } \mu\text{seg } ft$$

$$\Delta t_{CAL} = 47.6 \text{ } \mu\text{seg } ft$$

$$\Delta t_{MIX} = 40 \text{ } \mu\text{seg } ft$$

Las relaciones de los tiempos de tránsito fueron tomadas de la Tabla C.1 (ver Apéndice).

$$(\Delta t_s, \Delta t_c)_{ARC} = 3.20$$

$$(\Delta t_s, \Delta t_c)_{ARL} = 1.70$$

$$(\Delta t_s, \Delta t_c)_{CAL} = 2.10$$

$$(\Delta t_s, \Delta t_c)_{MIX} = 1.8$$

Para cumplir con la condición de Mason se modifica la ecuación (4.1) y se hace lo siguiente:

$$V'_A + V'_B + V'_C = 1$$

$$V'_{URI} + V'_{ARC} + V'_{CAL} = 0.506 + 0.161 + 0.259 = 0.926$$

$$V'_{URI-CORR} = \frac{0.506}{0.926} = 0.55$$

$$V'_{ARC-CORR} = \frac{0.161}{0.926} = 0.174$$

$$V'_{CAL-CORR} = \frac{0.259}{0.926} = 0.276$$

Con estos valores y con la ecuación (4.8) se lleva a cabo el cálculo.

Tiempo de tránsito de cizallamiento de la mezcla

$$\Delta t_s = V'_A \Delta t_{cA} [(\Delta t_s, \Delta t_c)_A] + V'_B \Delta t_{cB} [(\Delta t_s, \Delta t_c)_B] + V'_C \Delta t_{cC} [(\Delta t_s, \Delta t_c)_C]$$

$$\Delta t_s = 0.546(47.6)(2.10) + 0.174(51.2)(1.70) + 0.280(166.6)(3.20)$$

$$\Delta t_s = 218.86 \text{ } \mu\text{seg } ft$$

- ♦ Se determina los módulos elasto-dinámicos de la roca con las ecuaciones (de la 4.9 a la 4.14) y la densidad de la formación es tomada del registro para esta profundidad la cual es $\rho_b = 2.473 \text{ gr cm}^3$.

Módulo de cizallamiento

$$G = 1.34 \times 10^{10} \left[\rho_b (\Delta t_s)^2 \right]$$

$$G = 1.34 \times 10^{10} [2.473 (218.86)^2]$$

$$G = 0.691 \times 10^6 \text{ lb pg}^2$$

Módulo volumétrico

$$K = 1.34 \times 10^{10} (\rho_b) \left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right)$$

$$K = 1.34 \times 10^{10} (2.473) \left(\frac{1}{120.492^2} - \frac{4}{3(218.86)^2} \right)$$

$$K = 1.36 \times 10^6 \text{ lb pg}^2$$

Relación de Poisson

$$\nu = \frac{[0.5(\Delta t_s \Delta t_c)^2] - 1}{(\Delta t_s \Delta t_c)^2 - 1}$$

$$\nu = \frac{[0.5(218.86 \cdot 120.492)^2] - 1}{(218.86 \cdot 120.492)^2 - 1}$$

$$\nu = 0.282$$

Módulo de Young

$$E = 2G(1 + \nu)$$

$$E = 2(0.691 \times 10^6)(1 + 0.282)$$

$$E = 1.773 \times 10^6 \text{ lb pg}^2$$

Constante elástica de Lamé

$$\lambda = K - \frac{2}{3}G$$

$$\lambda = 1.36 \times 10^6 - \frac{2}{3}(0.691 \times 10^6)$$

$$\lambda = 0.898 \times 10^6 \text{ lb pg}^2$$

- ♦ Se calculan los módulos de falla con las ecuaciones (de la 4.15 a la 4.18).

Resistencia a la compresión uniaxial

1er término

$$C_o = [1.10 \times 10^{-3} (G - 0.85)]$$

$$C_o = [1.10 \times 10^{-3} (0.691 \times 10^6 - 0.85)]$$

$$C_o = 760.09 \text{ lb } pg^2$$

2do término

$$C_o = 1.2 \times 10^{-6} G^{1.6}$$

$$C_o = 1.2 \times 10^{-6} (0.691 \times 10^6)^{1.6}$$

$$C_o = 2649.278 \text{ lb } pg^2$$

Se toma el valor de $C_o = 2649.278 \text{ lb } pg^2$ para hacer los siguientes cálculos.

Ángulo de fricción interna

$$\Phi = 60 \times [1 - (\nu_1 - \nu)]$$

$$\Phi = 60 \times [1 - (0.282 - 0.282)]$$

$$\Phi = 36^\circ$$

Cohesión

$$S_o = \frac{C_o (1 - \text{sen } \Phi)}{2 \cos \Phi}$$

$$S_o = \frac{2649.278 [1 - \text{sen}(37)]}{2 \cos(36)}$$

$$S_o = 668.156 \text{ lb } pg^2$$

Resistencia a la tracción

$$T_o = C_o / 12$$

$$T_o = 2649.278 / 12$$

$$T_o = 220.773 \text{ lb } pg^2$$

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos con respecto a la estimación de las propiedades mecánicas (módulos elasto-dinámicos y de falla) de la roca utilizando el método de Mason⁽⁹⁾ para evaluar la velocidad de corte a partir de la velocidad de sonido compresional y la composición de las formaciones. Empleando las velocidades de corte y compresionales y el registro de densidad, se evaluaron los módulos elasto-dinámicos con las ecuaciones (4.9,4.10,4.12,4.13 y 4.14) presentadas en el Capítulo IV.

Para facilitar la evaluación del método y discusión de los resultados referentes a los módulos elasto-dinámicos, estos parámetros se graficaron por intervalos de acuerdo con el Gráfico B.1 (ver Apéndice) lo cuales corresponden a:

Intervalo	Profundidad (m)
1	800 - 1490 (sección superficial)
2	1490 - 4270 (zona de presión anormal)
3	4270 - 5225 (sección profunda)

En contraste, los gráficos de las propiedades mecánicas de falla se graficaron individualmente contra la profundidad. Durante la discusión de los resultados, los valores obtenidos se comparan con un rango de valores reportados en referencias. La secuencia de discusión de resultados consiste primeramente de módulos elasto-dinámicos y posteriormente de falla.

V. 1 RESULTADOS DE LOS MÓDULOS ELASTO-DINÁMICOS DE LAS ROCAS

V.1.1 Módulo de Young (E) y constante elástica de Lamé (λ)

El módulo de Young (E) es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación para un sólido lineal-elástico, bajo condiciones de carga uniaxial, mientras que el módulo elástico de Lamé (λ) es equivalente al módulo de Young bajo condiciones triaxiales de carga. Por lo anterior en esta sección se analizan simultáneamente estos módulos comparándolos en función de profundidad.

En las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran los valores obtenidos de los módulos elásticos en discusión, para tres diferentes intervalos de profundidad descritos en la introducción de este Capítulo.

En la Tabla 5.1 se presentan valores promedios característicos del módulo de Young (E) para los tipos de rocas de las formaciones atravesadas en el pozo del ejemplo. Comparando este valor con los resultados obtenidos y graficados en las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se puede observar que los resultados están entre los límites reportados.

Tabla 5.1. Módulo de Young para las rocas sedimentarias ⁽¹⁰⁾

Rocas sedimentarias	Módulo de Young (10^6 psi)
Dolomía	2.84 - 12
Caliza	1.42 - 11.4
Arenisca	0.72 - 12.3
Lutita (arcilla)	1.18 - 4.27

Adicionalmente, se puede observar que los valores del módulo de Young (E) están relacionados con la litología del pozo. En la Tabla 5.2 se muestra la litología esperada a partir del valor de los módulos elásticos calculados la cual concuerda con la litología reportada en el Capítulo IV.

Tabla 5.2. Litología presente en la formación de acuerdo a valores obtenidos del módulo de Young

Profundidad (m)	Litología
800 - 1550	Arcilla con presencia de arenisca y caliza
1560 - 1890	Arcilla y arenisca con presencia de caliza y dolomía
1920 - 2840	Arcilla, caliza, arenisca y dolomía
2850 - 4200	Arcilla, caliza, arenisca y dolomía
4270 - 5270	Arcilla, caliza, arenisca y dolomía

La magnitud de los módulos elásticos está relacionada a la compactación de la roca, la cual depende de factores tales como: profundidad, tipo de roca, presión de poro, etc. Comparando las Figuras 5.2 y 5.4 se observa claramente que el módulo de Young (E) se incrementa de 1×10^6 psi a una profundidad de 800 m hasta 10×10^6 psi a la profundidad total (la roca es menos elástica por compactación). Sin embargo y debido a la presión anormal de poro observada en el intervalo de 1490 a 4200 m las rocas se encuentran bajo-compactadas y por lo tanto tienen una rigidez menor que en el resto del pozo, lo cual se puede observar por los valores del módulo de Young ($E \approx 0.8 \times 10^6$ psi).

Con respecto a la constante elástica de Lamé (λ) se puede observar que se tiene un comportamiento similar que el discutido para el módulo de Young (E) (ver Figuras 5.2, 5.3 y 5.4). Cabe mencionar que la diferencia relativa entre los valores numéricos del módulo de Young (E) y el módulo elástico de Lamé (λ) nos indica cualitativamente la anisotropía elástica de las rocas. Por ejemplo, en los intervalos (4725 - 4950) y (5120 - 5250) se esperan rocas anisotrópicas desde el punto de vista de propiedades elásticas (ver Figura 5.4).

V.1.2 Módulo de corte (G) y módulo volumétrico (K)

El módulo de corte (G) es la relación entre el esfuerzo de corte y la deformación unitaria cortante, la cual se mide con el ángulo resultante para una superficie (ver Figura 5.5), mientras que el módulo volumétrico (K) es la relación entre el esfuerzo hidrostático y la deformación volumétrica. Ambos parámetros se utilizan para analizar cualitativamente el efecto de porosidad en las propiedades elásticas de la roca cuando se utilizan los registros sísmico y densidad.

En la Tabla 5.3 se presentan los valores promedios tanto del módulo volumétrico (K) como el módulo de corte (G) para varias rocas sedimentarias. Cotejando estos valores con los resultados graficados en las Figuras (5.5, 5.6 y 5.7) se observa que los resultados están dentro de los rangos establecidos.

Tabla 5.3. Módulo de corte y módulo volumétrico para las rocas sedimentarias ⁽¹⁰⁾

Rocas sedimentarias	Módulo de corte (10 ⁶ psi)	Módulo volumétrico (10 ⁶ psi)
Arcilla	1.02	3.05
Arenisca	4.79	5.65
Caliza	4.35	10.3
Dolomía	7.55	10.16

En las Figuras (5.5, 5.6 y 5.7) se muestran los valores obtenidos de los módulos elásticos para tres diferentes intervalos de profundidad. Se puede observar que existe una tendencia similar al módulo de Young (E) y la constante elástica de Lamé (λ), es decir, conforme la profundidad se incrementa, la roca esta más compactada y sus módulos elásticos son mayores en magnitud (i.e. la roca es más rígida o menos elástica). Sin embargo, en el intervalo de presiones anormales, los módulos no aumentan debido a la baja compactación en este intervalo (ver Figura 5.6). Usualmente, el valor numérico del módulo de cizallamiento (G) es menor que el valor del módulo volumétrico (K). Lo anterior se puede observar prácticamente a lo largo de todo el pozo.

La compresibilidad de la roca es el valor inverso del módulo volumétrico (K), es decir a menor valor de K la roca es más compresible. Es de esperarse que las lutitas/carbonatos con presiones de poro altas sean más compresibles que las rocas con presión de poro anormal. De la Figura 5.6 (presión anormal) y comparándola con valores de las Figuras 5.5 y 5.7 se observó que el valor del módulo volumétrico (K) es de 1×10^6 aproximadamente en la zona de presión anormal y mayores a este valor en zonas de presión anormal.

V.1.3 Relación de Poisson (ν)

La relación de Poisson (ν) es la relación entre la deformación lateral y la deformación longitudinal de un material sólido bajo condiciones de carga uniaxial. Ben Eaton⁽¹¹⁾ presentó un gráfico (Figura 5.1) en el cual el valor de ν fluctúa de 0.2 en formaciones superficiales a 0.45 en formaciones profundas. Esto implica que conforme la profundidad aumenta la capacidad de la roca a expandirse lateralmente aumenta. Las Figuras (5.8, 5.9 y 5.10) presentan los resultados obtenidos en función de profundidad, se puede observar que no ν varía tal como se esperaba ya que fluctúa de 0.35 a 0.45 sin tendencia bien definida como la presentada por Eaton⁽¹¹⁾.

Esta discrepancia es posible que se deba a que el método utilizado sirve para módulos elásto-dinámicos y la reportada por Eaton⁽¹¹⁾ es el valor de la relación de Poisson estática.

Tabla 5.4. Relación de Poisson para las rocas sedimentarias ⁽¹⁰⁾

Rocas sedimentarias	Relación de Poisson (valores promedios)
Dolomia	0.08 - 0.20 0.08 - 0.20
Caliza	0.10 - 0.20 0.16 - 0.23 0.33 - 0.14 - 0.30
Arenisca	0.066 - 0.125 0.230 - 0.300 0.17 0.07 0.62
Lutita (arcilla)	0.11 - 0.54 0.10 0.23 - 0.30 0.04 - 0.12

En la Tabla 5.4 se presentan los valores promedios de la relación de Poisson (ν) para las rocas sedimentarias. Comparando estos valores con los resultados

graficados en las Figuras (5.8,5.9 y 5.10) se observa que los resultados están dentro de los rangos establecidos.

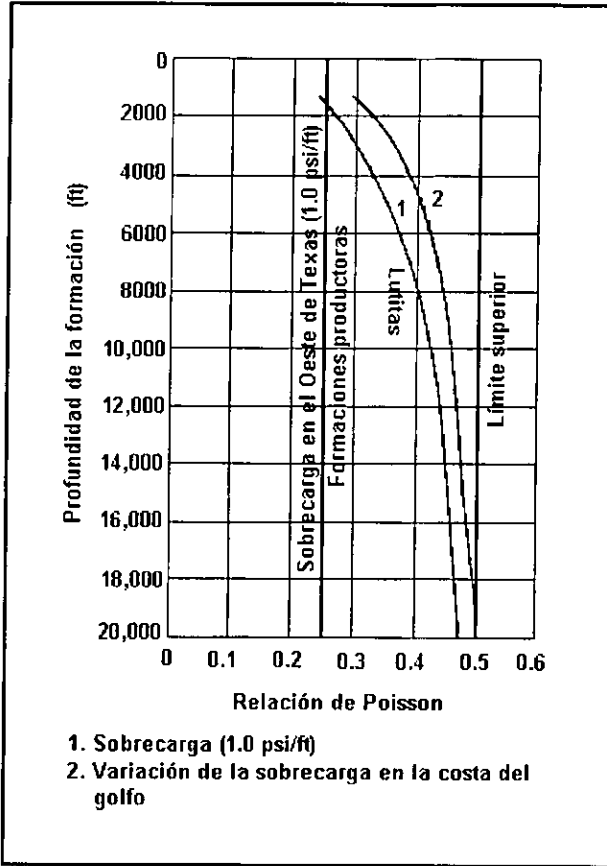


Figura 5.1 Correlación de Eaton para la relación de Poisson.

La relación de Poisson (ν) se encuentra vinculada con la litología, por lo cual en la Tabla 5.5 se muestra la litología presente en la formación y concuerda con la litología reportada en el Capítulo IV.

Tabla 5.5. Litología presente en la formación de acuerdo valores obtenidos de la relación de Poisson

Profundidad (m)	Litología
800 - 1490	Arcilla y arenisca con presencia de dolomía y caliza
1490 - 4220	Arcilla, arenisca, caliza y dolomía
4270 - 5270	Arcilla, caliza, arenisca y dolomía

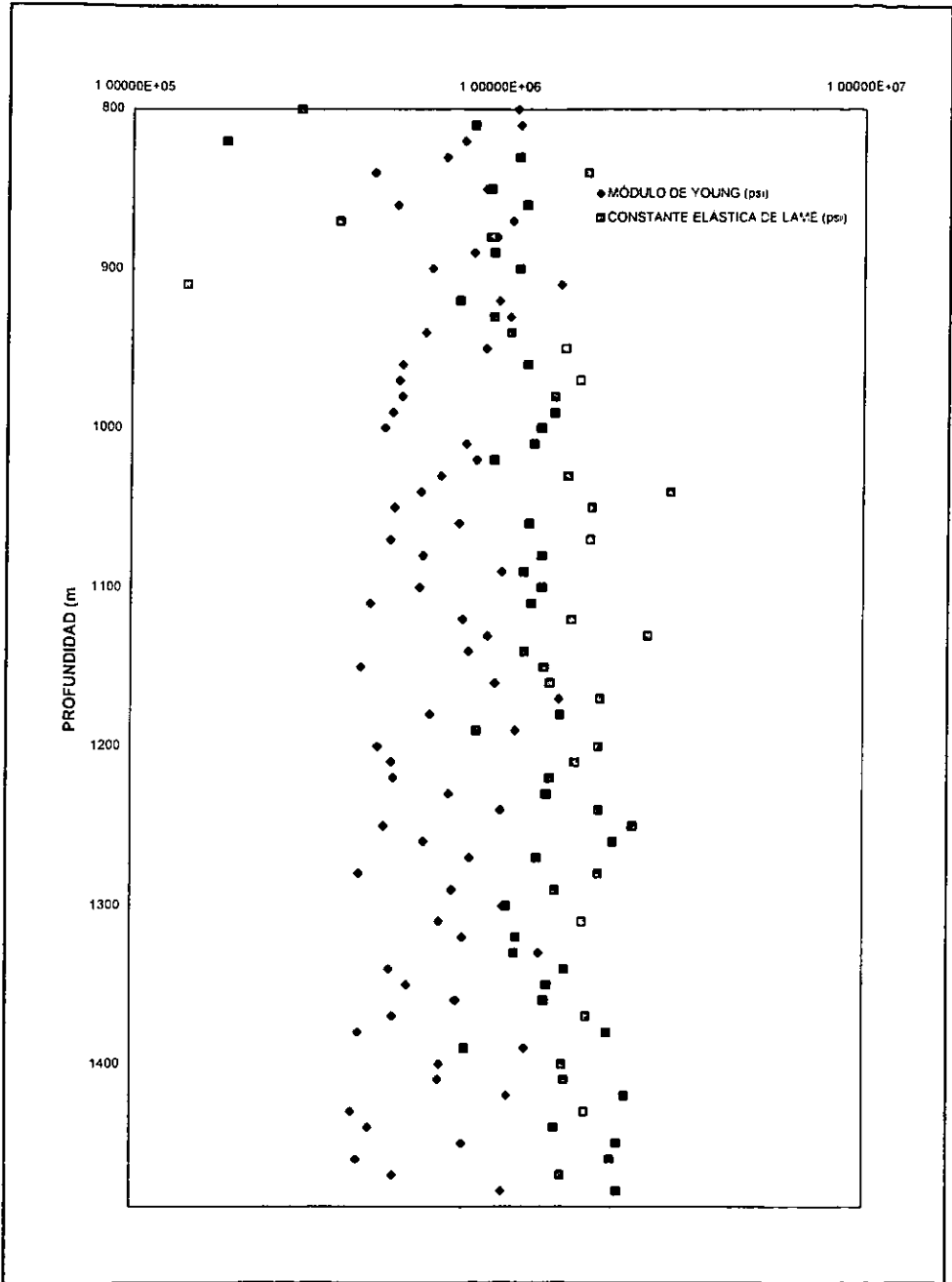


Figura 5.2. Módulo de Young y constante elástica de Lamé calculados para el intervalo 1.

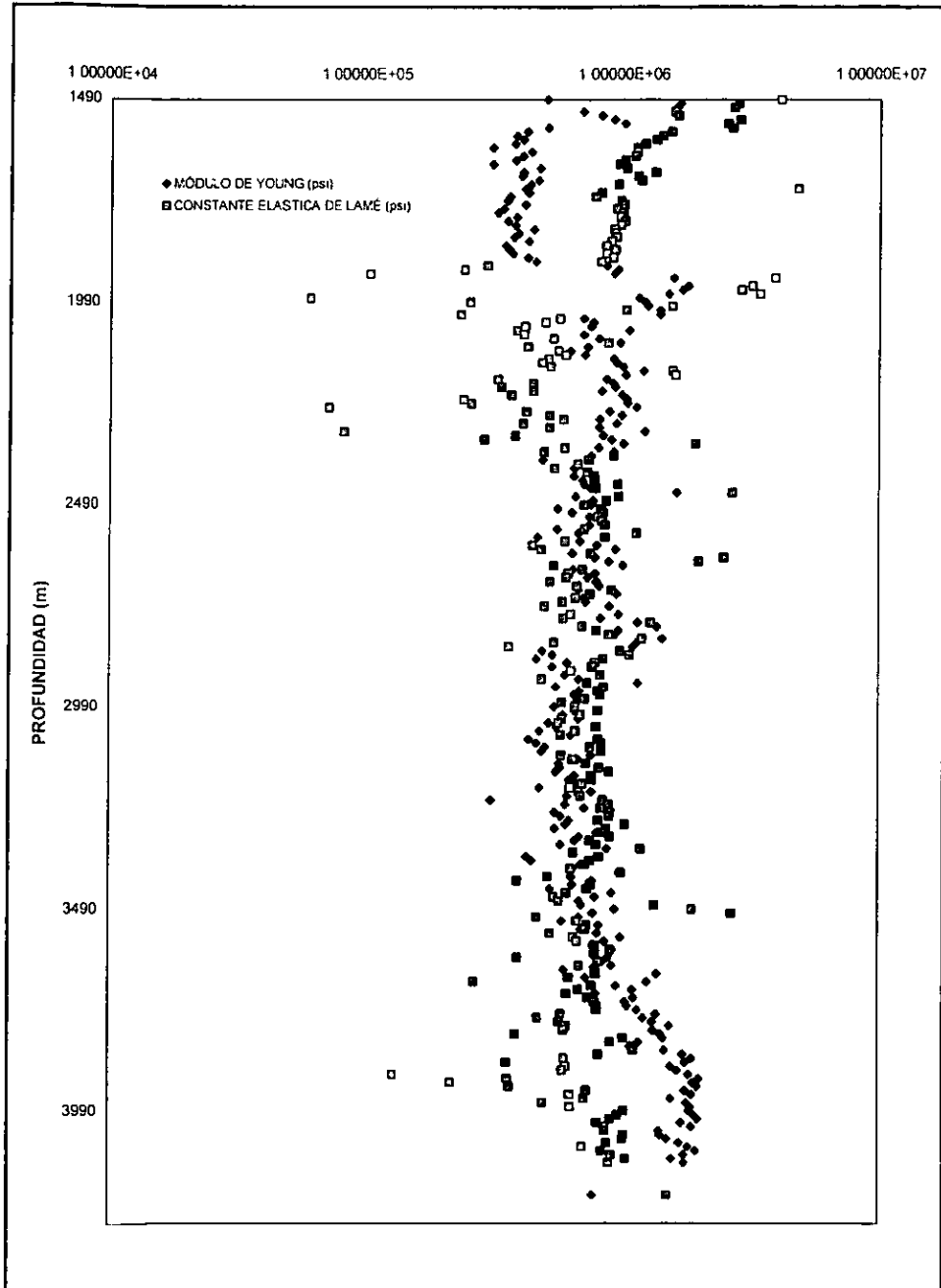


Figura 5.3. Módulo de Young y constante elástica de Lamé calculados para el intervalo 2.

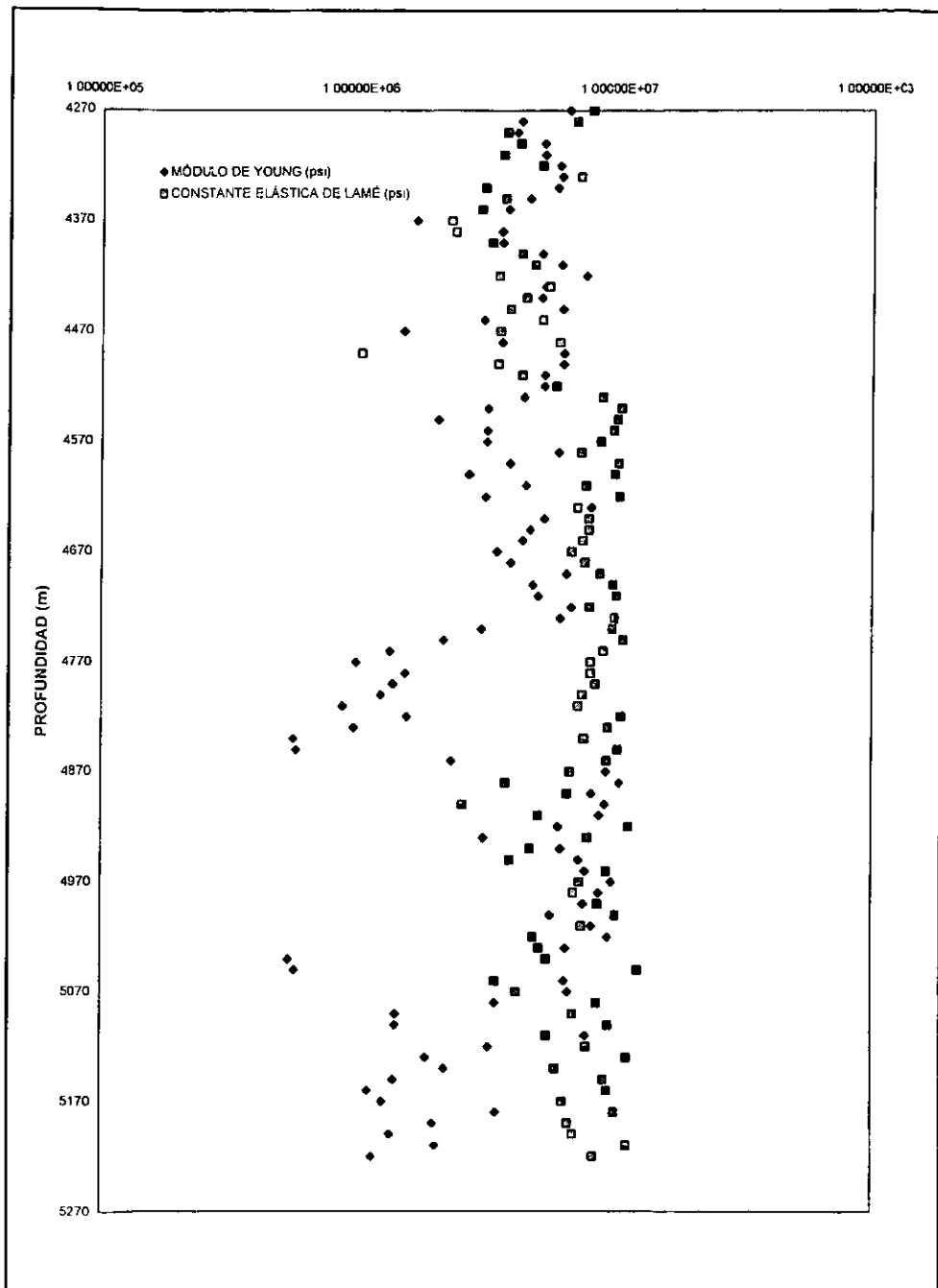


Figura 5.4. Módulo de Young y constante elástica de Lamé calculados para el intervalo 3.

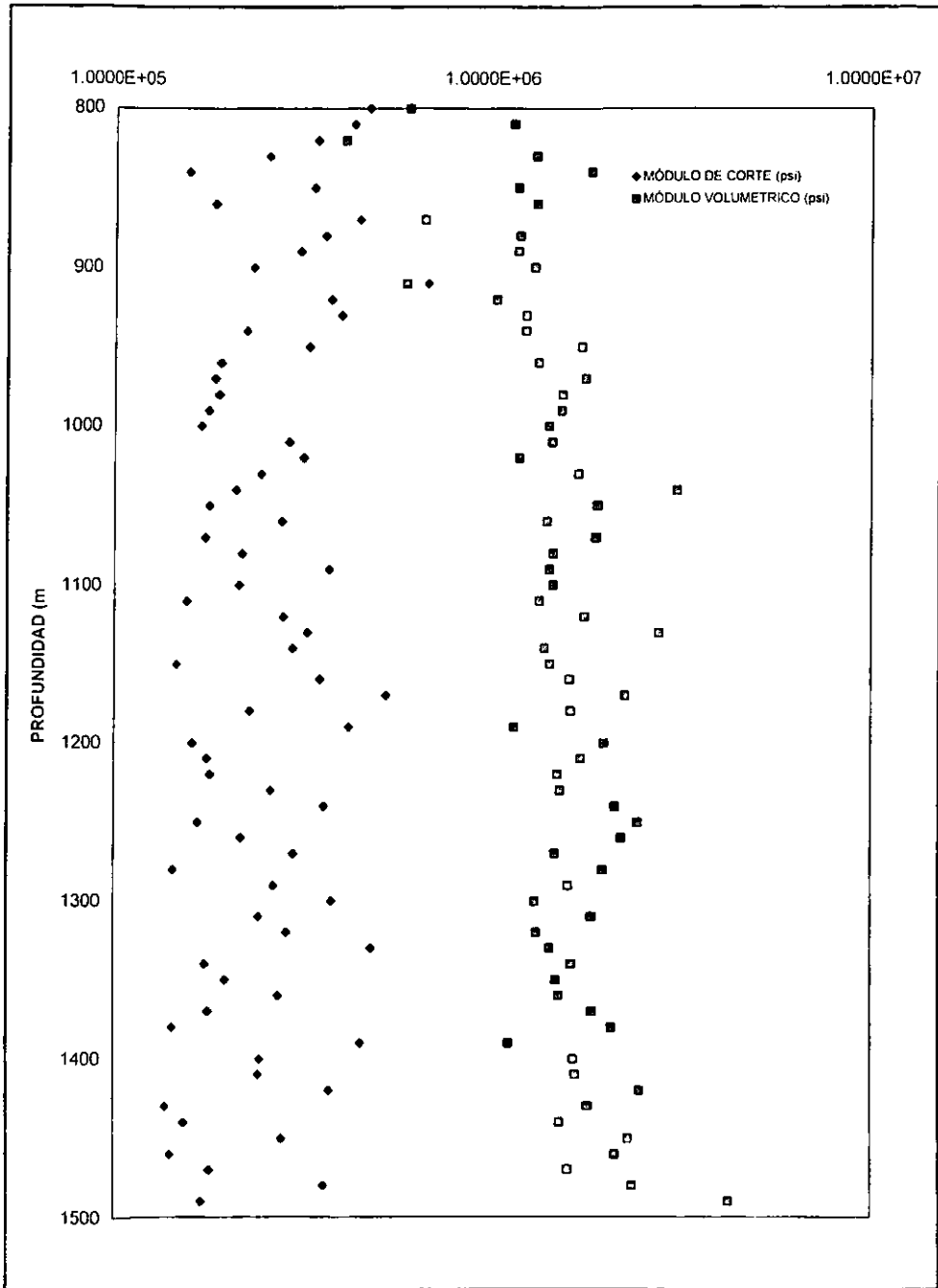


Figura 5.5. Módulo de corte y módulo volumétrico calculados para el intervalo 1.

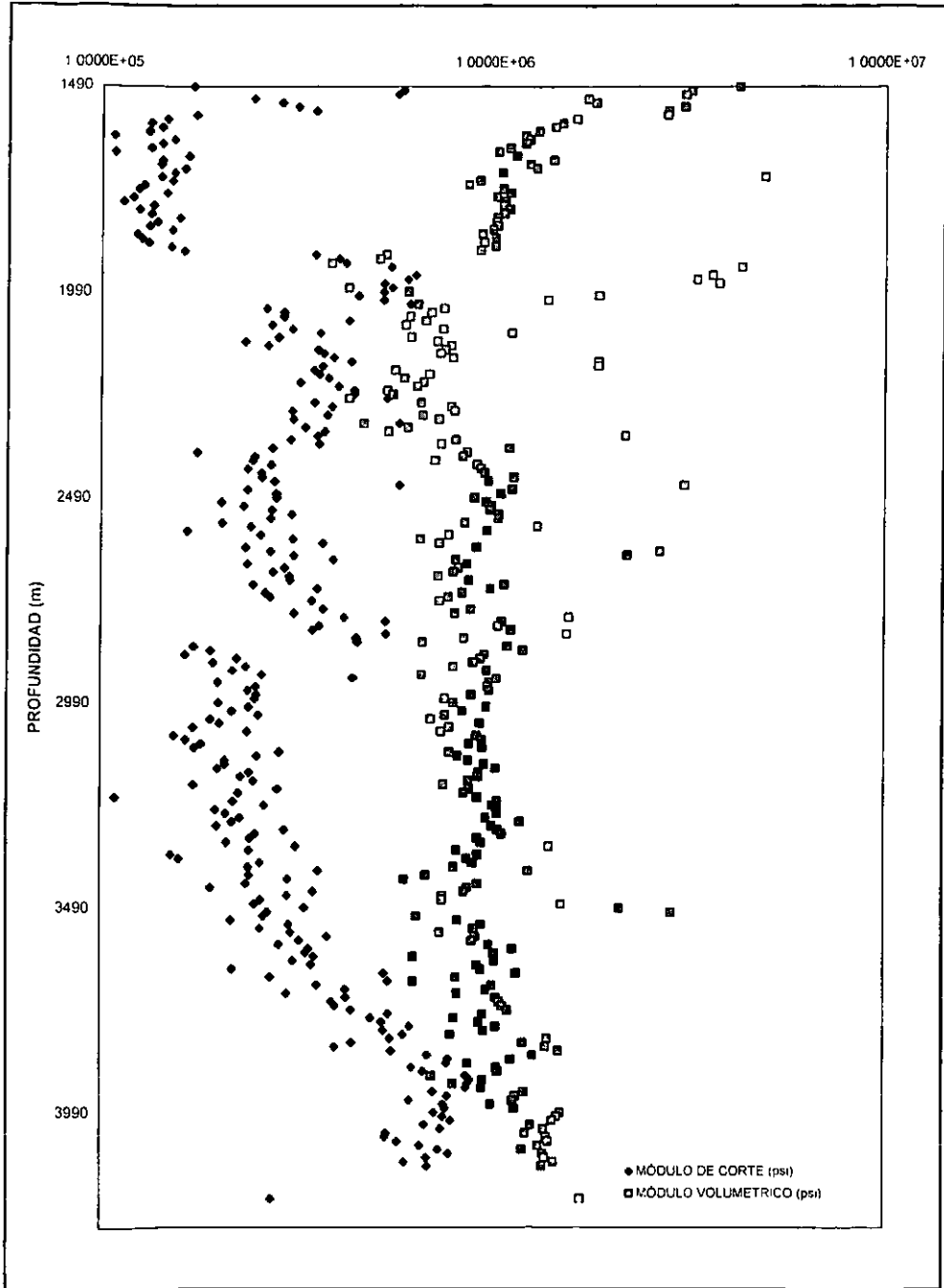


Figura 5.6. Módulo de corte y módulo volumétrico calculados para el intervalo 2.

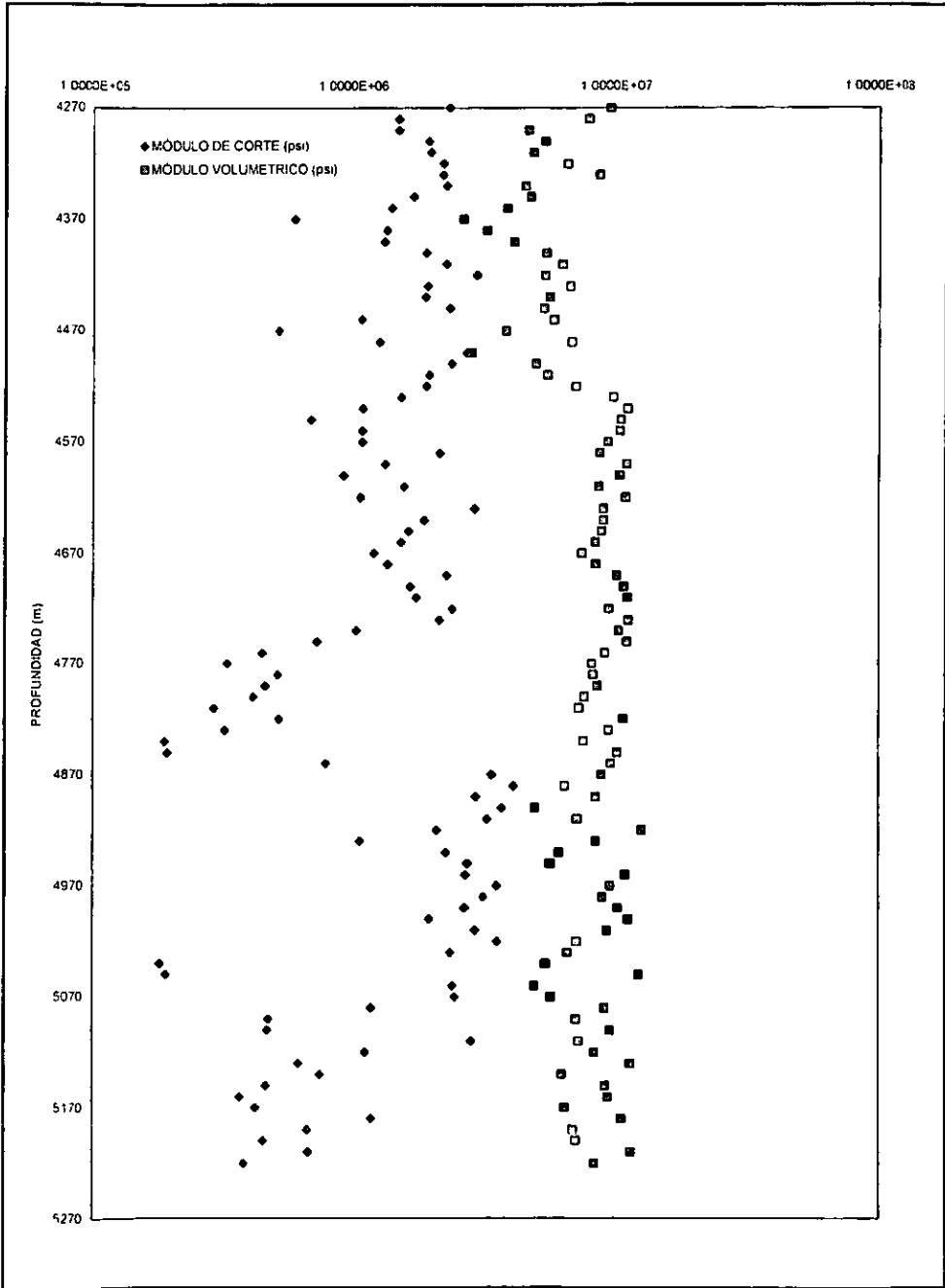


Figura 5.7. Módulo de corte y módulo volumétrico calculados para el intervalo 3.

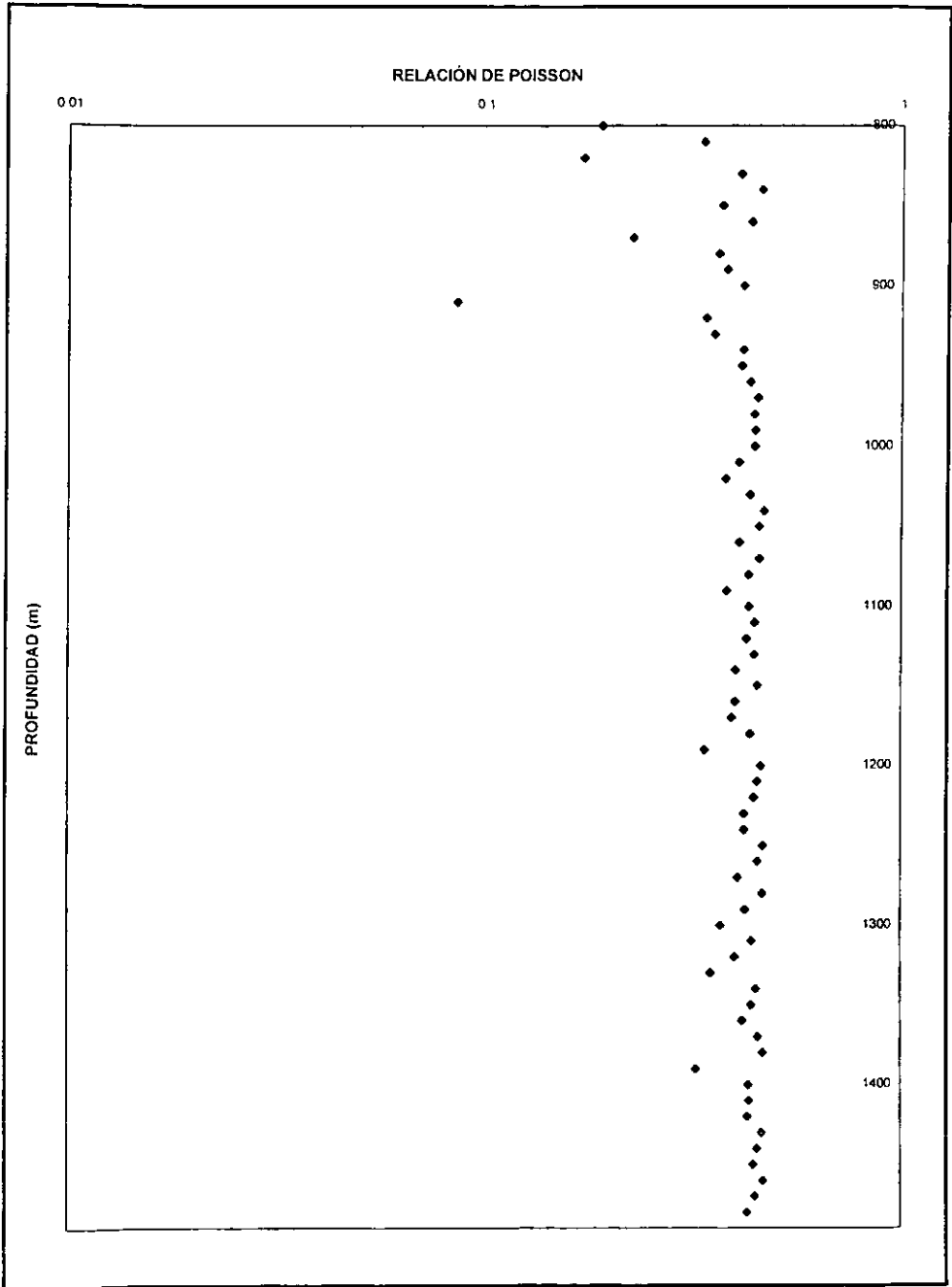


Figura 5.8. Relación de Poisson calculado para el intervalo 1.

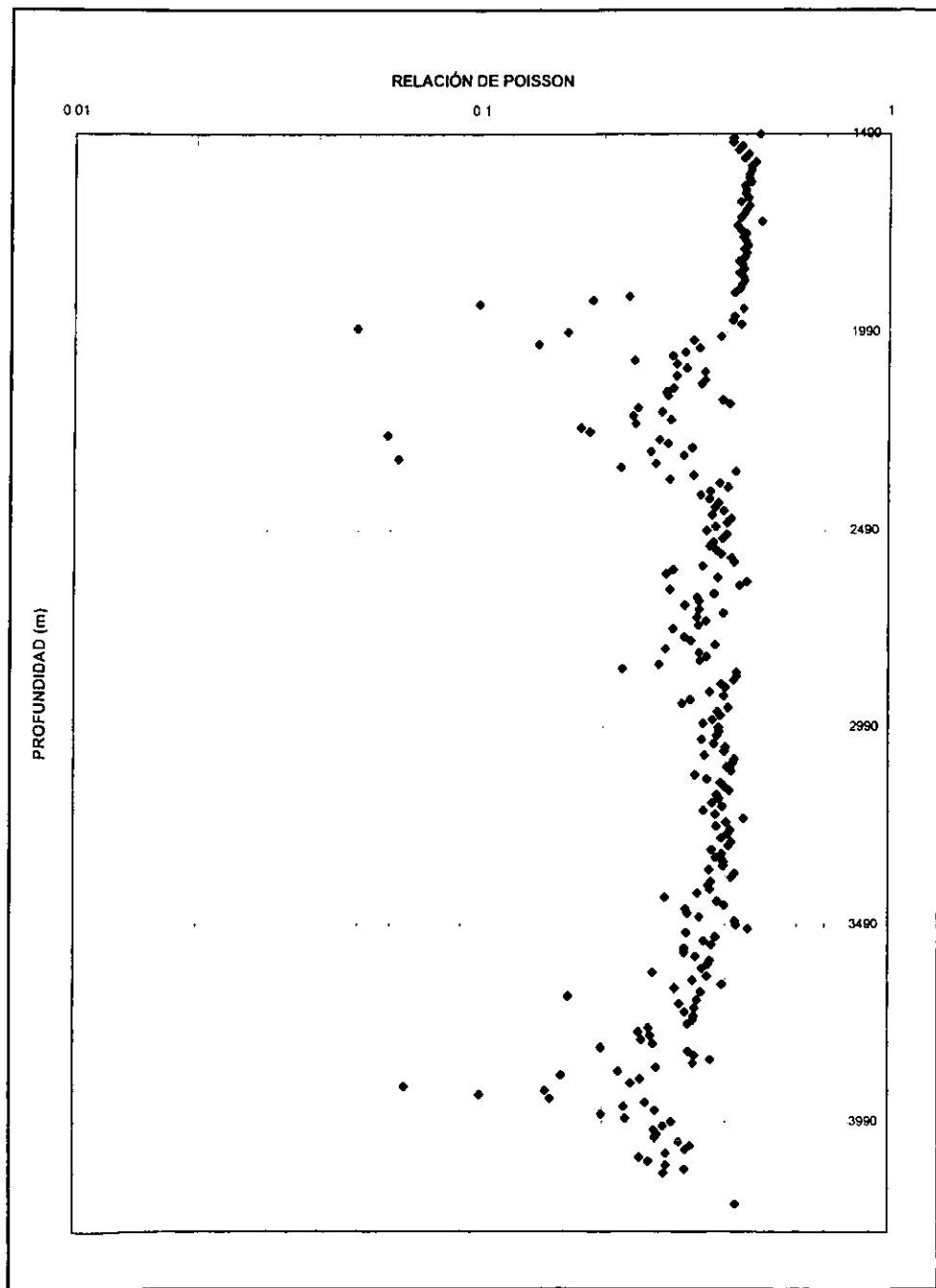


Figura 5.9. Relación de Poisson calculado para el intervalo 2.

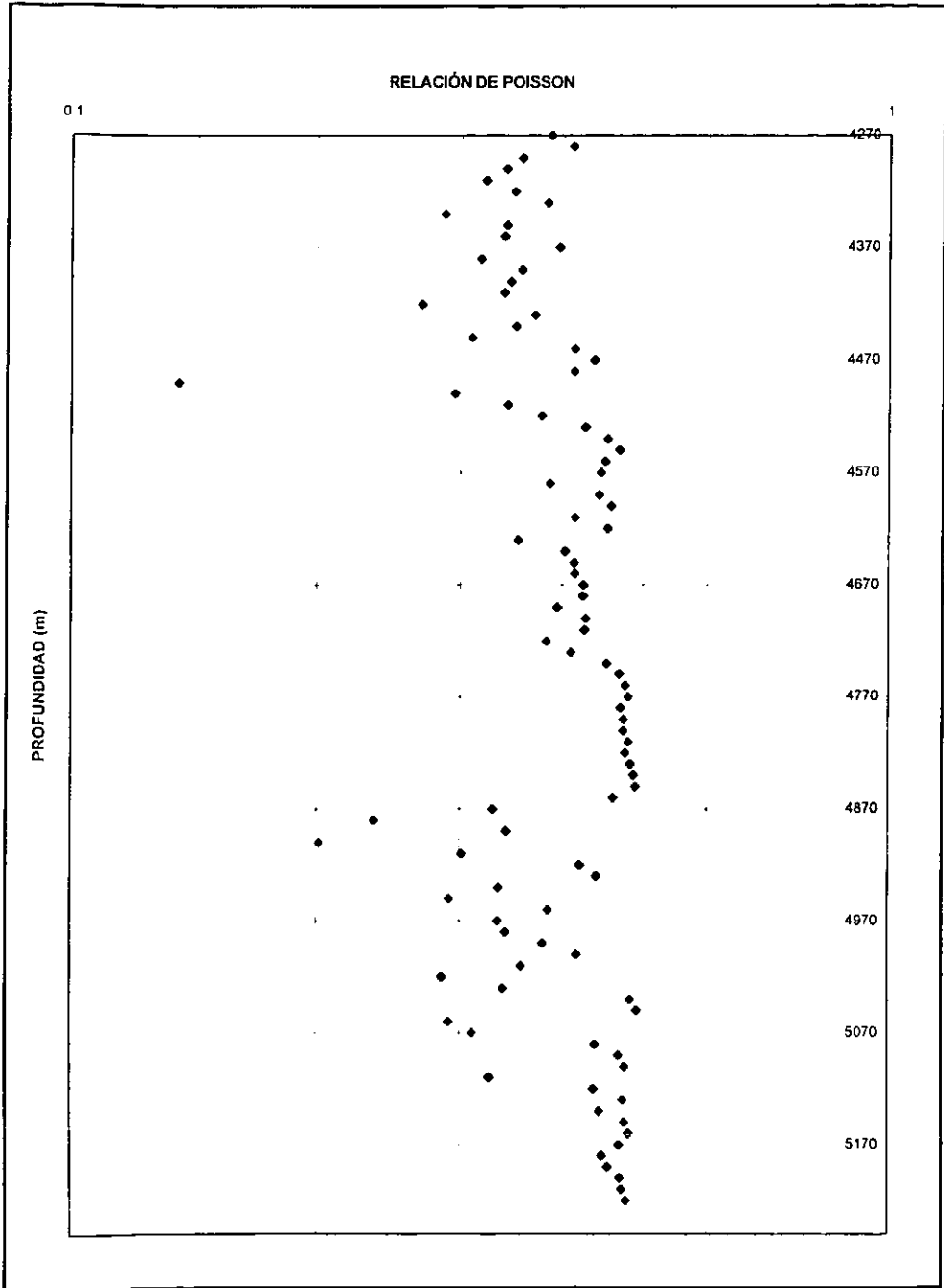


Figura 5.10. Relación de Poisson calculado para el intervalo 3.

V.2 RESULTADOS DE LOS MÓDULOS DE FALLA DE LAS ROCAS

V.2.1 Resistencia a la compresión uniaxial (C_o)

La resistencia a la compresión uniaxial (C_o) es el esfuerzo máximo que una roca puede soportar antes de fallar bajo condiciones uniaxiales de carga. Esta resistencia depende fuertemente de la porosidad de la roca, y disminuye exponencialmente con la porosidad.

En la Figura 5.11 se presentan los resultados obtenidos para la resistencia uniaxial a la compresión (C_o) en función de la profundidad. De esta figura se puede ver que conforme la porosidad disminuye la resistencia aumenta de 500 psi a 5000 psi, la tendencia a disminuir se reduce en la zona de presión anormal debido a la falta de compactación de la roca.

En la Tabla 5.6 se muestran los valores promedios de la resistencia a la compresión uniaxial (C_o) para cada roca sedimentaria. Comparando estos valores con los estimados se puede observar que son similares.

Tabla 5.6. Resistencia a la compresión uniaxial para las rocas sedimentarias ⁽¹⁹⁾

Rocas sedimentarias	Resistencia a la compresión uniaxial (psi)
Dolomía	2133 - 17068 11379 - 35558
Caliza	569 - 28447 4267 - 35558
Arenisca	8534 - 14223 2845 - 24180
Lutita (arcilla)	8534 - 14223 2845 - 24180

La resistencia a la compresión uniaxial se encuentra relacionada con la litología, por lo que en la Tabla 5.7 se muestra la litología que se presente en la formación y concuerda con la litología reportada en el Capítulo IV.

V.2.2 Cohesión (S_o) y resistencia a la tracción (T_o)

La cohesión (S_o) es un parámetro relacionado con el criterio de Mohr-Coulomb (ver Figura 3.11) y representa la resistencia de la cementación de granos que forman la estructura de la roca. La resistencia a la tracción (T_o) representa la

condición de falla bajo esfuerzos tensionales. La cohesión (S_o) es mayor que la resistencia a la tracción (T_o) como puede inferir a partir de las Figuras 5.12 y 5.13. La misma tendencia para estos valores se observa con respecto a la profundidad, ambos aumentan con la profundidad.

Tabla 5.7. Litología presente en la formación de acuerdo a los valores Obtenidos de la resistencia a la compresión uniaxial

Profundidad (m)	Litología
800 - 1600	Caliza
1610 - 1890	No se puede determinar porque la resistencia en este intervalo es muy baja y no entra dentro de los valores de la tabla
1900 - 2840	Caliza
2850 - 4120	Arcilla, caliza, arenisca y dolomía
4200 - 5220	Arcilla, caliza, arenisca y dolomía

En la Tabla 5.8 se presentan los valores promedios tanto de la cohesión (S_o) como de la resistencia a la tracción (T_o) para las rocas sedimentarias.

Comparando los valores de la Tabla 5.8 con los resultados obtenidos se puede observar que los resultados se encuentran entre los límites establecidos. La cohesión (S_o) y la resistencia a la tracción (T_o) están relacionadas con la litología de la formación, por lo que en la Tabla 5.9 se muestra la litología, la cual concuerda con la litología reportada en el Capítulo IV.

Tabla 5.8. Cohesión y resistencia a la tracción para rocas sedimentarias

Rocas sedimentarias	Cohesión (psi)	Resistencia a la tracción (psi)
Dolomía	719 - 5757 3837 - 11993	970 - 7766 5177 - 16178
Caliza	103 - 7404 776 - 9256	75 - 7709 565 - 9636
Arenisca	2259 - 4358 753 - 7409	2392 - 5341 797 - 9081
Lutita (arcilla)	2463 - 5457 821 - 9277	2844 - 8375 948 - 14237

La Tabla 5.8 fue creada con las ecuaciones (3.45 y 3.46) y los valores de las tablas (5.6 y 5.8)

Tabla 4.9. Litología de la formación de acuerdo a los valores obtenidos de la cohesión y resistencia a la tracción

Profundidad (m)	Litología
800 - 1600	Caliza con mezcla de dolomía y arenisca
1610 - 1890	Presencia mínima de caliza
1900 - 2840	Caliza con mezcla de dolomía, arenisca y arcilla
2850 - 4120	Caliza, dolomía, arenisca y arcilla
4200 - 5220	Arenisca, arcilla, caliza y dolomía

V.2.3 Ángulo de fricción interna (Φ)

El ángulo de fricción interna (Φ) es otro parámetro relacionado con el criterio de Mohr-Coulomb. El valor de este ángulo representa la rapidez con que aumenta la resistencia de la roca con el confinamiento aplicado. Usualmente, las rocas presentan ángulos de fricción interna con valores exactos (ver Tabla 4.10). En la Figura 5.14 se muestra como varía la porosidad con la profundidad. Se pueden observar los valores en el rango de 10 a 50° principalmente. Esto concuerda con los rangos reportados en la literatura (ver Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Ángulo de fricción interna para las rocas sedimentarias ⁽¹⁰⁾

Rocas sedimentarias	Ángulo de fricción interna (°)
Dolomía	22
Caliza	35 - 50
Arenisca	27 - 34.2
Lutita (arcilla)	15 - 30

El ángulo de fricción interna (Φ) se encuentra vinculada con la litología, por lo cual en la Tabla 4.10 se muestra la litología presente en la formación y concuerda con la litología reportada en el Capítulo IV.

Tabla 4.11. Litología de la formación de acuerdo a valores obtenidos del ángulo de fricción

Profundidad (m)	Litología
800 - 1960	Arcilla con presencia de dolomía, caliza y arenisca
2000 - 4120	Arcilla, caliza, arenisca y dolomía
4220 - 5220	Arcilla y arenisca con presencia de caliza y dolomía

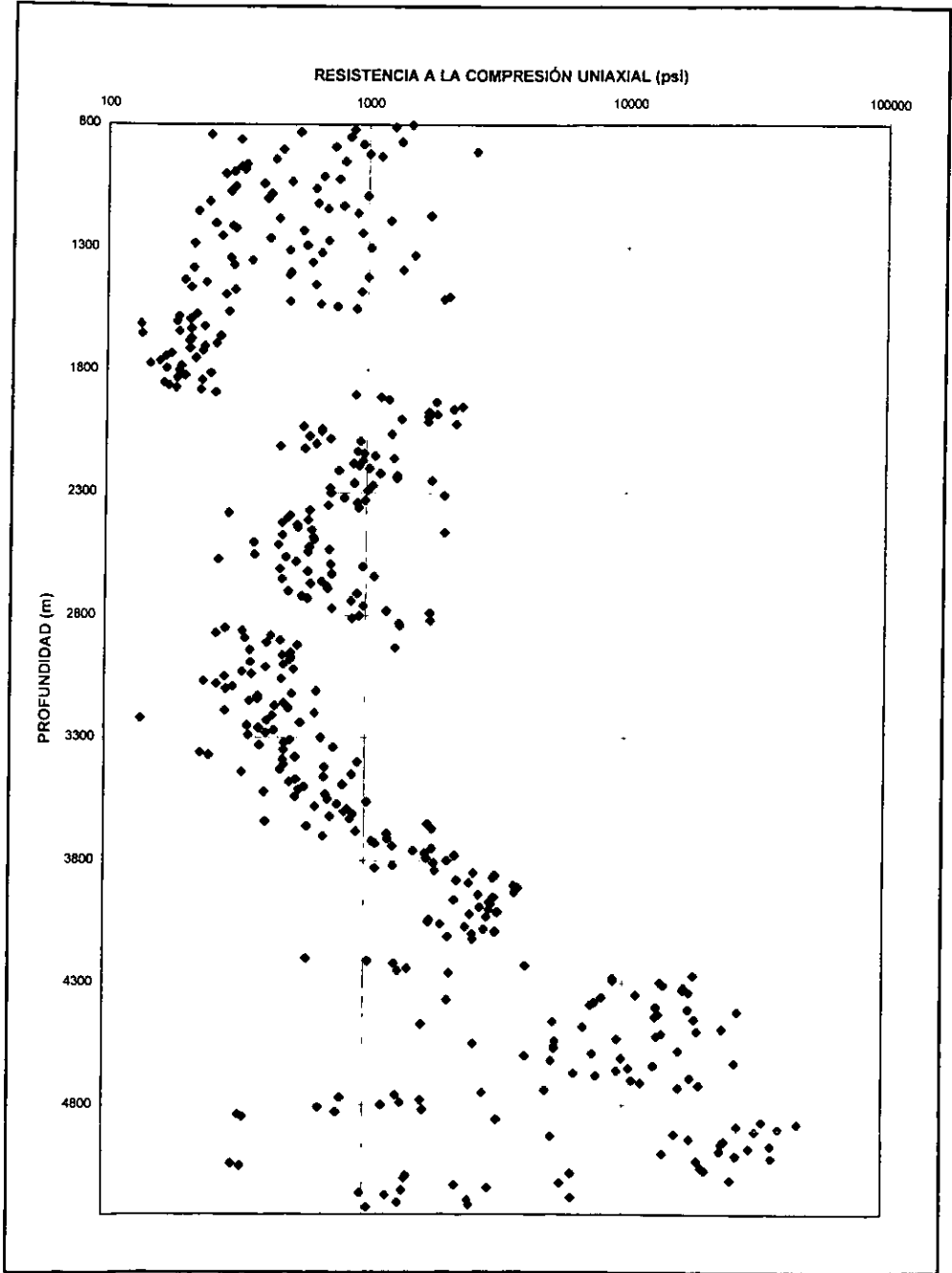


Figura 5.11. Resistencia a la compresión uniaxial calculado para el intervalo total.

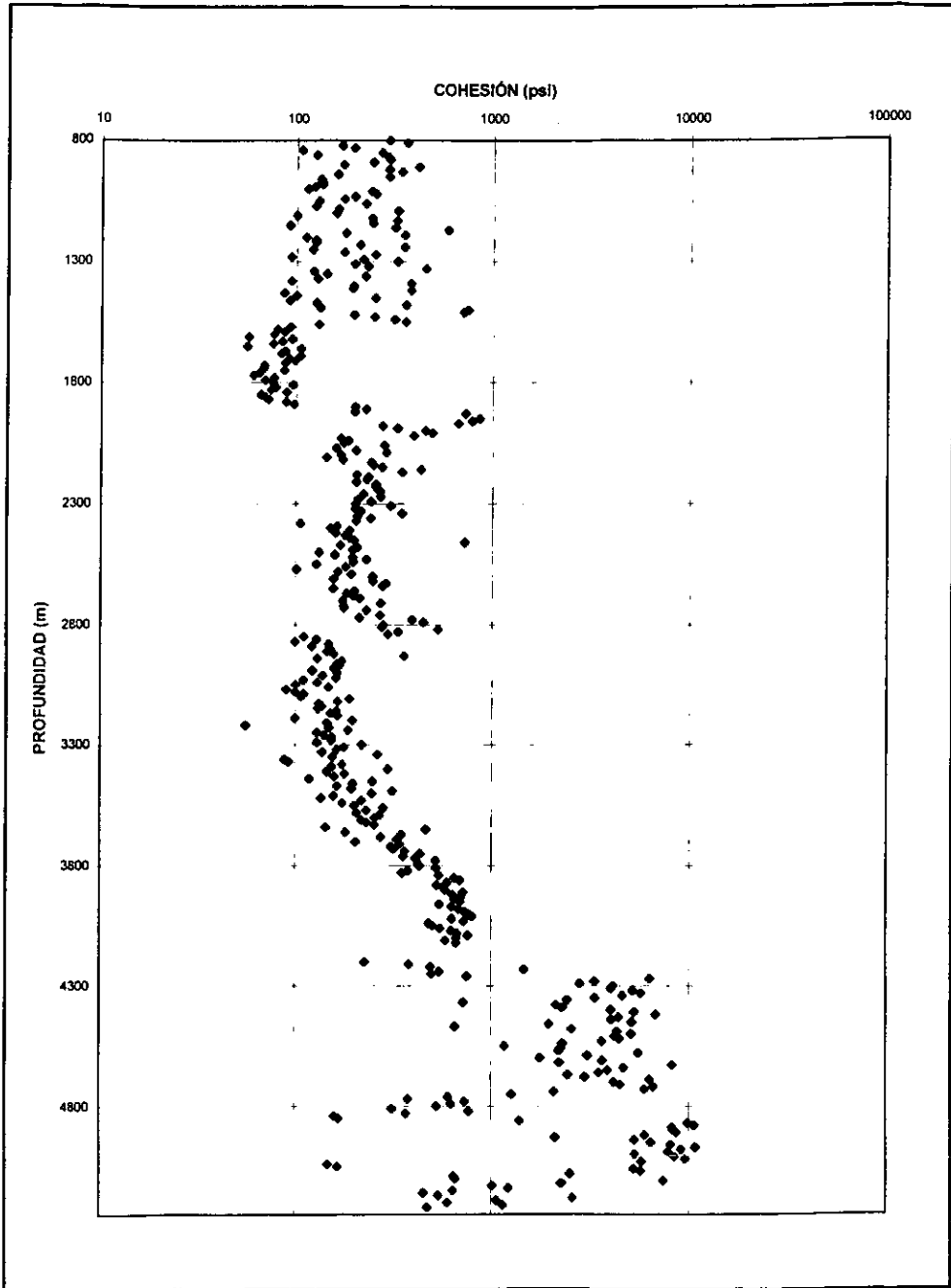


Figura 5.12. Cohesión calculada para el intervalo total.

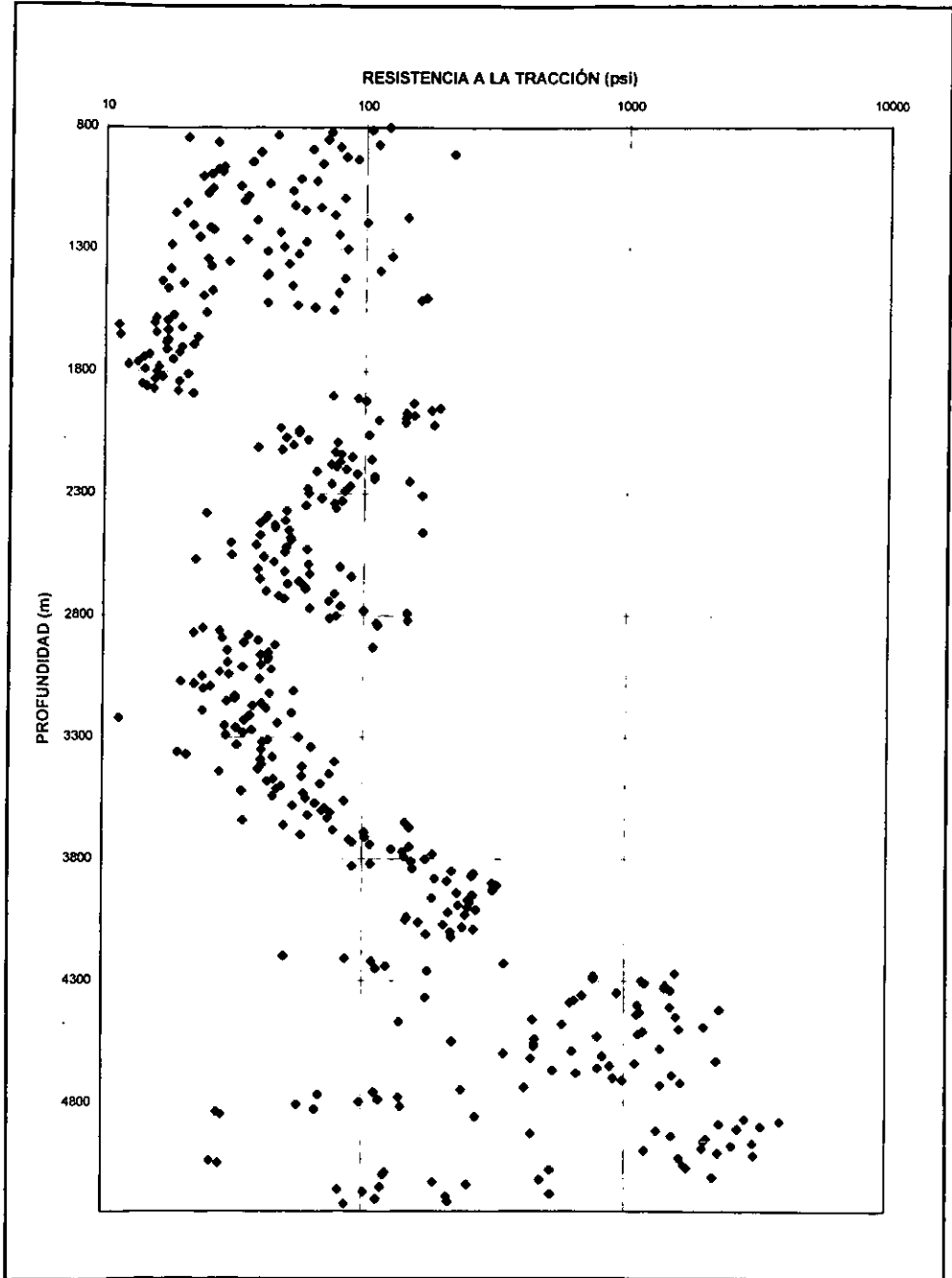


Figura 5.13. Resistencia a la tracción calculada para el intervalo total.

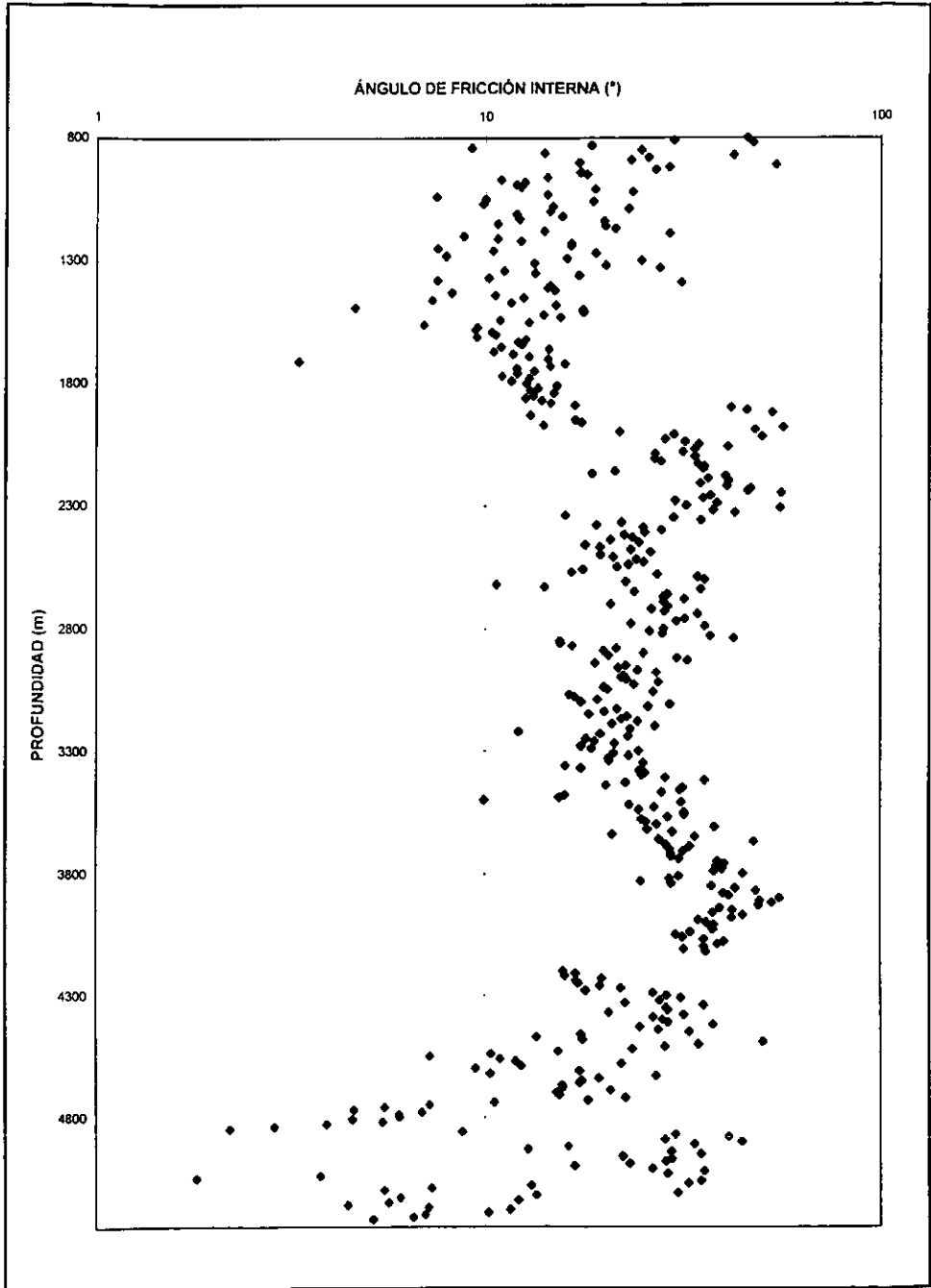


Figura 5.14. Ángulo de fricción interna calculado para el intervalo total.

C A P Í T U L O VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

- ◆ Se integró una metodología para estimar las propiedades mecánicas a partir de registros geofísicos (sónico y densidad). El método incluye el modelo propuesto por Mason para calcular el tiempo de tránsito de cizallamiento (Δt_s) a partir de la composición y porosidad; la metodología se implementó en una hoja de cálculo en excel, la cual nos permite realizar cálculos y gráficos en forma simplificada.
- ◆ Con base en la discusión y análisis de resultado presentado se puede concluir que la metodología establecida es aceptable desde el punto de vista cualitativo y hasta cierto punto cuantitativo. Los parámetros elasto-dinámicos aumenta con la compactación de la roca y su magnitud concuerda con la información tabulada obtenida de referencias de mecánica de rocas.
- ◆ Las propiedades de falla o resistencia mecánica (resistencia a la compresión uniaxial, cohesión y resistencia a la tracción) también aumentan con la compactación de la roca y su magnitud es cercana a valores reportados en varias referencias.

RECOMENDACIONES:

- ◆ El presente estudio no incluyó la validación detallada de resultados, por lo que se recomienda obtener información de pruebas mecánicas de núcleos y compararlas con los resultados obtenidos, para así poder evaluar y/o calibrar el programa de cómputo.
- ◆ Realizar estudios para definir la utilidad de los resultados de las propiedades mecánicas en áreas tales como fracturamiento hidráulico, selección de barrenas, estabilidad de pozos, etc.
- ◆ Buscar alternativas para substituir el modelo de Mason, que aunque se considera aceptable está limitada, ya que se requiere conocer la composición de la roca, lo cual no esta disponible en condiciones normales de campo.

APÉNDICE A

Registros geofísicos del pozo

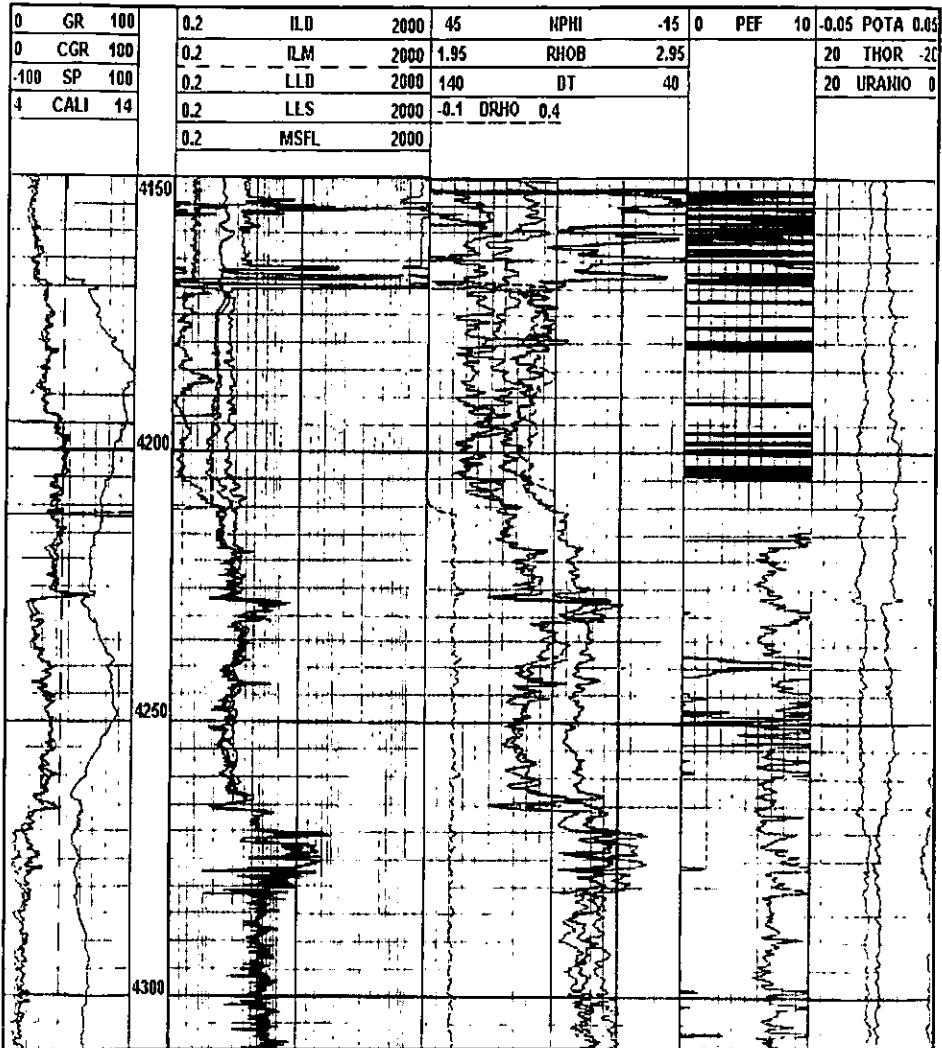


Gráfico A.1. Registros que determinan la matriz de la roca.

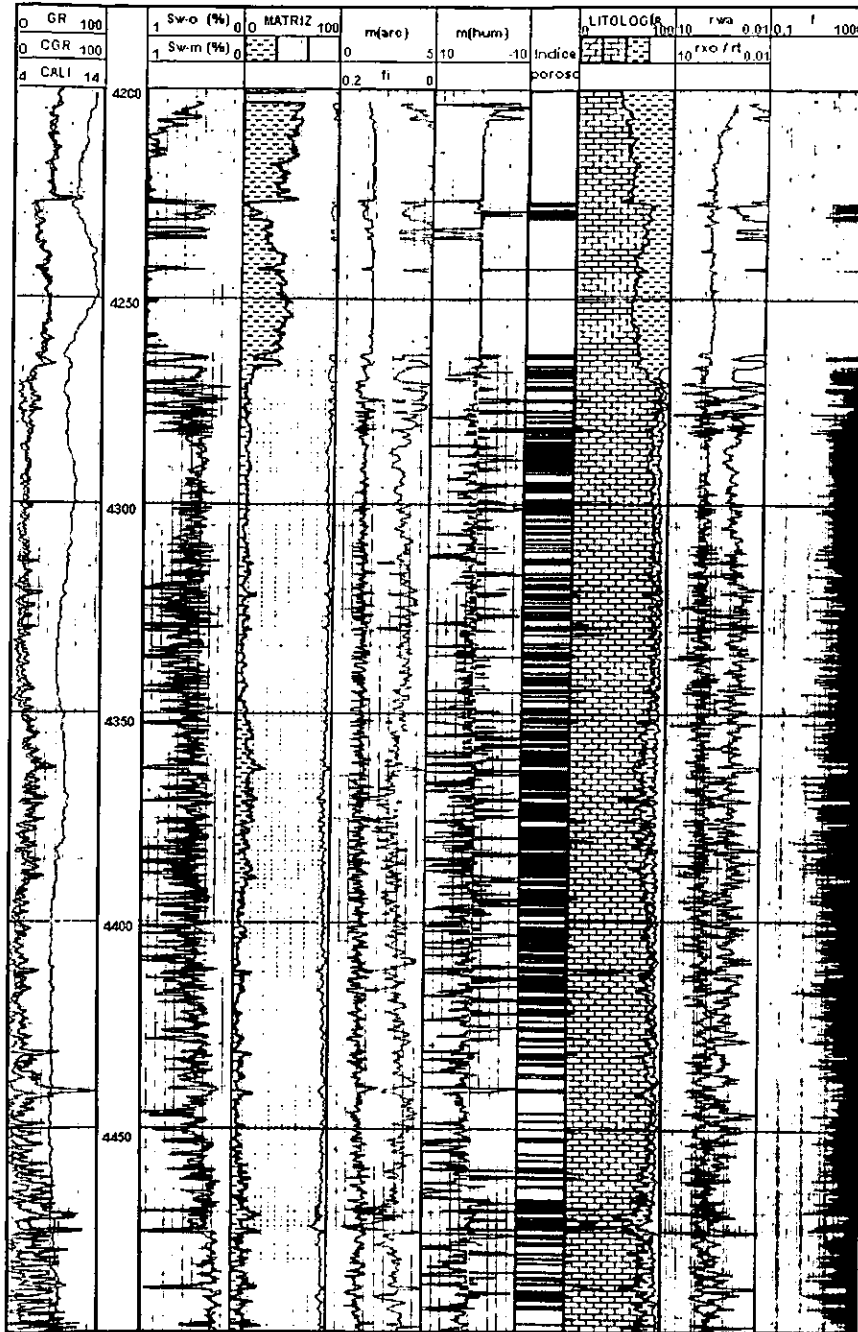


Gráfico A.2 Registros de litología del pozo.

APÉNDICE B

Tendencia normal del gráfico

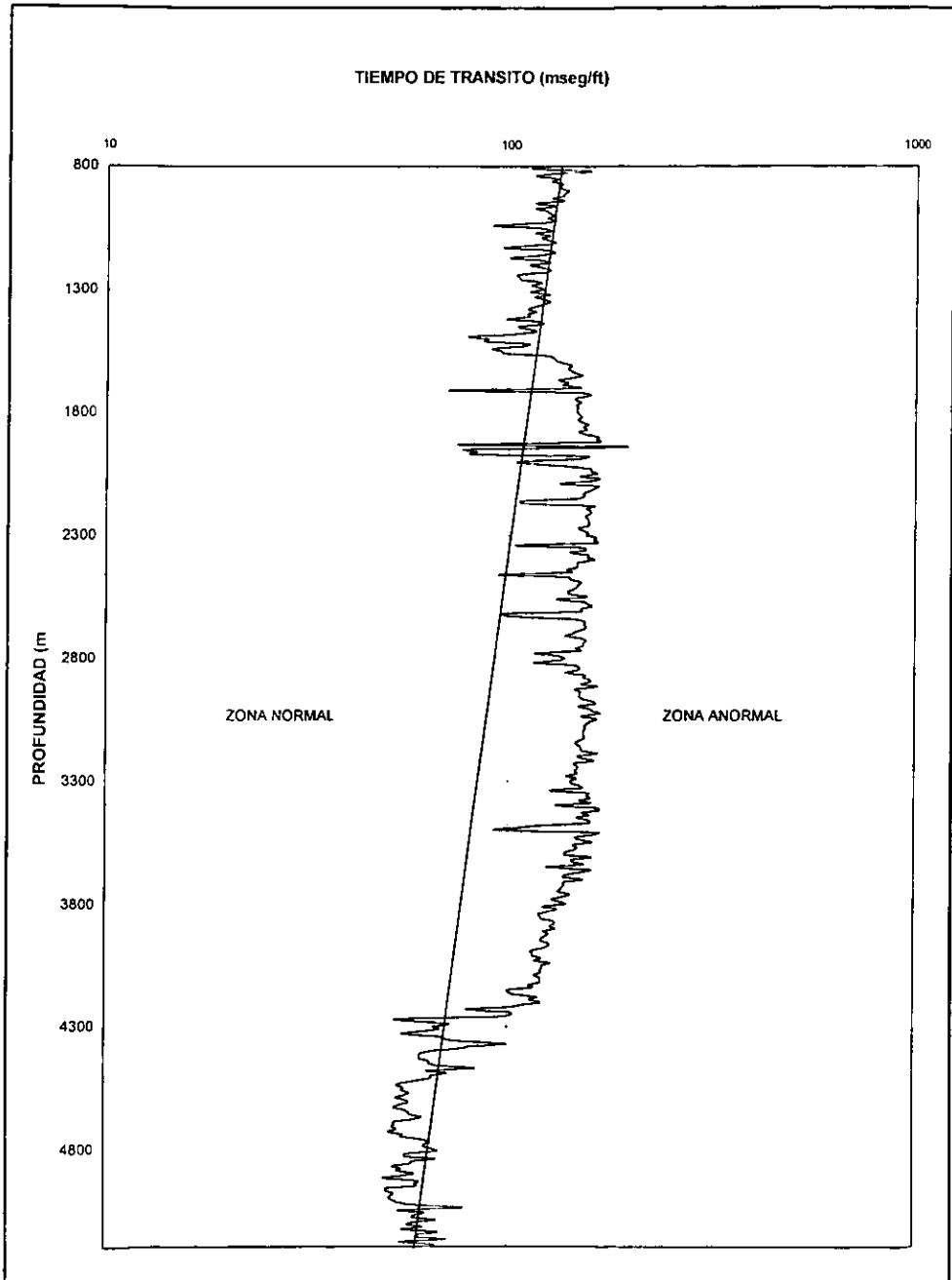


Figura B.1. Gráfica del tiempo de tránsito contra la profundidad mostrando la tendencia normal.

APÉNDICE C

Tabla del método de Mason

Tabla C.1. Velocidades de sonido para varias litologías

Litología de la formación	Relación ($\Delta t_s \Delta t_c$)	Velocidad en la matriz (ft seg)	Tiempo de tránsito en la matriz ($\mu\text{seg ft}$)
Anhidrita	2.45	20 000	50
Basalto	1.55	20 150	49.6
Carbonato de cal ferroso	2.45	8 500	117.6
Horsteno, lidita, perdenal	1.6	22 300	44.8
Arcilla	3.2	6 000	166.6
Arcillita, argilolita	1.9	19 000	52.6
Diabasa	1.7	22 700	44
Diorita	1.75	22 000	45.4
Dolomía	1.8	25 000	40
Epidota	1.7	23 000	43.4
Gabro	1.6	23 500	42.5
Gneiss	1.8	25 000	40
Granito	1.7	21 350	46.8
Yeso	2.45	19 050	52.4
Hornsteno	1.85	25 000	40
Caliza pura	1.9	21 000	47.6
Caliza limosa	2.1	21 000	47.6
Caliza arcillosa	2.3	21 000	47.6
Mármol	1.8	24 000	41.6
Lodolita	1.85	19 000	52.6
Pirita	1.7	28 000	35.7
Cuarzo	1.55	20 000	50
Cuarcita	1.5	21 500	46.5
Sal	2.15	15 000	66.6
Arenisca pura	1.6	19 500	51.2
Arenisca limosa	1.7	19 500	51.2
Arenisca arcillosa	1.85	19 500	51.2
Lutita	1.70 a 1.75	19 500	51.2
Limolita	1.8	23 000	43.4

APÉNDICE D

Hoja de cálculo en Excel

Tabla D.1. Información necesaria para la determinación de las propiedades

Profundidad	Información del pozo						Porosidad
	Tiempo de tránsito composicional de la mezcla	RHO _B	Vcal	Varc	Varen	Vdol	
800 10	125 900	1 4710	0 000	0 200	0 568	0 000	0 232
810 16	113 719	1 8710	0 000	0 245	0 535	0 000	0 219
820 22	158 700	1 6420	0 000	0 233	0 397	0 000	0 371
830 28	128 538	2 0510	0 000	0 431	0 372	0 000	0 197
840 03	115 300	2 0400	0 000	0 517	0 184	0 000	0 299
850 09	151 400	2 1080	0 438	0 336	0 000	0 000	0 227
860 15	128 800	1 8830	0 000	0 465	0 272	0 000	0 283
870 20	134 800	1 7770	0 000	0 215	0 475	0 000	0 311
880 26	132 200	2 1980	0 471	0 349	0 000	0 000	0 181
890 02	134 300	2 1590	0 430	0 383	0 000	0 000	0 168
900 07	139 561	2 3560	0 125	0 552	0 209	0 000	0 115
910 13	138 204	2 0900	0 617	0 151	0 000	0 000	0 192
920 19	135 422	2 1160	0 020	0 313	0 433	0 000	0 254
930 25	126 915	2 1440	0 506	0 318	0 000	0 000	0 178
940 00	135 838	2 1250	0 000	0 488	0 321	0 000	0 193
950 06	114 900	2 1560	0 442	0 364	0 000	0 000	0 194
960 12	133 300	2 0030	0 229	0 424	0 000	0 000	0 334
970 18	115 000	2 0110	0 214	0 448	0 000	0 000	0 307
980 24	123 013	2 0470	0 000	0 498	0 282	0 000	0 239
990 30	125 518	2 1030	0 230	0 498	0 000	0 000	0 271
1000 05	128 600	2 0540	0 000	0 513	0 218	0 000	0 271
1010 11	123 332	2 1040	0 390	0 367	0 000	0 000	0 244
1020 17	130 100	2 0510	0 000	0 372	0 434	0 000	0 164
1030 22	116 500	2 0750	0 225	0 378	0 004	0 000	0 311
1040 28	90 444	2 0840	0 000	0 451	0 287	0 000	0 287
1050 04	116 535	2 1930	0 041	0 560	0 190	0 000	0 209
1060 09	126 425	2 1300	0 388	0 398	0 000	0 000	0 214
1070 15	118 160	2 1150	0 168	0 512	0 075	0 000	0 287
1080 21	125 810	2 0300	0 303	0 441	0 000	0 000	0 258
1090 27	119 061	2 0530	0 000	0 328	0 484	0 000	0 210
1100 02	124 867	2 0490	0 289	0 421	0 000	0 000	0 281
1110 08	129 443	1 9560	0 000	0 470	0 182	0 000	0 349
1120 14	116 300	2 1830	0 395	0 411	0 000	0 000	0 194
1130 20	95 900	2 2060	0 444	0 382	0 000	0 000	0 174
1140 26	123 200	2 0380	0 400	0 348	0 000	0 000	0 252
1150 01	129 400	2 0530	0 060	0 542	0 101	0 000	0 227
1160 07	119 400	2 2390	0 467	0 369	0 000	0 000	0 163
1170 13	99 900	2 2120	0 590	0 271	0 000	0 000	0 138
1180 19	118 000	2 0600	0 319	0 420	0 000	0 000	0 261
1190 24	126 000	2 0530	0 504	0 290	0 000	0 000	0 216
1200 30	111 660	2 0580	0 127	0 504	0 000	0 000	0 302
1210 06	119 500	2 1160	0 162	0 508	0 083	0 000	0 288
1220 11	126 227	2 0950	0 000	0 510	0 233	0 000	0 257
1230 17	121 012	2 0730	0 348	0 374	0 000	0 000	0 260
1240 23	104 027	2 1160	0 475	0 336	0 000	0 000	0 150
1250 29	105 439	2 2180	0 151	0 598	0 057	0 000	0 198
1260 04	106 511	2 1250	0 302	0 457	0 000	0 000	0 241
1270 10	120 023	2 0430	0 399	0 345	0 000	0 000	0 255
1280 16	112 828	2 0520	0 011	0 553	0 000	0 000	0 291
1290 22	116 959	2 0230	0 361	0 360	0 000	0 000	0 273
1300 28	121 033	2 0540	0 450	0 278	0 000	0 000	0 273
1310 03	111 800	2 0420	0 000	0 407	0 328	0 000	0 268
1320 09	125 895	2 0380	0 385	0 351	0 000	0 000	0 283
1330 15	114 545	2 0570	0 543	0 254	0 000	0 000	0 203
1340 21	121 435	2 0790	0 160	0 488	0 049	0 000	0 293
1350 26	125 643	2 0890	0 000	0 480	0 263	0 000	0 258
1360 02	120 700	2 0710	0 377	0 379	0 000	0 000	0 244
1370 08	115 400	2 0950	0 139	0 493	0 087	0 000	0 281
1380 13	110 954	2 0950	0 000	0 517	0 159	0 000	0 223
1390 19	116 100	1 7420	0 000	0 225	0 406	0 000	0 287
1400 25	110 400	1 8230	0 000	0 384	0 348	0 000	0 287
1410 01	112 058	1 8930	0 000	0 369	0 330	0 000	0 301
1420 06	97 900	2 1340	0 477	0 376	0 000	0 000	0 197
1430 12	116 800	2 0360	0 142	0 559	0 000	0 000	0 299
1440 18	121 318	1 9210	0 178	0 441	0 000	0 000	0 380
1450 24	105 338	2 2270	0 409	0 445	0 000	0 000	0 145
1460 30	109 700	2 0690	0 153	0 590	0 000	0 000	0 257
1470 05	116 300	1 8770	0 239	0 407	0 000	0 000	0 354
1480 11	103 634	2 2440	0 488	0 374	0 000	0 000	0 139
1490 17	128 900	2 0760	0 112	0 397	0 105	0 000	0 291
1500 23	88 775	2 3480	0 034	0 378	0 000	0 000	0 086
1510 28	86 000	2 1660	0 618	0 250	0 000	0 000	0 134
1520 04	111 800	1 9400	0 000	0 392	0 341	0 000	0 287
1530 10	108 300	1 9440	0 000	0 397	0 435	0 000	0 167
1540 15	90 507	2 1370	0 427	0 368	0 000	0 000	0 207
1550 21	95 200	2 2100	0 487	0 379	0 000	0 000	0 134
1560 27	97 188	2 1260	0 246	0 575	0 000	0 000	0 178
1570 03	125 196	2 1500	0 146	0 560	0 000	0 000	0 293
1580 08	129 056	2 1000	0 117	0 575	0 000	0 000	0 308
1590 14	131 000	2 0920	0 138	0 538	0 000	0 000	0 324
1600 20	137 047	2 0830	0 131	0 380	0 000	0 000	0 300
1610 26	143 303	2 0750	0 038	0 824	0 000	0 000	0 337
1620 01	139 684	2 1130	0 169	0 519	0 000	0 000	0 292
1630 07	141 867	2 1060	0 140	0 553	0 000	0 000	0 306
1640 13	145 800	2 0440	0 125	0 553	0 000	0 000	0 321
1650 19	151 800	2 0370	0 050	0 647	0 000	0 000	0 302
1660 25	142 300	2 0780	0 197	0 484	0 000	0 000	0 370

Tabla D.2. Cálculo del tiempo de tránsito de cizallamiento por el método de Mason

Determinación del tiempo de tránsito de cizallamiento					
Suma de los volúmenes de cizalla	Corrección del volumen de cizalla	Corrección del volumen de arena	Corrección del volumen de arcilla	Corrección del volumen de dolomita	Tiempo de tránsito de cizallamiento de la mezcla
0.788	0.00000000	0.280416267	0.739583733	0	203.2066637
0.780	0.00000000	0.314102564	0.685897436	0	227.1548719
0.630	0.00000000	0.36941270	0.630587300	0	252.0187937
0.803	0.00000000	0.536737235	0.463262765	0	328.4677450
0.701	0.00000000	0.737517832	0.262482168	0	416.0318644
0.772	0.564762833	0.435233161	0.000000000	0	238.4255559
0.737	0.00000000	0.630592628	0.369407372	0	368.4880328
0.630	0.00000000	0.311594203	0.688405797	0	228.0359420
0.620	0.57430244	0.425907596	0.000000000	0	234.3171220
0.813	0.538552689	0.471088711	0.000000000	0	334.0193530
0.803	0.149335221	0.623024831	0.233853168	0	368.7811260
0.824	0.783613261	0.235383133	0.000000000	0	202.3530189
0.748	0.00000000	0.418571048	0.580428954	0	274.2022520
0.824	0.614077870	0.385923330	0.000000000	0	287.1261165
0.807	0.00000000	0.622234343	0.377763517	0	355.0429743
0.808	0.548387097	0.451612903	0.000000000	0	295.5306452
0.626	0.363383363	0.636636637	0.000000000	0	375.7255255
0.632	0.352401156	0.647598844	0.000000000	0	320.3372930
0.760	0.00000000	0.655233158	0.344736342	0	370.3797225
0.728	0.315934066	0.664055934	0.000000000	0	396.2700000
0.723	0.00000000	0.703703704	0.296296296	0	400.9431481
0.757	0.513101546	0.484692544	0.000000000	0	321.0592301
0.806	0.00000000	0.461538862	0.538461538	0	382.8230769
0.600	0.330434783	0.547829387	0.121738130	0	315.8843783
0.743	0.00000000	0.615279573	0.384720427	0	361.5003663
0.781	0.051833123	0.707864602	0.292022778	0	403.5185335
0.780	0.493633877	0.506381323	0.000000000	0	310.2864707
0.733	0.159181446	0.688429318	0.122319236	0	401.2300000
0.744	0.407258095	0.592741065	0.000000000	0	358.7120688
0.700	0.00000000	0.412658228	0.587341772	0	271.1185823
0.710	0.407042254	0.592957746	0.000000000	0	358.8055775
0.662	0.00000000	0.720658838	0.279141104	0	408.6007362
0.808	0.490074442	0.508925558	0.000000000	0	320.8333548
0.768	0.337330226	0.462423734	0.000000000	0	320.2833538
0.748	0.534745938	0.465202642	0.000000000	0	301.4829384
0.703	0.085485008	0.770881508	0.143663888	0	432.0521357
0.830	0.558812440	0.441387560	0.000000000	0	291.1514354
0.801	0.665249710	0.314750260	0.000000000	0	236.2972358
0.738	0.431684411	0.568335589	0.000000000	0	348.1402436
0.784	0.642857143	0.357142857	0.000000000	0	254.6600000
0.637	0.182219459	0.723780541	0.094231535	0	411.6541463
0.733	0.221009550	0.639042322	0.065348159	0	350.0477430
0.743	0.00000000	0.666046480	0.313593540	0	393.2321836
0.720	0.486555556	0.519444444	0.000000000	0	324.9625566
0.811	0.368369711	0.414033289	0.000000000	0	279.4186301
0.804	0.187810545	0.744293335	0.070895622	0	426.7427483
0.709	0.397891583	0.602198037	0.000000000	0	360.7651173
0.744	0.538280323	0.463719677	0.000000000	0	300.8204810
0.709	0.100141644	0.782782656	0.117066291	0	437.5218748
0.727	0.496561210	0.503438790	0.000000000	0	318.0295461
0.728	0.618131868	0.381868132	0.000000000	0	265.3700000
0.733	0.00000000	0.552523287	0.444747613	0	334.7289850
0.730	0.523097826	0.476902174	0.000000000	0	306.5349457
0.797	0.681304833	0.318636107	0.000000000	0	238.0059724
0.708	0.254957507	0.688386289	0.056657224	0	397.4088518
0.743	0.00000000	0.64020810	0.353970390	0	375.2208883
0.758	0.438872349	0.501327651	0.000000000	0	317.1228630
0.719	0.193324021	0.655074938	0.131001351	0	336.4034492
0.776	0.00000000	0.795103393	0.204896807	0	441.7188876
0.713	0.00000000	0.312762973	0.687237027	0	228.5573072
0.712	0.00000000	0.511235955	0.488764045	0	315.0921546
0.699	0.00000000	0.578868996	0.421200004	0	322.5242818
0.803	0.594022416	0.405977584	0.000000000	0	275.8132503
0.701	0.202587780	0.797432240	0.000000000	0	445.3757489
0.620	0.288708677	0.711290223	0.000000000	0	408.0825181
0.854	0.478922717	0.521077283	0.000000000	0	325.6680361
0.743	0.206321938	0.794078062	0.000000000	0	443.8228533
0.686	0.369390860	0.630609140	0.000000000	0	372.8642195
0.809	0.366136330	0.433874710	0.000000000	0	292.8976984
0.703	0.157928370	0.700387330	0.141043724	0	431.7773168
0.914	0.898000635	0.301999365	0.000000000	0	230.7610503
0.858	0.711318397	0.288681603	0.000000000	0	225.0081884
0.733	0.00000000	0.534788540	0.465211460	0	325.0948720
0.832	0.00000000	0.477163482	0.522836518	0	299.8930769
0.793	0.508461538	0.461538462	0.000000000	0	299.8800000
0.858	0.562359558	0.437644342	0.000000000	0	289.5300231
0.821	0.299634592	0.700365408	0.000000000	0	403.3302801
0.706	0.206798867	0.793201133	0.000000000	0	443.5430028
0.692	0.163075145	0.836724855	0.000000000	0	459.8834104
0.676	0.261483012	0.738516988	0.000000000	0	441.6930662
0.697	0.167862579	0.832177733	0.000000000	0	460.8697895
0.682	0.057401813	0.942598187	0.000000000	0	508.2583308
0.708	0.282700565	0.761729435	0.000000000	0	429.7244633
0.693	0.202020202	0.797979798	0.000000000	0	445.6128293
0.678	0.184365782	0.815634218	0.000000000	0	453.2601180
0.697	0.071732011	0.928267989	0.000000000	0	507.0468293
0.681	0.281280470	0.718719530	0.000000000	0	407.8152717

Tabla D.3. Estimación de los módulos elasto-dinámicos de la roca

Determinación de los módulos elasto-dinámicos				
Módulos de elasticidad	Módulos de Poisson	Módulos de Poisson	Módulos de Poisson	Consumo eléctrico
4.7736E+05	6.07684E+05	0.163492981	1.13487E+06	2.88548E+05
4.3356E+05	1.15287E+06	0.33278567	1.15871E+06	8.63576E+05
3.4843E+05	4.11720E+05	0.171443422	8.11640E+05	1.80769E+06
2.5789E+05	1.31987E+06	0.408274701	7.28285E+05	1.14777E+06
1.5794E+05	1.84567E+06	0.458400879	4.60659E+05	1.74039E+06
3.3557E+05	1.18402E+06	0.369113940	9.28828E+05	8.57635E+05
1.6583E+05	1.36533E+06	0.433682362	5.32610E+05	1.20255E+06
4.5032E+05	6.69520E+05	0.225290187	1.10354E+06	3.63038E+05
3.6436E+05	1.19948E+06	0.362081681	8.82556E+05	9.56575E+05
3.1307E+05	1.18666E+06	0.378772948	8.63133E+05	9.77989E+05
2.5877E+05	1.13938E+06	0.413354152	6.84289E+05	1.15154E+06
6.1832E+05	5.87639E+05	0.035814630	7.48317E+05	1.44717E+06
3.7748E+05	1.04291E+06	0.335510584	1.01051E+06	7.81252E+05
4.0282E+05	1.74680E+06	0.354228735	1.09048E+06	8.78830E+05
2.2508E+05	1.24309E+06	0.414850430	6.35807E+05	1.09304E+06
3.3068E+05	1.74743E+06	0.410998775	9.33163E+05	1.52698E+06
1.0250E+05	1.34394E+06	0.431645568	5.51184E+05	1.21560E+06
1.8824E+05	1.78302E+06	0.449703157	5.33375E+05	1.66514E+06
1.1062E+05	1.56852E+06	0.441241702	5.45456E+05	1.43144E+06
1.7946E+05	1.54940E+06	0.442408335	5.18360E+05	1.42976E+06
1.7121E+05	1.43599E+06	0.442664704	4.93097E+05	1.32185E+06
2.8345E+05	1.46226E+06	0.405948590	8.25163E+05	1.26662E+06
3.2032E+05	1.13956E+06	0.377130362	8.02203E+05	9.83725E+05
2.4875E+05	1.71085E+06	0.431530154	7.08470E+05	1.33518E+06
2.1184E+05	3.08890E+06	0.462813128	6.20775E+05	2.89781E+06
1.8047E+05	1.82329E+06	0.454503528	5.25002E+05	1.80282E+06
2.8101E+05	1.41776E+06	0.407037540	7.00793E+05	1.23042E+06
1.7607E+05	1.90450E+06	0.455156379	5.12428E+05	1.78712E+06
2.1899E+05	1.47521E+06	0.428367800	8.28724E+05	1.32855E+06
3.7428E+05	1.44187E+06	0.380538170	1.03336E+06	1.19216E+06
2.1507E+05	1.47341E+06	0.430218478	8.16302E+05	1.32863E+06
1.5698E+05	1.35822E+06	0.444220475	4.63460E+05	1.25026E+06
2.8417E+05	1.78382E+06	0.424363287	8.09532E+05	1.59437E+06
3.2783E+05	2.77710E+06	0.443210851	9.48253E+05	2.58584E+06
3.0548E+05	1.36842E+06	0.359780290	8.41113E+05	1.16823E+06
1.4737E+05	1.44640E+06	0.430192588	4.27581E+05	1.34829E+06
3.5838E+05	1.63280E+06	0.388200415	9.80240E+05	3.96840E+06
5.3085E+05	2.26222E+06	0.381181866	1.47702E+06	1.90832E+06
2.3638E+05	1.64211E+06	0.432882855	6.60296E+05	1.48851E+06
4.2420E+05	1.16721E+06	0.333016973	1.13510E+06	8.84414E+05
1.6250E+05	1.98756E+06	0.460039273	4.74629E+05	1.85230E+06
1.7806E+05	1.74815E+06	0.450743782	5.16644E+05	1.62944E+06
1.8158E+05	1.51985E+06	0.442581482	5.29787E+05	1.36882E+06
2.6305E+05	1.54818E+06	0.419500738	7.48798E+05	1.37081E+06
3.8317E+05	2.13394E+06	0.419548325	1.03107E+06	1.83838E+06
1.6322E+05	2.44636E+06	0.462310490	4.13357E+05	2.33450E+06
2.1878E+05	2.21830E+06	0.423257319	6.32546E+05	2.07245E+06
3.0255E+05	1.78703E+06	0.420335795	8.20335E+05	1.28338E+06
1.4434E+05	1.98578E+06	0.464815393	4.22783E+05	1.88953E+06
2.6902E+05	1.62398E+06	0.421783787	7.62138E+05	1.44303E+06
3.8133E+05	1.32470E+06	0.365871363	1.04383E+06	1.07044E+06
2.4422E+05	1.68353E+06	0.437416827	7.01991E+05	1.70072E+06
2.1004E+05	1.33651E+06	0.398548747	8.12836E+05	1.14176E+06
4.8690E+05	1.45202E+06	0.349280076	1.31309E+06	1.12785E+06
1.7835E+05	1.65398E+06	0.448506441	5.11018E+05	1.53638E+06
1.9882E+05	1.60814E+06	0.436457845	5.71304E+05	1.37598E+06
2.7597E+05	1.53694E+06	0.415291736	7.81147E+05	1.35296E+06
1.7866E+05	1.86882E+06	0.453445205	5.21958E+05	1.74891E+06
1.4388E+05	2.06204E+06	0.468932001	4.21984E+05	1.99672E+06
4.5834E+05	1.12871E+06	0.321834413	1.20651E+06	8.25045E+05
2.4805E+05	1.87653E+06	0.430028422	7.03708E+05	1.51716E+06
2.4385E+05	1.66902E+06	0.433359011	6.98088E+05	1.53425E+06
3.7559E+05	2.48236E+06	0.427824345	1.07351E+06	2.23178E+06
1.7544E+05	1.82333E+06	0.463208308	4.02500E+05	1.75183E+06
1.5459E+05	1.54281E+06	0.461522333	4.48778E+05	1.43885E+06
2.8136E+05	2.31424E+06	0.441577825	8.11218E+05	2.12667E+06
1.4198E+05	2.13563E+06	0.487481305	4.16699E+05	2.04104E+06
1.8091E+05	1.61834E+06	0.448113660	5.23239E+05	1.49773E+06
3.6278E+05	2.37088E+06	0.427203985	1.03554E+06	2.12802E+06
1.7233E+05	2.42890E+06	0.476944536	5.10078E+05	4.12401E+06
5.0005E+05	3.20496E+06	0.431748800	1.68892E+06	2.81038E+06
3.7387E+05	3.08785E+06	0.471282732	1.61934E+06	2.70373E+06
2.4521E+05	1.75286E+06	0.433169355	7.02861E+05	1.58338E+06
2.8955E+05	1.83478E+06	0.423013778	8.25500E+05	1.64168E+06
3.1843E+05	3.07121E+06	0.440890702	8.24378E+05	2.85893E+06
3.5327E+05	2.79653E+06	0.439388483	1.01699E+06	2.56101E+06
1.7512E+05	2.78258E+06	0.468178823	5.14578E+05	2.66583E+06
1.4644E+05	1.64281E+06	0.458715029	4.28655E+05	1.54518E+06
1.3305E+05	1.51213E+06	0.457256053	3.87780E+05	1.42343E+06
1.4176E+05	1.44451E+06	0.452486720	4.11800E+05	1.35000E+06
1.3166E+05	1.31056E+06	0.451391232	3.82272E+05	1.22277E+06
1.0764E+05	1.21047E+06	0.458819248	3.13613E+05	1.13871E+06
1.5333E+05	1.24288E+06	0.440978773	4.41814E+05	1.14034E+06
1.4212E+05	1.21285E+06	0.443608471	4.10324E+05	1.11793E+06
1.3332E+05	1.02847E+06	0.442205012	3.64545E+05	1.02005E+06
1.0829E+05	1.03859E+06	0.449615968	3.13372E+05	9.66388E+05
1.6743E+05	1.15173E+06	0.430874630	4.78065E+05	1.04011E+06

Tabla D.4. Estimación de los módulos de falla de la roca

Determinación de los módulos de falla			
Relación entre la compresión uniaxial	Ángulo de fricción interna	Cohesión	Relación entre la tracción
1453 2810682	46 0634361	294 2158197	121 9400930
1256 2632791	30 0748312	3915177107	104 6886056
876 1139532	47 5949090	169 4176148	73 0094961
545 2071481	18 6015976	198 0807476	45 5222822
249 3169393	9 2169341	108 0146648	20 7764116
848 5437196	24 8956837	270 4873219	70 7119766
323 4108555	14 1845206	125 8787412	26 9590047
1332 9485993	42 5518458	282 1073658	111 0780466
697 7812215	25 9440712	298 5667951	79 1484351
744 8504209	23 4169711	244 2673007	62 0708684
407 8127656	17 3737687	172 4919461	39 1510553
2361 5489794	54 5877763	416 2159450	216 7953316
1005 0858369	29 2056006	293 8153769	83 7571616
1114 3363326	27 0878449	340 5818388	92 8613527
439 4620458	17 5024018	160 9683151	36 6218372
813 2494104	18 1328557	294 4471854	67 7707842
342 1802217	14 4320717	132 5471542	28 5161018
324 5526828	10 9879370	133 7767002	27 0460499
334 8577903	12 6190444	134 6095835	28 0714825
205 5560646	12 0395673	123 6805420	25 4881720
283 6791050	12 3448768	114 0863964	23 0399254
671 8067739	18 9966406	239 3794951	55 9940645
772 8273805	23 8718573	252 2123347	64 4022817
509 0367047	14 4630646	197 1303886	42 403921
338 7186284	7 5112929	174 5161411	33 1843626
308 8387074	10 0384548	128 4078261	25 7197258
658 8222718	18 8131559	224 1177367	52 2351693
298 6815643	9 8766587	124 6866282	24 7234637
423 8754974	14 9271156	162 6456629	35 3062914
991 4288008	23 7420447	328 8387447	82 6190687
410 4258638	14 6964801	158 2184766	34 2021636
246 9346284	12 0435222	99 8467496	20 5778774
639 1377950	15 7675902	241 2870875	53 1781500
802 0767369	12 2382792	323 1823573	66 8039781
697 8404077	20 0399356	243 8223204	58 1367006
223 1636125	10 7635960	82 3209629	18 5963977
106 6817668	20 1614343	316 0465086	75 5651134
175 3328973	21 4484026	590 3751769	144 5294073
456 1730264	14 1830939	177 4832963	38 0144338
1211 4380004	29 3765582	353 5590039	109 9521669
426 9426726	8 8666732	111 7677470	21 7452227
302 0608331	10 7613641	124 9650661	25 1717361
311 5776915	12 3648153	125 2821368	25 9640676
563 9507495	16 6406958	209 8519068	46 9968958
644 8260570	16 6325760	351 6316320	76 7355048
275 7976634	7 5577076	120 7682161	22 9831396
418 9416950	10 4596130	174 8697851	34 9951646
705 3336644	19 1027260	250 8410694	58 7778054
215 8763967	7 9518611	93 8745066	17 9859497
587 0980671	16 2632916	217 6875735	46 4243046
1027 5495404	24 6823342	326 2168816	85 1291284
500 7578978	13 3970043	197 5663854	41 7288223
663 5146979	20 2412918	230 3302039	55 1262423
1503 8381406	27 7844324	454 4770005	125 7365117
287 5470443	11 2046317	122 1289190	24 7665870
350 3562048	13 4550039	142 0838810	30 0296837
658 8088638	17 3947238	223 5162204	50 7420653
308 1356564	10 2214370	127 8738721	25 5113047
214 7702197	7 5577177	94 0450739	17 8975183
1361 5869233	31 5126846	380 5035177	113 4655769
505 7669105	14 7314083	185 2339113	42 2304925
439 5628432	14 4632707	183 3176537	41 8302369
898 3701407	18 1187871	361 8373217	83 1975117
193 8533259	6 2247875	66 4782018	16 8527938
240 9168590	10 6953024	89 9496512	20 0764079
628 0773961	12 5544101	251 6463997	52 3397822
210 2488863	7 3278993	92 4394329	17 5207405
309 8343192	11 6745265	120 1094283	25 8195266
943 2478500	15 2508715	359 9874641	78 6039875
286 6547550	4 6276904	132 1659218	23 8878963
2058 4761954	17 7597806	750 4327893	171 5396829
1961 4831803	17 8576566	713 7784167	163 4552650
504 0204354	14 1481657	196 2399548	42 0017030
657 9156233	13 6436734	249 2786473	54 8263189
765 8039262	16 8907636	315 7818761	83 8083272
903 9763802	19 9138219	359 4758872	75 3313556
294 1274641	6 8876263	130 1428260	24 5108170
220 9507240	9 5607270	93 3730960	18 4108357
169 5077679	9 4502252	80 2496457	15 7823140
209 7258818	10 4138169	87 3042118	17 4771588
186 3789665	10 6324443	77 2829485	15 5314140
134 9939491	9 5395320	57 0746514	11 2494958
237 7824895	12 7156093	94 6952136	19 8152075
210 5801371	12 1826507	84 9836486	17 5483448
190 1105970	12 4335978	76 3351346	15 8425498
136 3179475	10 9852693	58 1713312	11 3568290
273 7150268	14 6121091	105 6783393	22 8058536

BIBLIOGRAFÍA

1. Evaluación de Formaciones en México
D. Marmisolle-Daguerre y Colaboradores
Schlumberger
Septiembre 1984
2. Revista del Instituto de Investigaciones Cientificas
Septiembre de 1995
3. Eurock 98 SPE/ISRM
Rock Mechanics
Proceedings Volume 2
U.S.A. 8 - 10 July 1998
4. Petroleum related rock mechanics
Erling Fjaer
Elsevier Science Publishers. B. V. 1992
5. Apuntes de Registros Geofísicos
Ing. Carlos Lira Sil
6. Fundamentos de la Interpretación de Perfiles
Schlumberger
U.S.A 1969
7. DSI* dipole shear sonic imager
Schlumberger
Septiembre 1990
8. Production Operations Vol. 2
Well completions, Workover, and Stimulation
Allen, Thomas O., Roberts, Alan P.
Oil and gas consultants inter-national,INC. USA
9. Tree Cone Bit Selection With Sonic Log
Kenneth L. Mason
SPE Drilling Engineering
June 1987

10. Rock mechanics
Alfreds Richards Jumikis
Second Edition
Trans Tech Publications 1983

11. Applied drilling engineering
Adam T. Bourgoyne, Keith K. Millheim et al
Society of Petroleum Engineers
Vol. 2 , 1991